

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ»  
ЛАПЛАЗ-2023**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Москва

УДК:001.89:[621.373.826+533.9+539.2+621.384+530.1+531.761](06)

ББК:22.31:72

М 43

IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. – 440 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу IX Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2023», которая пройдет с 28 по 31 марта 2023 года в смешанном формате. Организатором конференции выступает Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ.

Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: лазерная физика и лазерные технологии; физика плазмы и плазменные технологии; сверхсильные лазерные поля; управляемый термоядерный синтез; современные проблемы теоретической физики; современные проблемы физики твердого тела, функциональных материалов и наносистем; ускорители заряженных частиц и радиационные технологии; современные проблемы квантовой метрологии, физика высокой плотности и энергии, электрофизическое и ядерное приборостроение, синхротронные и нейтронные методы исследования новых материалов.

Статьи получены до 12 марта 2023 года. Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственный редактор: Крупышева Полина Олеговна

ISBN 978-5-7262-2952-2

© Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2023

### **Программный комитет конференции**

- Гаранин Сергей Григорьевич – академик РАН, директор Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ -- председатель Программного комитета
- Кузнецов Андрей Петрович – д.ф.-м.н., директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – зам. председателя Программного комитета
- Бармаков Юрий Николаевич – д.т.н., первый заместитель научного руководителя ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, и.о. директора Института физико-технических интеллектуальных систем НИЯУ МИФИ
- Гарнов Сергей Владимирович – член-корр. РАН, директор Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, научный руководитель Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ
- Губин Сергей Александрович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Химическая физика» НИЯУ МИФИ
- Евтихий Николай Николаевич – генеральный директор ООО «НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», заведующий кафедрой «Лазерная физика» НИЯУ МИФИ
- Илькаев Радий Иванович – академик РАН, почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ
- Колачевский Николай Николаевич – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Кудряшов Николай Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» НИЯУ МИФИ
- Менушенков Алексей Павлович – д.ф.-м.н., профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ
- Попруженко Сергей Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ
- Смирнов Валентин Пантелеймонович – академик РАН, АО «Наука и инновации» ГК Росатом
- Фертман Александр Давидович – к.ф.-м.н, директор по науке Кластера ядерных технологий Фонда «Сколково»
- Черковец Владимир Евгеньевич – д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель АО ГНЦ «ТРИНИТИ»

### **Организационный комитет конференции**

- Кузнецов А.П. – директор Института ЛаПлаз, НИЯУ МИФИ, председатель Организационного комитета
- Генисаретская С.В. – заместитель директора Института ЛаПлаз, НИЯУ МИФИ, заместитель председателя Организационного комитета
- Борисюк П.В. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ, член Организационного комитета
- Гаспарян Ю.М. — доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Городничев Е.Е. – профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Губский К.Л. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Гусарова М.А. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета

- Казиева Т.В. – старший преподаватель отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Кузнецов А.В. – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Маклашова И.В. — начальник отдела организационного планирования и международного сотрудничества института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Масленников С.П. – профессор кафедры №24 НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета
- Рябов П.Н. – доцент кафедры прикладной математики № 31 Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, член Организационного комитета



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> .....	5
<b>Секция ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	33
Д. В. ПАНОВ, И. В. ШИШКОВСКИЙ <u>ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ НА МОРФОЛОГИЮ И ГЕОМЕТРИЮ ОДИНОЧНЫХ ТРЕКОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПЕРЕПЛАВЛЕНИИ СТАЛИ 316L</u> .....	34
А.А. ВАСИЛЬЕВ, М.А. МУРЗАКОВ, Н.В. ГРЕЗЕВ, И.Н. ШИГАНОВ <u>ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТАНДЕМ-ДУГОВАЯ СВАРКА ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ</u> .....	35
М.А. ЗАИКИНА, Е.А. АВИЛОВА, Е.А. ЕЛТЫШЕВА, Д.А. СИНЕВ, А.Ю. ШИШОВ, Е.М. ХАЙРУЛИНА, И. И. ТУМКИН <u>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ В СРЕДЕ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ</u> .....	36
В.М. ПРОКОПЬЕВ, Р.Р. СУСЛОВ, И.А. ФИЛАТОВ, Р.И. БОГДАНОВ, С.А. ХУБЕЖОВ <u>ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ, ОБРАЗОВАННОЙ ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ AISI 430</u> .....	37
Е. А. ДАВЫДОВА, И. А. ФИЛАТОВ, М. А. МИХАЛЕВИЧ, А. А. НОВОПАШИН, А. ПЕЛЬТЕК, Г. В. ОДИНЦОВА <u>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ СПЛАВОВ ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОГО ОБРАСТАНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ</u> .....	38
А.А. МОРОЗОВА, Д.С. ПОЛЯКОВ, Г.В. ОДИНЦОВА <u>ВОЗМОЖНОСТИ РУЧНОГО ЛАЗЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ТИТАНЕ</u> .....	39
М.К. ДРОЗДОВ, Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ф.А. КОРНЕЕВ <u>НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННОГО ПУЧКА ПРОТОНОВ ПО СИГНАЛАМ НА РАДИОХРОМНЫХ ПЛЕНКАХ</u> .....	40
А.А. СВИРИДОВА, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ИВАНОВ <u>ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИКИ AlN ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ</u> .....	41
А.П. ЛАСКОВНЕВ, М.И. МАРКЕВИЧ, В.И. ЖУРАВЛЕВА, Д.Ж. АСАНОВ, А.Б. КАМАЛОВ <u>ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ Si, InP В ВОДНОЙ СРЕДЕ</u> .....	42
В.Г. СРЕДИН, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ, С.М. ДЗЯДУХ <u>МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МДП СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ</u> .....	43
М.А. МУРЗАКОВ, Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Н.В. ГРЕЗЕВ, Д.М. КАТАЕВ, А.А. ВАСИЛЬЕВ <u>ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ КРЕМНИЯ И СТЕКЛА</u> .....	44

М.Б. ШАВЕЛКИНА, М.М. МАЛИКОВ, Т.И. БОРОДИНА, Г.Е. ВАЛЬЯНО_ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ГРАФИТА МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ДЛЯ 2D ПЕЧАТИ .....	45
В.Д. ВОРОНОВ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ_РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ СКАНИРУЮЩИМ ЛУЧОМ .....	46
И.А. СТОЛЯРОВ, И.Р. ОВСЯНКИН, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Е.А. БАЗДНИКИНА, А.Н. СУЧКОВ_СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ АМОРФНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ .....	47
А. И. ГРИШИНА, Н. Н. ЩЕДРИНА, Г. В. ОДИНЦОВА_УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ЗА СЧЁТ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ .....	48
А.К. ЛИСИЧНИКОВ, К.А. МИХАЙЛОВА, Ю.Ю. КАРЛАГИНА, Г.В. ОДИНЦОВА, Ю.Р. КОЛОБОВ_ЛАЗЕРНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ТРАВМОТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ SLM .....	49
Д.А. КОЧУЕВ, М.Н. ГЕРКЕ, Р.В. ЧКАЛОВ, Р.М. ДРОГИН_ВЫЯВЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИСТОЧНИКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОБРАЗЦЕ ZNS .....	50
И. А. ХРИСАНОВ, Ю. А. САТОВ, А. А. ЛОСЕВ, А. Н. БАЛАБАЕВ, А. В. ШУМШУРОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ_ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО <sub>2</sub> ЛАЗЕРА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ .....	51
М.В. ИОНИН, А.А. ИОНИН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ, О.А. РУЛЕВ, Д.В. СИНИЦЫН_СВЕРЛЕНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПММА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЩЕЛЕВЫХ СО- и СО <sub>2</sub> -ЛАЗЕРОВ С ВЧ НАКАЧКОЙ .....	52
И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.А. ИОНИН ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 11.4 МКМ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛАХ SRMOO <sub>4</sub> И LiGaS <sub>2</sub> .....	54
МОЖАЕВА М.Д., КОРШУНОВ А.А., ГАРМАТИНА А.А., ГОРДИЕНКО В.М., ДЫМШИЦ Ю.М., КОЛДАЕВ В.В., ДЬЯЧКОВА И.Г., АСАДЧИКОВ В.Е, МИНАЕВ Н.В. _ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ВЫХОД РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА МЕДНУЮ МИШЕНЬ. ....	55
М.В. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.М. САГИТОВА, Н.Н. ЮДИН, М.М. ЗИНОВЬЕВ, С.Н. ПОДЗЫВАЛОВ_ШИРОКОПОЛОСНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СО-ЛАЗЕРА В ПРОСВЕТЛЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ ZNGEP <sub>2</sub> .....	56
А.Г. БОНДАРЕНКО, Г.В. АЛЕКСАН, А.В. ПАЛЕХОВА, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ_ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ МИКРОФЛЮИДНОЙ СИСТЕМЫ НА СТЕКЛЕ ДЛЯ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА .....	58
К.А. ЕГОРОВА, К.А. РОЗАНОВ, А.Д. СИДОРОВА, Ф.А. ГОРЕНСКИЙ, А.Д. АГАРКОВ, Д.А. СИНЕВ_ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ	

ОБРАЗЦОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОД СЛОЕМ ГРАФИТОВОГО ПОРОШКА .....	59
К.Ф. ЗНОСКО_МЕХАНИЗМЫ РОСТА ВЫНОСА МАТЕРИАЛА ИЗ ЭРОЗИОННОГО КРАТЕРА ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ .....	60
КУТЛУБУЛАТОВА И.А., ИВАНОВ Д.С., ЛУКАШЕНКО С.Ю., ГРИГОРЬЕВА М.С., ЗАВЕСТОВСКАЯ И.Н._ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ АБЛЯЦИИ КРЕМНИЯ, ОБЪЕДИНЯЮЩАЯ МЕТОДЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ.....	61
М.А. КАРДАПОЛОВА, Н.И. ЛУЦКО, Л.И. ПИЛЕЦКАЯ_ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ В ВАЛИКАХ БРОНЗЫ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ.....	62
С. А. ЛЫСЕНКО, Н. Н. ЮРЫШЕВ, Н. П. ВАГИН_ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ СЛОЕВ САМОСВЯЗАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ ИЗ ТОНКОДИСПЕРСНОСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ СТЫКОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ГЕРМЕТИЗАЦИИ И СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЙ.....	63
А.В. ХАРЬКОВА, Д.А. КОЧУЕВ, К.С. ХОРЬКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ....	64
В.А. НОВИКОВ, Г.В. ГУСЕВА, С.И. ЯРЕСЬКО_СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ .....	65
А.К. КУТУКОВ, Р.В. СМИРНОВ, Е.А. ПЕГАНОВ, И.С. МАКОГОН, М.А. МИЛЛЕР ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗНАЧЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ШЕРОХОВАТОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛЕЙ ШХ15 И 40ХН2МА .....	66
Д.С. СТЕПАНЮК, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ, В.А. ШКУРАТОВА_ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЛАВЛЕНОМ КВАРЦЕ ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛИМП .....	67
А.В. КОРИБУТ, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, В.И. КОВАЛЕВ, А.А. ИОНИН_ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЙЯНИЕ В КРИСТАЛЛЕ $SrMoO_4$ ПРИ НАКАЧКЕ 300-ФС ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 515 НМ .....	68
Ю.М. АЛИЕВ, А.А. ФРОЛОВ_ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ МОД ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ДВУХЧАСТОТНЫМ Р-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ .....	69
КОЛЕСНИКОВ Н.М., БЕЛОВ А.С., ГУБСКИЙ К.Л., КРАТ С.А., ЕФИМОВ Н.Е., ПРИШВИЦЫН А.С., КУЗНЕЦОВ А.П._ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ "МИФИСТ-0" .....	70
М.С. КОРНЕЕВ, Д.О. ЗАМУРАЕВ, А.Л. ШАМРАЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВРЕМЕННОГО КОНТРАСТА УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ. ....	71
А.А. БУРЦЕВ, В.В. ИОНИН, А.В. КИСЕЛЕВ, Н.Н. ЕЛИСЕЕВ, В.А. МИХАЛЕВСКИЙ, А.А. НЕВЗОРОВ, А.А. ЛОТИН_ОПТИЧЕСКИЕ НЕЙРОМОРФНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	72

А. КОЗЛОВ, Д.Д. СТОЛЯРОВ, Д.В. ПЕТЮЛЬ, М.П. ПАТАПОВИЧ_ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЕЖА МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ .....	73
А.А. ЛИСКОВИЧ_СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЕ.....	74
Д.В. ПОМИНОВА, А.В. РЯБОВА, А.С. СКОБЕЛЬЦИН, И.В. МАРКОВА, И.Д. РОМАНИШКИН_СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОФИЗИЧЕСКИХ И ФОТОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО <i>in vitro</i> И <i>in vivo</i> .....	75
Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ф.А. КОРНЕЕВ_ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК МОЩНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКРИВЛЕННЫХ МИКРОПРОВОЛОЧНЫХ МИШЕНЕЙ .....	76
В.П.МИНАЕВ_О КОРРЕКТНОСТИ УЧЕТА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОТКАНИ.....	77
Е.В. ГРЫЗЛОВА, М.М. ПОПОВА, С.Н. ЮДИН, М.Д. КИСЕЛЕВ, А.Н. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО_РАВВИТТ-СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИ УЧАСТИИ ДИСКРЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ: ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ И УГЛОВЫЕ АРСПРЕДЕЛЕНИЯ....	78
И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ_ДИНАМИКА КВАЗИНЕПРЕРЫВНОЙ ВОЛНЫ В АКТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ .....	79
А.В. РУДЫЙ, Я.В. УЛЬЯНОВ_АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ КЕРАМИКИ КАК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛАЗЕРА .....	80
Е.Д. ТАРАКАНОВ, Я.В. УЛЬЯНОВ_Nd <sup>3+</sup> :YAG-КЕРАМИКА, ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЕЁ СВОЙСТВ И КАЧЕСТВА.....	81
Е.И. ЛИПАТОВ, Д.Е. ГЕНИН, САВВИН А.Д., В.В. ЧАЩИН, М.А. ШУЛЕПОВ, Е.Н. ТЕЛЬМИНОВ, А.П. ЕЛИСЕЕВ, В.Г. ВИНС, А.Е. ДОРМИДОНОВ, Е.Ф. МАРТЫНОВИЧ <sup>6</sup> , В.П. МИРОНОВ_ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ.....	82
А.И.МИСЬКЕВИЧ_ОБРАЗОВАНИЕ И ТУШЕНИЕ ЭКСИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ ХЕСL*ПРИ НАКАЧКЕ ПЛОТНЫХ AR-XE-CCL4 ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА .....	83
А.А. ШЕКУРОВ, И.Л. СНЕТКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Tm:YAP .....	84
В.С. ВЯЗАНКИН_АКТИВНАЯ ОБЛАСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЕТКИ INGAAS/ALINAS .....	85
А. А. ГАРМАТИНА, Е. И. МАРЕЕВ, А.А. КОРШУНОВ, М. Д. МОЖАЕВА, Ю.С. КРИВОНОСОВ, А.В. БУЗМАКОВ, И.Г. ДЬЯЧКОВА, В.Е. АСАДЧИКОВ, Н.В. МИНАЕВ В.М. ГОРДИЕНКО_ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ И МОНИТОРИНГ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ МИКРОФОКУСНОГО ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА .....	86
YUXIN LENG_ULTRA-INTENSE LASER SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS IN PLASMA PHYSICS AT SIOM .....	87
К.А. ГАЛЮК, Б.Д. ОВЧАРЕНКО, В.В. БУКИН_МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ.....	88

С.С. АНУФРИК, А.П. ВОЛОДЕНКОВ, К.Ф. ЗНОСКО_МОЩНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ЭКСИПЛЕКСНЫЙ ЛАЗЕР .....	89
Е.А. ЯРУНОВА, А.А. КРЕНЦ, Н.Е. МОЛЕВИЧ_СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ VCSEL С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ.....	90
А.Ю.ДАНИЛОВ, А.С. ЩЕКИН, А.А.ГАВРИКОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ_КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНОВОДА ИЗ ВОДЯНОЙ СТРУИ .....	91
М.С. КОРНЕЕВ, А.С. ТИЩЕНКО_ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА .....	92
М.В. РЕШЕТОВА, Н.М. АШАРЧУК, Е.О. ЕПИФАНОВ, Е.А. МИГАЛЬ, Ф.В. ПОТЕМКИН, Н.В. МИНАЕВ_ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ .....	93
П.А. ЩЕГЛОВ, М.В. ЧАЩИН, А.А. ТАУСЕНЕВ, М.М. НАЗАРОВ_ВЫХОД РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЭНЕРГИИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ МУЛЬТИТЕРАВАТНОГО ИМПУЛЬСА .....	94
П.И. ГОЛОВЧЕНКО, Д.С. КАЛАШНИК, М.А. ФОКИНА, М.П. ПАТАПОВИЧ ПОСЛОЙНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ДЕКОРАТИВНОГО ГВОЗДЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	95
Н.С. ЗАХАРОВ, А.Г. СПИЦЫН_ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	96
М.М.ЗАХАРЧУК, Т.Т.КОНДРАТЕНКО, А.Т.СААКЯН, В.Н.ПУЗЫРЁВ, А.Н.СТАРОДУБ ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЬНОГО ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ИМЕЮЩЕГО РАДИАЛЬНУЮ ПОЛЯРИЗАЦИЮ.....	97
Я.В. УЛЬЯНОВ, Е.А. ЧЕШЕВ___ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧИП-ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ $ND^{3+}:YAG/CR^{4+}:YAG$ -КЕРАМИКИ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ.....	98
Д.А. ДЕШИН, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Д. ВОРОНОВ, А.В. ОСИНЦЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ФАЗ ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ .....	100
Д.В. МАРИН, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ_КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ .....	101
<b>Секция МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>102</b>
С.З. АДЖИЕВ, И.В. МЕЛИХОВ, В.В. ВЕДЕНЯПИН, Н.Н. ФИМИН, А.В. ГОПИН, Я.Г. БАТИЩЕВА_ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВЫСОКОДЕТАЛИЗИРОВАННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ МИНИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТАХ .....	103

А.В. АКСЕНОВ, А.Д. ПОЛЯНИН_НЕСКОЛЬКО МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ .....	104
М.В. АРТЕМЬЕВА, М.О. КОРПУСОВ_О РАЗРУШЕНИИ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕКОЭРЦИТИВНЫМ ИСТОЧНИКОМ .....	105
А.А. БАЙРАМУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ_ТОЧНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЕМОЙ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЁДИНГЕРА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТРЕТЬЕЙ, ПЯТОЙ, СЕДЬМОЙ И ДЕВЯТОЙ СТЕПЕНЕЙ .....	106
С.П. БАУТИН, О.А. КАРЕЛИНА, А.Г. ОБУХОВ_ПРЯМОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА, БЛИЗКИХ К ТУРБУЛЕНТНЫМ ..	107
Ф.А. БЕЛОЛУЦКИЙ, А.Р. КАСИМОВ_ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ КОЛЕБАНИЙ СЛАБО НЕЛИНЕЙНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН МЕТОДАМИ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА .....	108
К.В. БРУШЛИНСКИЙ, В.В. КРЮЧЕНКОВ, Е.В. СТЕПИН_ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛОВУШКЕ «ГАЛАТЕЯ-ПОЯС» .....	109
В.В. ВЕДЕНЯПИН, Н.Н. ФИМИН, В.М.ЧЕЧЁТКИН_О ВЫВОДЕ ТЕНЗОРА ЭНЕРГИИ-ИМПУЛЬСА И УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ГРАВИТАЦИИ ИЗ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ .....	110
В.С. ДРЮМА_ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ КдВ .....	111
Т.Р. КАЛИМУЛЛИН, Е.В. СТЕПИН_ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСЗВУКОВЫХ СВЕРХАЛЬФЕНОВСКИХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В ПРИСУТСТВИИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ .....	112
В.Л. КАМЫНИН_ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ В МНОГОМЕРНОМ ВЫРОЖДАЮЩЕМСЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ.....	113
К.В. КАН, Н.А. КУДРЯШОВ_ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ, ОПИСЫВАЕМОЙ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЕДИНГЕРА С ВОЗМУЩЕНИЕМ В НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.....	114
О.В. КАПЦОВ_СТАЦИОНАРНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ И ПЛАЗМЫ.....	115
В.Ю. КОЖЕВНИКОВ, Н.С. СЕМЕНЮК, А.О. КОКОВИН, А.В. КОЗЫРЕВ КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ АНОМАЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПЛАЗМЫ КАТОДНОГО ФАКЕЛА .....	116
В.В. БОЧКАРЕВ, Б.Д. БРИЛЛИАНТОВ, С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, Д.С. СМИРНОВ, С.А. СМИРНОВ_МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	117
С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, Д.С. СМИРНОВ, С.А. СМИРНОВ_МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ ПАЦИЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ .....	118



А.Е. КУВШИННИКОВ_МОДИФИКАЦИЯ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ЧАСТИЦ И ЗАДАЧА О КОСОМ СКАЧКЕ УПЛОТНЕНИЯ .....	119
А.А. КУТУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ___АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА, ВЫРАЖЕННОЕ ЧЕРЕЗ ФУНКЦИЮ ЛАМБЕРТА.....	120
С.Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ_ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЛЬНИКОВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБОБЩЕННОГО КОМПЛЕКСНОГО УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ ПРИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ.....	121
И.Н. ЛЕВЧЕНКО, Г.К. ВЛАДИМИРОВ, И.В. ВОЛОДЯЕВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧЕК ПЕРОКСИДАЗНОЙ АКТИВНОСТИ АКТИВИРОВАННОЙ КУМАРИНОМ С-314 ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСА ЦИТОХРОМА СС КАРДИОЛИПИНОМ. ....	122
А.М. МАЛАФЕЕВ, А.А. КРЕНЦ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН-УБИЙЦ В ДИНАМИКЕ ЛАЗЕРА С ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.....	123
А.К. МАТВЕЕВА, М.О. КОРПУСОВ_О КРИТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ДЛЯ ОДНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ВОЛН В ПОЛУПРОВОДНИКАХ .....	124
В.А. МЕДВЕДЕВ, Н.А. КУДРЯШОВ_ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛИТОННЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА С ТРОЙНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ.....	125
С.Ю. МИСЮРИН, Н.Ю. НОСОВА_ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ЛАГРАНЖА II РОДА.....	126
С.С. МУРАВЬЕВ-СМИРНОВ_ЭКРАНИРОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ СЛОЕВ.....	127
О.В. НАГОРНОВ, С.А. ТЮФЛИН, Т.И. БУХАРОВА_ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ОСНОВЕ СКВАЖИННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЛЕДНИКОВ .....	128
В.В. НАЗАРОВ_ЧТО НОВОГО В ОБЛАСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	129
В.В. НАЗАРОВ_ГИПОТЕЗЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПО МОДЕЛИ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ОПИСАТЬ РАЗВИТИЕ ПОРИСТОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ, РАЗДУВАЕМОЙ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ УСКОРЯЮЩЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ.....	130
Д.Р. НИФОНТОВ, Н.А. КУДРЯШОВ_ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ В ВИДЕ ПОЛИНОМА.....	131
Е.А. ОВСЯННИКОВ, М.О. КОРПУСОВ_ФОРМУЛЫ ГРИНА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ИОННО-ЗВУКОВЫХ И ДРЕЙФОВЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ .....	132
У. РАМАЗАНОВА, Ш. МАТНАЗАРОВА, С. МИРЗАЕВ, У. ХАЛИЛОВ, М. ЮСУПОВ ПОНИМАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОКИСЛЕНИЯ ОЛИГОСАХАРИДОВ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ НА АТОМНОМ УРОВНЕ.....	133
В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ___ИЗУЧЕНИЕ ТАНДЕМНЫХ ПОВТОРОВ В ХРОМОСОМАХ <i>S.ANNUUM</i> .....	134

М.С. СКОРОХОДОВ, А.Г. СБОЕВ_АНАЛИЗ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....	135
В.Г. СОРОКИН, А.В. ВЯЗЬМИН_НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ: ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ НА ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ.....	136
В.С. ЖЕЛТУХИН. А.Ю. ШЕМАХИН, Г.Б. КИСЕЛЁВ, Т.Н. ТЕРЕНТЬЕВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УШИРЕНИЯ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ЭЛЕКТРОНОВ В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОМ ВЧ-РАЗРЯДЕ....	137
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.В. РЕПНИКОВ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО_ЗАВИСИМОСТЬ ТЯГИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА.....	138
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Н.И. МИСЮЧЕНКО, Л.В. РУДАК_ОЦЕНКАОПАСНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ СКОРОСТИЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ГОРЕНИЯ .....	139
В.В. ЦЕГЕЛЬНИК_О СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА .....	140
В.А. ШЕИН, Р.Б. РЫБКА, А.Г. СБОЕВ_НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АГЕНТА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ.....	141
А.Ю. ШЕМАХИН_МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ВЧ-ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА .....	142
К.Е. ШИЛЬНИКОВ, М.Б. КОЧАНОВ_ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СЕТОК ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОДНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....	143
Э.Э. САМУЭЛЬ ПЬЕР_МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА УГЛЕРОДНОЙ ГУБКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ДИФFUЗНОЙ АГРЕГАЦИИ .....	144
А.С. КОВАЛЁВА, Т.Р. КАЛИМУЛЛИН, Е.В. СТЕПИН_МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В УЗКИХ КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ .....	145
Р.В. МУРАТОВ, П.Н. РЯБОВ, Н.А. КУДРЯШОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЛОС СДВИГА В СТАЛИ, АЛЮМИНИИ И ОБЕДНЕННОМ УРАНЕ .....	146
С.А. ЛАДЫГИН, Р.Н. КАРАЧУРИН, П.Н. РЯБОВ_ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НЕЙРОСЕТЕВЫМ МЕТОДОМ .....	147
<b>Секция ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ</b>	<b>148</b>
Е.А. ВИНИЦКИЙ, С.А. КРАТ, А.С. ПРИШВИЦЫН, Н.Е. ЕФИМОВ_ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА МЕРНИСТ-1.....	149
А.А. СТЕПАНЕНКО_КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА МИФИСТ-0 .....	150
А.Б. ЛЯШЕНКО, А.А. ПШЕНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО_ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-15МД.....	151



И.И. ФАЙРУШИН, А.В. МОКШИН_РАЗВИТИЕ САМОСОГЛАСОВАННОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕОРИИ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ СИЛЬНО НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ.....	152
С.Ю. ГУСЬКОВ, Р.А. ЯХИН_УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЧНО ГОМОГЕНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА .....	153
А.В. КОЗЫРЕВ, М.Ю. ДОКУКИН_ИОННО-ЗВУКОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ СТРАТЫ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ .....	154
А.А. КУЗНЕЦОВ, М.А. ГАРАСЁВ, А.А. НЕЧАЕВ, Вл.В. КОЧАРОВСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПОДХОД И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В АНИЗОТРОПНОЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ.....	155
Т.А. СЕМЕНОВ, С.А. ШУЛЯПОВ, Д.А. ГОРЛОВА, А.В. ЛАЗАРЕВ, К.А. ИВАНОВ, М.С. ДЖИДЖОЕВ, А.Б. САВЕЛЬЕВ В.М. ГОРДИЕНКО_ЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ( $I \approx 3 \times 10^{19}$ Вт/см <sup>2</sup> ) ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО СМЕШАННЫМИ KrXe КЛАСТЕРАМИ .....	156
И.И. ПАШКОВ, И.Д. ЕГОРОВ, Ю.С. КОРОЛЕВА_ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В СТРУЕ АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ VERA С ПОМОЩЬЮ ТРОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА .....	158
А.В. ДЕДУРА, Д.С. ЛЕОНТЬЕВ, В.С. ЛИСИЦА_СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ $H\alpha$ В ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ MSE .....	159
Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ, А.Т. СААКЯН, В.Н. ПУЗЫРЁВ, А.Н. СТАРОДУБ, А.А. КОЛОГРИВОВ_СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ МИШЕНИ ИЗ СЕРЫ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ .....	160
В.И. ЖУКОВ, Д.М. КАРФИДОВ_ПРОФИЛЬ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В СВЧ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОМ ПОЛЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ .....	161
В.А. ПАНЮШКИН, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. БОГДАНОВ, А.А. ГОЛУБЕВ КОМПАКТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЛАЗМЫ .....	162
А.В. СКОБЛЯКОВ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ.....	163
А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, В.А. ПАНЮШКИН, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ_КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	164
Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ, В.В. БОРОГ_ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОЛИТЕ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ .....	165
Р. ИДЕАЛ, В.П. БУДАЕВ, Д.В. РЫЖАКОВ_МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД .....	166
Д.Л. КИРКО, П.П. СИДОРОВ, О.А. БАШУТИН, А.С. САВЕЛОВ, В.В. БОРОГ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА.....	167

Е.Ю. ТУЛУБАЕВ, Ю.В. ПОНКРАТОВ, Ю.Н. ГОРДИЕНКО, И.Л. ТАЖИБАЕВА, В.С. БОЧКОВ, А.В. ВЕРТКОВ, М.Ю. ЖАРКОВ_МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ С ОХЛАЖДАЕМЫМ МАКЕТОМ МОДУЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИМИ ГАЗАМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....	168
Р.А. СЕЛИВАНОВ, И.А. СОРОКИН, С.А. КРАТ_ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ КАПИЛЛЯРНО ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ЛИТИЕМ, ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ .....	169
В.Ю. ЛИСЕНКОВ, М.М. ХАРЬКОВ, А.В. ТУМАРКИН, Г.И. РЫКУНОВ, М.С. КУКУШКИНА, Д.В. КОЛОДКО А.В. КАЗИЕВ_ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В СТАЦИОНАРНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА С ГОРЯЧЕЙ МИШЕНЬЮ .....	170
М.И. АЖГИХИН, В.О. ОСКИРКО, А.Н. ЗАХАРОВ_РАСПЫЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В КОМБИНИРОВАННОМ ИМПУЛЬСНОМ БИПОЛЯРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ .....	171
Н.О. САВВИН, А.Е. ЕВСИН, И.Д. ЖДАНОВ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОКСИДИРОВАНИЯ И НАВОДОРОЖИВАНИЯ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОТОКА .....	172
С.М. СОРОКИН, А.Е. ЕВСИН, С.М. МУРОМСКИЙ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, А.М. ЗАХАРОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ___ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОДАВЛЕНИЯ ДИФфуЗИИ АЛЮМИНИЯ В СТАЛЬ ИЗ НАПЫЛЕННОГО В ПЛАЗМЕ АЛЮМОСОДЕРЖАЩЕГО ПОКРЫТИЯ.....	173
А.С. ИСАКОВА, А.Е. ЕВСИН, С.М. МУРОМСКИЙ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, А.М. ЗАХАРОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ_СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ Fe-Cr-Me (Me = Al, Zr), НАНЕСЕННЫХ В ПЛАЗМЕ НА ФРАГМЕНТЫ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭП-823.....	174
В.П. АФАНАСЬЕВ, Л.Г. ЛОБАНОВА_ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА.....	175
Ю. ВАН, З. Р. АРУТЮНЯН, Ю. М. ГАСПАРЯН, Д. Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н. Е. ЕФИМОВ, С. ТАН, Н. С. УМЕРЕНКОВА, С. А. ГВИНДЖИЛИЯ_ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В W-Cr-Y СПЛАВЕ .....	176
Н.Н.ДЕГТЯРЕНКО, К.С.ГРИШАКОВ, А.А.ПИСАРЕВ, Ю.М.ГАСПАРЯН_НЕКОТОРЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕКОМБИНАЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА С ПОВЕРХНОСТИ W(100): ИССЛЕДОВАНИЕ DFT.....	177
Д.Н. СОВЫК, Ю.М. КРЫЛОВ, В.Ю. ЮРОВ, И.А. ФЁДОРОВА, А.П. БОЛЬШАКОВ, В.Г. РАЛЬЧЕНКО_ТРАВЛЕНИЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ В ПРИСУТСТВИИ КИСЛОРОДА: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ .....	178
С.А. КРАТ, И.А. СОРОКИН, Д.А. БУТНЯКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА РАСПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА В ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СМЕЩЕНИЕМ МИШЕНИ.....	179
Я.Е. ЖАРКОВ, К.И. РОМАНОВ, Е.А. ШЕРШУНОВА_МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ В ВОЗДУХЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ .....	180

В.Н. АРУСТАМОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ_ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРУЕМОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА И НАНОСИМЫХ ПОКРЫТИЙ.....	181
Е.Н. СТАНКЕВИЧ, Я.А. САДОВСКИЙ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ_ОСОБЕННОСТИ ТРАССИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ МИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	182
А.А. КОЖУРИН, М.Л. ДУБРОВ, Р.Р. ХАЙРУТДИНОВ, В.Э. ЛУКАШ_ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА НЕЙТРАЛОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА.....	183
Н.В. БАТРАК, Н.Г. КОПАЛЕЙШВИЛИ, В.В. КУЗЕНОВ_ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С ПЛАЗМОЙ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	184
М.М. ХАРЬКОВ, Г.А. КАБАНОВ, Г.С. ЛОМОНОСОВ, В.А. ТАТАРУЛЯ, А.В. ТУМАРКИН, Д.В. КОЛОДКО, А.В. КАЗИЕВ_ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ CrAlN, ОСАЖДЕННЫХ В СРЕДНЕЧАСТОТНОМ ИМПУЛЬСНОМ МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ.....	185
<b>Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ.....</b>	<b>186</b>
А.А. АБДУВАИТОВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, Н.А. МАРОЗИКОВА, В.Х. ХАЛМУХАМЕДОВА_ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ Ti ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ O <sub>2</sub> + .....	187
Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ, А.И. ПОДЛИВАЕВ, Р.Г. БАТУЛИН_УВЕЛИЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА .....	188
А. АВВАЛБОВ, Х.Х. АХУНОВ, И.Х. АШУРОВ, Х.Х. ЗОХИДОВ, М.Ш. КУРБАНОВ_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДНЫХ ШЛАКОВ ДЛЯ СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ ДЛЯ АНОДОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ.....	189
Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. ПЕТРУШИН, Д.В. ХАЛАИМОВ, И.В. БЕЗЛЕР.....	190
МОДИФИКАЦИЯ СИНГЛЕТНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОДНОЧАСТИЧНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КОНТАКТЕ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ .....	190
А.В. АИТОВА, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, В.А. КАШУРНИКОВ_ОСОБЕННОСТИ ПИНИНГА ВИХРЕЙ АБРИКОСОВА В СЛОИСТОМ ВТСП НА ДЕФЕКТАХ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ .....	191
Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН_ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТРАССИРОВКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ГРАДИЕНТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	192
В.П. АФАНАСЬЕВ, Л.Г. ЛОБАНОВА_ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ .....	193
Е.Е. АШКИНАЗИ, С.В. ФЕДОРОВ, А.К. МАРТЪЯНОВ, В.С. СЕДОВ, О.И. ОБРЕЗКОВ, Р.А. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, О.П. ЧЕРНОГОРОВА, В.Е. РОГАЛИН, А.А. ЗВЕРЕВ, В.Г. РАЛЬЧЕНКО, С.Н. ГРИГОРЬЕВ, В.И. КОНОВ_СТОЙКОСТЬ К РАЗРУШЕНИЮ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ СПЛАВА W-C <sub>60</sub> , МОДИФИЦИРОВАННОГО ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ.....	194

Н.Н. БЕГЕН, Р.А. КАРАКУЛОВ, Е.П. БАНИН, П.А. ЖИЛЕНКОВ <u>ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ</u> .....	195
БИ ДУНСЮЭ, У МЭНЮАНЬ, Д.А. ГАВРИЛОВЕЦ, А. КАРАДЖИЧ, В.В. ФИЛАТОВ <u>РЕЗОНАНС ФАНО ПОЛЯРИТОННЫХ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ ВАН ХОВА НА КРАЯХ СТОП-ЗОНЫ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА</u> .....	196
Г.И. БИКБАЕВА, А.А. ВАСИЛЬЕВА, А.А. МАНЬШИНА <u>ЛАЗЕРНОЕ ОСАЖДЕНИЕ НАНОСТРУКТУР РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИИ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ</u> .....	197
К.А. БОРОДАКО, М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, Д.А. АБИН, С.В. ВЕСЕЛОВА, И.А. РУДНЕВ <u>ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ВТСП ЛЕНТ И СБОРОК</u> .....	198
Р.А. ВАХРУШЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.И. ЧУДАРИН, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ <u>СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТОЙКОСТЬ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ ИТРИЙ СОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ MoSiB</u> .....	199
С.В. ВЕСЕЛОВА, И.А. РУДНЕВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, Д.С. УВИН, С.А. ХОХОРИН, Р.Г. БАТУЛИН <u>ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ КОМПОЗИТОВ MgB<sub>2</sub> ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ</u> .....	200
В.В. ВОРОНОВА, Ю.А. МИТЯГИН, М.П. ТЕЛЕНКОВ, П.С. КЛЕММЕР, С.А. САВИНОВ, Д.А. ПАШКЕЕВ, В.П. МАРТОВИЦКИЙ <u>ПЕРЕСТРОЙКА ЭНЕРГИЙ ПОДЗОН В СТРУКТУРАХ ИЗ КВАНТОВЫХ ЯМ ПРИ ВВЕДЕНИИ В ЯМЫ ТОНКИХ ТУННЕЛЬНО-ПРОЗРАЧНЫХ БАРЬЕРОВ</u> .....	201
С.А. ВОТЯКОВ, А.В. ОСАДЧИЙ <u>ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ОБЪЕМНО-ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ПОЛЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛАХ</u> .....	202
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, П.М. САЙПУЛАЕВ, Р.М. ЭМИРОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, А.Э. РАБАДАНОВА, Ш.П. ФАРАДЖЕВ <u>СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ ЦИРКОНАТА БАРИЯ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ</u> .....	203
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Р.М. ЭМИРОВ, М.Х. ГАДЖИЕВ, М.В. ИЛЬИЧЕВ <u>ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ BiFeO<sub>3</sub> ПУТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ</u> .....	204
М.Д. ГРИЦКЕВИЧ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, В.Н. НЕВОЛИН, В.Ю. ФОМИНСКИЙ <u>ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СЕРЫ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ WSe<sub>x</sub>S<sub>y</sub> В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ</u> .....	205
К.С. ГРИШАКОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО <u>УСТОЙЧИВОСТЬ ТВЕРДЫХ АТОМАРНЫХ АЗОТНЫХ СТРУКТУР В ОТСУТСТВИИ ДАВЛЕНИЯ</u> .....	206
Д.С. ДАЙБАГЕ, Л.И. КАРМАЗИН, А.В. ОСАДЧЕНКО, И.А. ЗАХАРЧУК, С.А. АМБРОЗЕВИЧ, М.Л. СКОРИКОВ, Р.Б. ВАСИЛЬЕВ, А.С. СЕЛЮКОВ <u>КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В УЛЬТРАТОНКИХ КОЛЛОИДНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ CdSe</u> .....	207
П.Н. ДЕГТЯРЕНКО, В.А. СКУРАТОВ, В.К. СЕМИНА, М.С. НОВИКОВ, С.Ю. ГАВРИЛКИН, А.Ю. ЦВЕТКОВ, А.В.ОВЧАРОВ, А.М. ПЕТРЖИК <u>ВЛИЯНИЕ</u>	

ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ $Bi$ С ЭНЕРГИЕЙ 670 МЭВ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ .....	208
А.И. ДМИТРИЕВ, А.В. КОЧУРА, А.П. КУЗЬМЕНКО, О.А. НОВОДВОРСКИЙ, Л.С. ПАРШИНА, О.Д. ХРАМОВА, Б.А. АРОНЗОН_МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $InMnSb$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ .....	209
Т.Э. ЖУРАБОЕВ, Э.В. БАКИРОВ, У.Б. УЛЬЯЕВ, У. ХАЛИЛОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ РОСТА ГРАФЕНА .....	210
В.В. ЗАЛЕТКИНА, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ_РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТОВ ЗАХВАЧЕННОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ВТСП .....	211
А.А. ЗАСЫПКИНА, Д.Д. СПАСОВ, Р.М. МЕНШАРАПОВ, Н.А. ИВАНОВА, О.К. АЛЕКСЕЕВА, В.Н. ФАТЕЕВ_ S-МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНОГО НОСИТЕЛЯ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ КАТАЛИЗАТОРА ТВЕРДОПОЛИМЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА.....	212
В.В. ЗУБКО, Н.С. ИВАНОВ, К.Л. КОВАЛЕВ, С.С. ФЕТИСОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ В УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ ВТСП-2 ЛЕНТ .....	213
Н.А. ИВАНОВА, А.А. СТУКАЛО, М.В. СИНЯКОВ, Д.Д. СПАСОВ, Р.М. МЕНШАРАПОВ, Б.В. ИВАНОВ, В.Н. ФАТЕЕВ_ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ МЕМБРАН НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОДОРОДНОГО КОМПРЕССОРА/КОНЦЕНТРАТОРА .....	214
П.А. ИВАНОВА, К.В. СМИРНОВА, А.А. ИГНАТЬЕВ, А.Н. ИВАНОВ, В.В. РЫБКИН, Д.А. ШУТОВ_ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФЕРРИТОВ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НИТРАТОВ .....	215
З.А. ИСАХАНОВ, Ф.Ё. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Е. УМИРЗАКОВ_СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ $WO_3/W(111)$ .....	216
З.А. ИСАХАНОВ, И.О. КОСИМОВ, А.С. ХАЛМАТОВ, А.А. АХМЕДОВ, З.Э. МУХТАРОВ ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ ..	217
А.А. КАЗЬМИН, С.А. НУРЕТДИНОВ_РОСТ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ УГЛЕРОДА.....	218
А.В. КАЛАШНИКОВ, А.В. КРАСАВИН, В.Д. НЕВЕРОВ_РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ БОГОЛЮБОВА-ДЕ-ЖЕНА ДЛЯ ТРЕУГОЛЬНОЙ РЕШЕТКИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ .....	220
Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО, С.И. РУПАСОВ, Е.А. ЛЕВАШОВ ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ $Me-Si-B$ ( $Me: Mo, Zr, Hf$ ), ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ DCMS221	
А.В. КЛАУЗ, С.В. РОГОЖКИН, А.А. ХОМИЧ, А.А. БОГАЧЁВ, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ $Fe$ НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ.....	222
П.С. КЛЕММЕР, Ю.А. МИТЯГИН, М.П. ТЕЛЕНКОВ, П.Ф. КАРЦЕВ, С.А. САВИНОВ, В.В. ВОРОНОВА, Д.А. ПАШКЕЕВ, В.П. МАРТОВИЦКИЙ_СПЕКТРЫ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ СО ВСТРОЕННОЙ СЕРИЕЙ ТОНКИХ ТУННЕЛЬНО-ПРОЗРАЧНЫХ БАРЬЕРОВ .....	223



Е.В. КЛИМОВА, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КВАЗИ-2D ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И УГЛЕРОДА ДЛЯ СВЕРХНИЗКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ.....	224
Т.Н. КОБЕРНИК, А.И. КАРЦЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И АЦЕТОНА 2D-СЛОЕМ $\text{Co}_2\text{Te}_3$ С ПРИМЕНЕНИЕМ DFT.....	225
А.В. КОРОЛЕВА_ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА, С ПОМОЩЬЮ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ.....	226
А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ_ВЛИЯНИЕ КОЛОНЧАТЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПИННИНГА НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК И НАМАГНИЧЕННОСТЬ СЛОИСТОГО ВТСП СО СЛАБОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ.....	227
А.Ю. МАЛЯВИНА, И.В. МАРТИРОСЯН, И.К. МИХАЙЛОВА_ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТАХ ПРИ КРИТИЧЕСКИХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ .....	228
М.М. МАРТЪЯНОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ ВИХРЕВАЯ РЕШЕТКА СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ .....	229
Е.С. МАТЮХАНОВ, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН, М.С. НОВИКОВ, А.В. ШЕМЧУК, Е.Н. ИСКОРНЕВ, А.В. МЕРКУРЬЕВ, В.М. ДРОБИН, Г.Л. ДОРОФЕЕВ, Д.О. ПОНКИН, В.А. КАШИРИН, А.В. РЯБОВ, Я.Ю. ВЕКЛИЧЕВ, И.А. РУДНЕВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ РАЗРАБОТКА ВТСП КАБЕЛЕЙ НУКЛОТРОННОГО ТИПА В ОИЯИ .....	230
У.К. МАХМАНОВ, Ш.А. ЭСАНОВ, К.Н. МУСУРМОНОВ, А.Х. ШУКУРОВ, Б.А. АСЛОНОВ, Д.Т. СИДИГАЛИЕВ, Т.А. ЧУЛИЕВ, Й.Ш. ДУСОВ_ПОЛУЧЕНИЕ ФИЛАМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕНОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ.....	231
У.К. МАХМАНОВ, Ш.А. ЭСАНОВ, К.Н. МУСУРМОНОВ, А.Х. ШУКУРОВ, З. БЕКМУРОДОВ, Д.Т. СИДИГАЛИЕВ, Т.А. ЧУЛИЕВ, С. ЭШБОЕВ_ОСОБЕННОСТИ ФУЛЛЕРЕНА $\text{C}_{60}$ В БИНАРНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ .....	232
А.А. МИХАЙЛОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ, В.А. КАШУРНИКОВ ТЕМПЕРАТУРНАЯ И РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РЕЛАКСАЦИИ СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА.....	233
И.К. МИХАЙЛОВА, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ, М.С. НОВИКОВ_МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТОВ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ	234
А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ, Р.Г. БАТУЛИН_ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВ $\text{MgB}_2$ И $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ.....	235
Ш.А. МУМИНОВА, Ф.Ф. УМАРОВ, И.Д. ЯДГАРОВ_АДСОРБЦИЯ АТОМОВ АЗОТА НА ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....	236
Ж.Х. МУРЛИЕВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, М.Э. ИСХАКОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Р.М. ЭМИРОВ СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $\text{Ti}_{67}\text{Al}_{33}$ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМООБРАБОТОК.....	237

Н.М. МУСТАФОВЕВА, А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФАЕВА_АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СКРЫТЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ NiSi <sub>2</sub> , СОЗДАНЫХ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ Si .....	238
Н.М. МУСТАФОВЕВА, А.К. ТАШАТОВ, С.Н. ЭШБОБОВЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ Si(111) .....	239
А.А. НАШИВОЧНИКОВ, А.И. КОСТЮКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ ЛАЗЕРНОМ СИНТЕЗЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО НАНОЛЮМИНОФОРА НА ОСНОВЕ МОНОКЛИННОГО Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Eu <sup>3+</sup> .....	240
И.В. НИКОЛАЕВ, Н.Г. КОРОБЕЙЩИКОВ_БЛИСТЕРИНГ, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ АРГОНА, НА ПОВЕРХНОСТИ ТРИБОРТА ЛИТИЯ .....	241
М.С. НОВИКОВ, П.Н. ДЕГТЯРЕНКО, С.Ю. ГАВРИЛКИН, А.Ю. ЦВЕТКОВ, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН, Д.Н. НИКИФОРОВ, А.В. ШЕМЧУК, Е.С. МАТЮХАНОВ, Г.В. МИЦЫН, В.И. СТЕГАЙЛОВ, В.А. СКУРАТОВ, В.К. СЕМИНА_РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПИННИНГА В ВТСП ЛЕНТАХ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТОВ НОВОГО НУКЛОТРОНА С АЗОТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ .....	242
С.А. НУРЕТДИНОВ, И.Г.СЕРГИЕНКО, В.В. ТАРКОВСКИЙ_ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ .....	243
И.Ф. НУРИАХМЕТОВ, И.А. ЗАВИДОВСКИЙ, О.А. СТРЕЛЕЦКИЙ_ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ДЕГИДРОГАЛОГЕНИРОВАННОГО ПОЛИВИЛИДЕНХЛОРИДА .....	244
Г.А. ОВСЯННИКОВ, К.И. КОНСТАНТИНЯН, А.А. КЛИМОВ, В.А. ШМАКОВ, Г.Д. УЛЬЕВ, А.В. ШАДРИН_СПИНОВЫЙ ТРАНСПОРТ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ ИРИДАТ - МАНГАНИТ- .....	245
М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, Д.А. АБИН, И.В. МАРТИРОСЯН, И.А. РУДНЕВ ПРОТОТИП МАСШТАБИРУЕМОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ СТОПОК ВТСП ЛЕНТ .....	246
А.Н. ПАЙЗУЛЛАЕВ, К.Б. ЭГАМБЕРДИЕВ, Б.А. АЛЛАЕВ, С.З. МИРЗАЕВ_ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА ИСПАРЕНИЕ НАНОЖИДКОСТИ.....	247
Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.Х. РАБАДАНОВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, А.Э. РАБАДАНОВА___ФОРМИРОВАНИЕ ОБОБЩЕСТВЛЕННЫХ ЗАРЯДОВЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В УВСО И ЭФФЕКТ ИХ МГНОВЕННОЙ РЕЛАКСАЦИИ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИИ .....	248
А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ___КОРРЕЛЯЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО УВСО.....	249
РАВИ КУМАР, М.П. ТЕЛЕНКОВ, Ю.А. МИТЯГИН_ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МУЛЬТИЭКСИТОНОВ В КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ С ПРОДОЛЬНОМ ОГРАНИЧИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ .....	250

Г.Т. РАХМАНОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССОЦИАТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ КОКАИНА НЕСТАЦИОНАРНЫМИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ .....	251
Ю.И. РУКИНА, М.Ю. НАГЕЛЬ, О.И. ОБРЕЗКОВ, Ю.В. МАРТЫНЕНКО_ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЯ КАРДИОЭЛЕКТРОДА ПО ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ .....	252
К.Н. РЫКУН, А.Н. МОРОЗ, А.Н. МАКСИМОВА, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ ВЛИЯНИЕ БАЗИСА РЕШЕТКИ ДЕФЕКТОВ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК ВТСП В МАГНИТНОМ ПОЛЕ .....	253
А.В. РЯБОВА, Д.В. ПОМИНОВА, И.В. МАРКОВА, И.Д. РОМАНИШКИН, Р.В. ШТАЙНЕР, В.Б. ЛОЩЕНОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ.....	254
А.С. САИДРАХМАНОВА, Ё.С. ЭРГАШОВ_ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ $CoSi_2$ СФОРМИРОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ Si .....	255
И.Г. СЕРГИЕНКО, С.Д. ЛЕЩИК, А.А. КАЗЬМИН_ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗРЯДА НА РАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ .....	256
А. СОЛОВЬЕВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ_РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СТРУКТУРЕ MOSIS В ПАКЕТЕ COMSOL MULTIPHYSICS 5.2. ....	257
В.Г. СРЕДИН, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ, С.М.ДЗЯДУХ МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МДП СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ.....	258
В.Е. СУПРУНЧУК, Л.В. ТАРАЛА, Е.А. БРАЖКО, В.П. ТИЩЕНКО_ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКА ПРЕКУРСОРА YAG НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ .....	259
А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Н.В. ШВЫНДИНА ЖАРОСТОЙКОСТЬ La- СОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ Mo-Hf-Si-W.....	260
А.К. ТАШАТОВ, Б.Е. УМИРЗАКОВ, Н.М. МУСТАФАЕВА, С.Н. ЭШБОБОВ_ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПЛЕНОК Co и $CoSi_2$ НА ПОВЕРХНОСТИ Si .....	261
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, С.Т. АБРАЕВА, С.Т. ГУЛЯМОВА, Ш.А. ТОЛИПОВА, А.У. ХУЖАНИЯЗОВА, Х.Х. БОЛТАЕВ_ВЛИЯНИЕ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ $Ar^+$ НА СПЕКТР ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА ПОВЕРХНОСТИ Ge .....	262
С.К. ТЕЛЯЕВ, А.Н. ПАЙЗУЛЛАЕВ, К.Б. ЭГАМБЕРДИЕВ, О.В. ТРУНИЛИНА, С.З. МИРЗАЕВ_АКУСТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ВОДНЫХ НАНОЖИДКОСТЯХ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМНЫХ НАНОЧАСТИЦ .....	263
А.А. ТРЕСКОВА, О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, П.Ф. КАРЦЕВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ_ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $WSe_x/NP-W$ ДЛЯ ФОТО-АКТИВИРОВАННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА НА КРЕМНИЕВОМ ФОТОКАТОДЕ В КИСЛОТНОМ РАСТВОРЕ .....	264



У.Б. УЛЬЯЕВ, У.Б. ХАЛИЛОВ_РОЛЬ ДЕФЕКТОВ ГРАФЕНА В ХРАНЕНИИ ВОДОРОДА .....	265
У.Б. УЛЬЯЕВ, К.К. МЕХМОНОВ, М.С. ЮСУПОВ, У.Б. ХАЛИЛОВ_ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК .....	266
И. УРУНОВ, Ф. САФАРОВ, Ф. ХАЙДАРОВ, К. ЭГАМБЕРДИЕВ, У. ХАЛИЛОВ_ОЦЕНКА РАЗМЕРА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ.....	267
Л.В. ФУРОВ_О СПОСОБЕ ИСПЫТАНИЯ СТОЙКОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОВОЙ УДАР .....	268
Д.А. ХАЧАТРЯН, А.В. ШЕЛЯКОВ, Н.Н. СИТНИКОВ_ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ TiNiCu С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ.....	269
Д.Х. ХУСАНОВА, Ж.В. ОЧИЛОВ, С.З. МИРЗАЕВ, У.Б. ХАЛИЛОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛА ПЕРИЛЕНА ДО НУКЛЕАЦИИ: ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	270
Ф.И. ЧУДАРИН, А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ_ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МОЗАИЧНЫХ КАТОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ РЗМ, ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ MoSi2 .....	271
А.В. ШЕМЧУК, М.С.НОВИКОВ, Д.Н. НИКИФОРОВ, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН, М.В. ИЛЬИН ВТСП ПРОТОТИП КВАДРУПОЛЬНОГО МАГНИТА НОВОГО НУКЛОТРОНА .....	272
А. ЭРГАШЕВА, К. МЕХМОНОВ, У. ХАЛИЛОВ_ВЛИЯНИЕ КАТАЛИЗАТОРА НА ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНДОЭДРАЛЬНОГО КАРБИНА .....	273
Н.Р. ЮНУСОВА, В.И. КОЗЛОВСКИЙ, М.Р. БУТАЕВ, Я.К. СКАСЫРСКИЙ_РАСЧЕТ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdS/ZnSe/ZnSSe С ЗОННОЙ ДИАГРАММОЙ 2-ГО ТИПА.....	274
<b>Секция УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>275</b>
Т.В. КУЛЕВОЙ_КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ DARIA.....	276
Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ В.П. ЛАДЫГИН, Е.М. СЫРЕСИН_РАССМОТРЕНИЕ АДАПТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ПОИСКА ЭДМ.....	277
В.С.ДЮБКОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ_ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКЕ НА ОБРАТНОМ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЯНИИ В НИЯУ МИФИ.....	278
В.С. ДЮБКОВ_МАСШТАБИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СИНХРОТРОНА СИЛА.....	279
М.А. ГУСАРОВА, В.И. КАМИНСКИЙ, М.В. ЛАЛАЯН, С.В. МАЦИЕВСКИЙ_ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИХ ИНТЕГРАЦИИ С СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ПРОГРАММНЫМИ КОДАМИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ .....	280
Д.М. ПОПОВ, М.Ф. БЛИНОВ, В.А. ВОСТРИКОВ_ДИНАМИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА СИНХРОТРОНА С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.....	281

Ж.Л. МАЛЬЦЕВА, С.А. МЕЛЬНИКОВ, И.Н. МЕШКОВ, А.С. СЕРГЕЕВ, А.А. ЧЕРЕВКО ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ЗАРЯД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ.....	282
М.В. ВЛАДИМИРОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ_УЧЕТ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ЗАРЯДА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СЛОЯ ФОТОКАТОДА.....	283
С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, А. АКСЕНТЬЕВ, Ю. СЕНИЧЕВ, А. МЕЛЬНИКОВ, В. ЛАДЫГИ, Е. СЫРЕСИН_ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАНАЛОВ ВУРАСС В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПУЧКАМИ ПО ПОИСКУ ЭДМ .....	284
А.А. МЕЛЬНИКОВ, Н.Н. НИКОЛАЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ, С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЧ СПИН- РОТАТОРА .....	285
Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, Р.А. ОСИН, В.С. ДЮБКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ИОНОВ КИСЛОРОДА В РЕГУЛЯРНОЙ СЕКЦИИ УСКОРИТЕЛЯ - ИНЖЕКТОРА НА ЭНЕРГИЮ 7,5 МЭВ/НУКЛОН.....	286
К.С. САГАН_ДИНАМИКА ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ КОМПАКТНОГО МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ.....	287
К.Р. ЖИТНИКОВ, А.А. ТИЩЕНКО_РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОЛЕТЕ ЗАРЯДА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ СРЕДЫ .....	288
Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН_МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ В ТЕСТОВОЙ СЕКЦИИ ИНЖЕКТОРА КОЛЛАЙДЕРА NICA .....	289
С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, А. АКСЕНТЬЕВ, Ю. СЕНИЧЕВ, А. МЕЛЬНИКОВ_СПИНОВАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ И БЕТАТРОННАЯ ХРОМАТИЧНОСТЬ ДЕЙТРОННОГО ПУЧКА В РЕЖИМЕ КВАЗИЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА .....	290
А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН, О.В. ОГОРОДНИКОВА, П.А. ФЕДИН МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СПЛАВЕ ВОЛЬФРАМА W- 10Cr С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ .....	291
А.П. СКРИПНИК, Д.С. СТЕПАНОВ, Н.В. ВАРЛАМОВ, М.А. ГОРБУНОВ, В.И. КОРОТЕЕВ, В.К. ШИЛОВ_ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ИСТОЧНИКА ИОНОВ БАЯРДА-АЛЬПЕРТА ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ .....	292
Г.П. АВЕРЬЯНОВ, В.В. ДМИТРИЕВА_ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ВЫХОДНОМУ СИГНАЛУ В МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ.....	293
А.В. БОГДАНОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, А.А. ГОЛУБЕВ, Н.С. ШИЛКИН, В.Б. МИНЦЕВ_РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ НА ЭНЕРГИЮ ПУЧКА 200 МЭВ .....	294
П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. ЗИЯТДИНОВА, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН, Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ_ДВОЙНОЙ ПУЧОК НА УСТАНОВКЕ	

ТИПР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ .....	295
А.П. СКРИПНИК, Д.С. СТЕПАНОВ, Н.В. ВАРЛАМОВ, М.А. ГОРБУНОВ, В.И. КОРОТЕЕВ, В.К. ШИЛОВ_КОРОТКИЙ ФРОНТ ИОННОГО ТОКА ИСТОЧНИКА БАЯРДА-АЛЬПЕРТА ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ .....	296
П.В. ФЕДОРЕЦ, П.В. БАЛАНУЦА, А.С. ГЕРАСИМОВ, А.А. ГОЛУБЕВ, Л.Н. ГУСЕВ, А.Г. ДОЛГОЛЕНКО, А.В. КАНЦЫРЕВ, В.И. КАРАСЕВ, Н.М. КРИСТИ, Е.М. ЛАДЫГИНА, С.А. МАКАГОНОВ, В.А. ПАНЮШКИН, А.Н. ПАНЮШКИНА, И.А. ТАРАСЕНКО, А.Б. ХАЛЯВИН_КРИОГЕННАЯ КОРПУСКУЛЯРНАЯ КСЕНОНОВАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ЛИТОГРАФИИ.....	297
А.А. БАЛДИН, В.В. КОБЕЦ, В.В. БЛЕКО, Н.В. ЧЕРНЕГА, М.А. КАРПОВ, С.Ф. УМАНСКАЯ, М.А. ШЕВЧЕНКО, Т.В. МИРОНОВА, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, Н.А. КЛЕОПОВА, М.В. ТАРЕЕВА_ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200.....	298
В.В. ПАРАМОНОВ_ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ SDTL .....	299
Л.Ю. ОВЧИННИКОВА, В.В. ПАРАМОНОВ_МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЧ СИГНАЛА В TW СТРУКТУРЕ УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ .....	300
А.А. КУЛИКОВ, А.О. МОРОЗОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО_МАГНЕТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ИНВЕРТОРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ.....	301
И.В. РЫБАКОВ, В.В. ПАРАМОНОВ_ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ СТРУКТУРЫ SDTL СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ.....	302
К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ_ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКИ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЭЦР-ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ .....	303
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ_ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСКОРИТЕЛЮ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ИМПУЛЬСА К ИМПУЛЬСУ .....	304
А. СУХОЦКИЙ, Г. ВОЛЫНЕЦ, Е. ГУРНЕВИЧ, Д. БЫЧЕНОК, М. ЛАЛАЯН, М. ГУСАРОВА, С. ПОЛОЗОВ_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛУВОЛНОВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ.....	305
А.О. ГРЕБЕШКОВ, С.Н. АНДРЕЕВ, А.Л. СИТНИКОВ, А.И. СЕМЕННИКОВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ, Т.В. КУЛЕВОЙ_МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА DARIA .....	306
А.А. ГОРЧАКОВ, Я.В.ШАШКОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПИКОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ .....	307

А. А. БАТОВ, Р.А. ЗБРУЕВ, М.В. ЛАЛАЯН, С.М. ПОЛОЗОВ_КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК БИПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ .....	308
Д.А. БАЛЮК, И.Р. КАЛИЕВА_ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	309
Н.Ф. ДРЕБЕЗОВА, А.А. ТУМАНОВА_РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ УРОВНЕЙ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В РЕЗОНАТОРЕ-БАНЧЕРЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ.....	310
Д.А. БАЛЮК, Н.Ф. ДРЕБЕЗОВА, И.Р. КАЛИЕВА, А.А. ТУМАНОВА_ВОЛНОВОДНЫЙ ПЕРЕХОД-АДАПТЕР ДЛЯ ВЫХОДНОГО ПОРТА.....	311
А.С. СУЛИМОВ_ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ В СТРУКТУРАХ ИИ ТИПА НА ДИНАМИКУ ЧАСТИЦ .....	312
Д.А. БАЛЮК, И.Р. КАЛИЕВА_ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОГО РЕЗОНАТОРА-ДЕБАНЧЕРА.....	313
М.С. ДМИТРИЕВ, А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ (ЛЕВТ) .....	314
Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ_ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭЦР-ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ С РЕЗОНАНСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ .....	315
Б.В. ГОЛОВЕНСКИЙ, К.А. ЛЕВТЕРОВ, А.А. МАРТЫНОВ, В.А. МОНЧИНСКИЙ, В.В. МЯЛКОВСКИЙ_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ND-YAG ЛАЗЕРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИОНОВ $C^{4+}$ И $FE^{14+}$ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ СЕАНСАХ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА NICA .....	316
А.Ю. БОЙЦОВ, Е.А. БУТЕНКО, Е.Е. ДОНЕЦ, Д.Е. ДОНЕЦ, Н.А. МАЛЫШЕВ, Д.О. ПОНКИН, А.Ю. РАМЗДОРФ, Д.Н. РАССАДОВ, В.Б. ШУТОВ_РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-СТРУННОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ КРИОН 6Т .....	317
Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, В.И. НИКОЛАЕВ, Г.Н. КРОПАЧЁВ, Т.В. КУЛЕВОЙ_РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ .....	318
Е.С. МАТЮХАНОВ, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН, М.С. НОВИКОВ, А.В. ШЕМЧУК, Е.Н. ИСКОРНЕВ, А.В. МЕРКУРЬЕВ, В.М. ДРОБИН, Г.Л. ДОРОФЕЕВ, Д.О. ПОНКИН, В.А. КАШИРИН, А.В. РЯБОВ, Я.Ю. ВЕКЛИЧЕВ, И.А. РУДНЕВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ РАЗРАБОТКА ВТСП КАБЕЛЕЙ НУКЛОТРОННОГО ТИПА В ОИЯИ .....	319
А.В. ЗИЯТДИНОВА, П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ_МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ТРАНСПОРТНОГО КАНАЛА «ВТОРОГО ПУЧКА» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	320
Н.Ю. САМАРОКОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КАТОДНОГО ЭЛЕКТРОДА.....	321
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ_РАЗРАБОТКА БЛОКА ПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА ДЛЯ ЭЦР ИОННОГО ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,46 ГГц .....	322

М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, О.А. ИВАНОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ.....	323
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, А.С. КРАСНОВ_РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ .....	324
А.А. ЛОСЕВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ, Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, А.В. ЗИЯТДИНОВА_ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ И-4.....	325
Т.Р. ДЕРБЫШЕВА, Е.И. АНТОХИН_ГИБРИДНАЯ КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ DTL ЛИНАКА .....	326
А.А. МАЛЫШЕВ, П.А. ФЕДИН, В.С. СКАЧКОВ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ ИДЕОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ CST-МОДЕЛИ РАЗДАТОЧНОГО МАГНИТА ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA .....	327
<b>Секция ДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.....</b>	<b>328</b>
С. В. БОГОМОЛОВ_ОСНОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧАСТИЦ .....	329
В.А. ШАРГАТОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И РАЗГОНА ФРАГМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	330
А.Р. КАСИМОВ, А.Ю. ГОЛДИН_УПРОЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ВДЕТОНАЦИЮ .....	331
О.П. СТОЯНОВСКАЯ_ГИБРИДНЫЙ МЕТОД SPH-IDIC ДЛЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СРЕД С РАЗНОМАСШТАБНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	332
М.Н. ДАВЫДОВ, О.П. СТОЯНОВСКАЯ, Т.А. САВВАТЕЕВА, В.Н. СНЫТНИКОВ РЕГУЛЯРНЫЙ РАЗЛЕТ ГАЗОВОГО ШАРА В ВАКУУМ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ SPH .....	333
Г.Д. РУБЛЕВ, С.А. ДЬЯЧКОВ, А.Н. ПАРШИКОВ_МЕТОД MUSCL-SPH ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЯЗКИХ И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД .....	334
С.А. ДЬЯЧКОВ, С.Ю. ГРИГОРЬЕВ, Р.В. МУРАТОВ, С.А. МУРЗОВ, Г.Д. РУБЛЕВ ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА PURNIA ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ МНОГОМАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЫ .....	335
С.А. МУРЗОВ, А.Н. ПАРШИКОВ, С.А. ДЬЯЧКОВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ_МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО ПОДВИЖНОГО ОКНА НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН .....	336
С.Ю. ГРИГОРЬЕВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ_ДЕФОРМАЦИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА.....	337
Р.В. МУРАТОВ, С.А. ДЬЯЧКОВ_ЕДИНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CPU И GPU .....	338
М.А. БУБНОВ_ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОТКЛИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВЫХ И БЕССЕТОЧНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ.....	339

О.В. КРАВЧЕНКО, О.А. АЗАРОВА_МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ .....	340
А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В. ОНУФРИЕВ_ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕРОДА И ГАДОЛИНИЯ ПРИ БЫСТРОМ (5 $\mu$ S) НАГРЕВЕ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ОБЪЕМА.....	341
П.А. ВЛАСОВ, В.Н. СМИРНОВ, А.Р. АХУНЬЯНОВ, Э. БУЗИЛЛО, Д.И. МИХАЙЛОВ, Г.Л. АГАФОНОВ, В.А. ПОЛЯНСКИЙ, И.Л. ПАНКРАТЬЕВА_ОБРАЗОВАНИЕ МОЛЕКУЛ АЦЕТИЛЕНА И ЧАСТИЦ САЖИ ПРИ ПИРОЛИЗЕ СМЕСЕЙ БЕНЗОЛА И СМЕСЕЙ ЭТИЛЕНА С МЕТАНОМ И ПРОПАНОМ ЗА ОТРАЖЕННЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И КИНЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ .....	342
С. М. ФРОЛОВ, В. С. ИВАНОВ, Ф. С. ФРОЛОВ, П. А. ВЛАСОВ_САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В СФЕРИЧЕСКОМ ДИФУЗИОННОМ ПЛАМЕНИ .....	343
С.К АГАФОНОВ_РАСЧЁТ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ ПО КРИВОЙ ВЕЙБУЛЛА-ОДИНГА.....	344
А.А. НИКИФОРОВ, Ю.В. БАТЬКОВ, В.А. ПУШКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИТА И БЕТОНА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА .....	345
В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ_ИЗУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА .....	346
Т.О. СКЛЯДНЕВА, А. НЕМЫГИН, Ю.В. БАТЬКОВ, А.М. ПОДУРЕЦ, В.Г. СИМАКОВ, А. ТЕРЕШКИНА, М.И. ТКАЧЕНКО, И.Р. ТРУНИН, Е.Е ШЕСТАКОВ_ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ .....	347
С.И. СУМСКОЙ, Р.ХАБИБ_РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЕГО С ВЕЩЕСТВОМ .....	348
В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ .....	349
А.М. ТЕРЕЗА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, С.В. ХОМИК, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА, А.С. БОДНАРЬ_АНАЛИЗ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА, ПОЛИЭТИЛЕНА И АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН .....	350
К. А. БЫРДИН, С. М. ФРОЛОВ, П.А. СТОРОЖЕНКО_ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ AL- И В-СОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОЗДУХЕ, УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ И ВОДЯНОМ ПАРЕ .....	351
И. О. ШАМШИН, В. С. ИВАНОВ, В. С. АКСЁНОВ, П. А. ГУСЕВ, С. М. ФРОЛОВ_ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО РАСШИРЕНИЯ НА ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В УЗКИХ ЩЕЛЕВЫХ ЗАЗОРАХ .....	352
И. О. ШАМШИН, В. С. АКСЁНОВ, В. С. ИВАНОВ, С. М. ФРОЛОВ_ИОНИЗАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	353



И. О. ШАМШИН, М. В. КАЗАЧЕНКО, В. С. АКСЁНОВ, П. А. ГУСЕВ, С. М. ФРОЛОВ КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ ДЛЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СПИРАЛЕВИДНЫХ ТРУБАХ ОКОЛОПРЕДЕЛЬНОГО ДИАМЕТРА.....	354
А.С. СИЛАНТЬЕВ, И.А. САДЫКОВ, В.А. СМЕТАНЮК, Ф.С. ФРОЛОВ, С.М. ФРОЛОВ, Я.К. ХАСЯК, А.Б. ВОРОБЬЁВ, А.В. ИНОЗЕМЦЕВ, Я.О. ИНОЗЕМЦЕВ_ВЛИЯНИЕ РАСХОДА УЛЬТРАПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ПАРОВУЮ ГАЗИФИКАЦИЮ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ.....	355
П.С. КУЛЕШОВ, С.И. МИКОЛУЦКИЙ_МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРЕЛЬЕФА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ.....	356
В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА_О ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО НИТРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ.....	357
А.В. ИВЧЕНКО, АА. МЕЛЬНИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗО-ФАЗНОГО НАНЕСЕНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЧАСТОТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА.....	358
Д.В. АЛЯБЬЕВ_СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГЕОМЕТРИИ ФУЛЛЕРЕНА C <sub>60</sub> МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ.....	359
С.А. ГУБИН, А.В. КУДИНОВ, Ю.А. БОГДАНОВА, М.Ш. КУРБАНОВ, И.В. МАКЛАШОВА__ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ОБЛАСТИ ИОНИЗАЦИИ.....	360
А.А. ЕГОРОВ, Ю.А. БОГДАНОВА__СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СВОЙСТВ ПЕРЕНОСА ГАЗОВЫХ СИСТЕМ.....	361
А.Д. ТРОФИМОВА, П.В. ЧИРКОВ_РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕДИ.....	362
А.М.КИРСАНОВА, С.И. СУМСКОЙ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ С БОЛЬШИМИ ЧИСЛАМИ ФРУДА.....	363
К.С. ПАНИН, В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ_ВЛИЯНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗА НА СОСТАВ ПРОДУКТОВ ПАРЦИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	364
Т. И. ЭЙВАЗОВА, И. В. МАКЛАШОВА_ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ НМХ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ.....	365
БЕКБОСЫНОВА С.О__ВЛИЯНИЕ Н-ДОПИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКИХ СИСТЕМ .....	366
К.А. БОЯРСКИХ, К.В.ХИЩЕНКО_УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕДИ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ–ПАР.....	367
Н.Н. СЕРЕДКИН, К.В. ХИЩЕНКО_МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ Au–Ge ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ .....	368

<b>Секция ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.....</b>	<b>369</b>
М.И. БАБИЧ, Р.Ф. ИБРАГИМОВ_ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ЗАМЕДЛЕНИЯ И ДИФФУЗИИ НЕЙТРОНОВ В ВОДЕ АКТИВАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ.....	370
Н.О. БЛОХИН, Е.В. РЯБЕВА, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, О.В. ЧАКИЛЕВ_НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА В ОБРАЗЦЕ .....	371
С.В. ГАВРИШ_ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗРЯДОМ В ПАРАХ СМЕСЕЙ ЦЕЗИЯ С ДРУГИМИ МЕТАЛЛАМИ.....	372
А.П. ДЕНИСЕНКО, В.А. КУГАВДА_МЕТОД ОЦЕНКИ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА $ZnS+{}^6LiF$ .....	373
С.В. КОЛЕСНИКОВ, И.С. ЛЕВЦОВ, А.П. ДЕНИСЕНКО_АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ ДОЗИМЕТРА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА $ZnS+{}^6LiF$ .....	374
Д.В. ЛУНЕВ, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО_ОЦЕНКА МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТОПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ .....	375
Е.Э. ЛУПАРЬ, И.В. УРУПА, Е.В. РЯБЕВА_ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ МАКЕТА МНОГОКАНАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЗАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ.....	376
А.А. МАМОНОВ, К.М. ГУТОРОВ_АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ .....	377
А.А. МАТВЕЕВ, С.П. МАСЛЕННИКОВ, В.М. САБЛИН_ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В МОЩНОМ МНОГОЛУЧЕВОМ КЛИСТРОНЕ С УЧЕТОМ СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....	378
М.Ю. МИШИН, Р.Ф. ИБРАГИМОВ, Е.В. РЯБЕВА_ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ В АМПЛИТУДНОМ МЕТОДЕ.....	379
О.А. МОРОЗОВ, А.О. МОРОЗОВ, В.П. ТРЕБУХ, А.В. ПРОКОПЕНКО_РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	380
Н.А. ХАЛИМОВ_САМОСБОРКА УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА.....	381
Д.И. ЮРКОВ, В.А. ЛАВРЕНИН, Б.Д. ЛЕМЕШКО, Ю.В. МИХАЙЛОВ, И.А. ПРОКУРАТОВ_ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА БАЗЕ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ .....	382
<b>Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ .....</b>	<b>383</b>
М.Л. ГОРЕЛИК, Б.А. ТУЛУПОВ, Ш. ШЛОМО, М.Г. УРИН_О СВОЙСТВАХ ИЗОСКАЛЯРНЫХ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ.....	384



Н.Н. АРСЕНЬЕВ, А.П. СЕВЕРЮХИН_ИЗОСКАЛЯРНЫЙ ГИГАНТСКИЙ МОНОПОЛЬНЫЙ РЕЗОНАНС В ИЗОТОПАХ Ca.....	385
В.И. БОНДАРЕНКО, М.Г.УРИН_ОПИСАНИЕ ЗАРЯДОВО-ОБМЕННЫХ ГИГАНТСКИХ СПИН-ДИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ В РАМКАХ ЧАСТИЧНО-ДЫРОЧНОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	386
А.П. СЕВЕРЮХИН_ДВОЙНОЙ ГАММА-РАСПАД КВАДРУПОЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ ОЛОВА.....	387
П. И. ВИШНЕВСКИЙ_ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ.....	388
Е. В. МАРДЫБАН, Е. А. КОЛГАНОВА, Т. М. ШНЕЙДМАН, Р. В. ДЖОЛОС_ЭВОЛЮЦИЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ЦЕПОЧКЕ ИЗОТОПОВ ZR.....	389
В. О. НЕСТЕРЕНКО, М. А. МАРДЫБАН, П.-Г. РЕЙНХАРД, А. РЕПКО_ПОВЕДЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ В СИЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЯДРАХ $^{24}\text{Mg}$ И $^{20}\text{Ne}$ .....	390
Е. В. СКИРДОВА, Н. С. ВОРОНОВА_УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ БОЗЕ-ГАЗОВ СО СТЕПЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ.....	391
Ф. А. ШАБУНИН, Н. С. ВОРОНОВА_ОПТИЧЕСКИЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ.....	392
В. А. МАСЛОВА, Н. С. ВОРОНОВА_ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГИБРИДИЗОВАННЫХ ЭКСИТОНОВ В БИСЛОЯХ $\text{MoS}_2$ .....	393
А. ГРУДИНИНА, М. ЭФТИМИО-ЦИРОНИ, В. АРДИЦЦОНЕ, Д. САНВИТТО, Н. ВОРОНОВА_ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОГО КОНДЕНСАТА В СВЯЗАННОМ СОСТОЯНИИ В КОНТИНУУМЕ.....	394
М. А. ПОСАЖЕНКОВ, Н. С. ВОРОНОВА_ЭФФЕКТЫ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И САМОЛОКАЛИЗАЦИИ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОМ БОЗЕ-КОНДЕНСАТЕ.....	395
А. Б. КУКУШКИН, А. А. КУЛИЧЕНКО_ПРОГУЛКИ ЛЕВИ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ НЕЛОКАЛЬНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ.....	396
А. М. НИКИШИН, Г. С. БИСНОВАТЫЙ-КОГАН_УСТРАНЕНИЕ ХАББЛОВСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ И МАТЕРИИ В СОВРЕМЕННОЙ ВСЕЛЕННОЙ.....	397
В. В. ВЕДЕНЯПИН, Н. Н. ФИМИН, В. М. ЧЕЧЕТКИН_О ВЫВОДЕ ТЕНЗОРА ЭНЕРГИИ-ИМПУЛЬСА И УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ГРАВИТАЦИИ ИЗ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ.....	398
Н. Н. ФИМИН, В. М. ЧЕЧЕТКИН_К ВОЗМОЖНОСТИ ОПИСАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ГРАВИТАЦИОННО-СВЯЗАННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ УРАВНЕНИЯ ВЛАСОВА-ПУАССОНА.....	399
Б. К. НОВОСАДОВ_О МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ ПРИ ПОМОЩИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ.....	400
В. П. ЯКОВЛЕВ , С. В. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ, Д. С. ЧУЧЕЛОВ_ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ РЕЗОНАНСНЫХ АТОМОВ С ЧАСТИЦАМИ БУФЕРНОГО ГАЗА НА ФОРМУ ВНУТРИДОПЛЕРОВСКОГО РЕЗОНАНСА.....	401

Е. Е. ГОРОДНИЧЕВ, Д. Б. РОГОЗКИН_ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ВКЛАД В ОПТИЧЕСКИЙ КОНДАКТАНС ФАРАДЕЕВСКОЙ СРЕДЫ .....	402
А. Н. ХОПЁРСКИЙ, А. М. НАДОЛИНСКИЙ, О. Б. АНДРЕЕВА, Р. В. КОНЕЕВ_ДВОЙНОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ РАССЕЙАНИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОНА ГЕЛИОПОДОБНЫМ АТОМНЫМ ИОНОМ .....	403
Д. И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО_КОЛЛЕКТИВНЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В АТОМАХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНАХ .....	404
Ю. К. ГАГАРИН, Ф. А. КОРНЕЕВ_ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦЫ В ПРИСУТСТВИИ ПОСТОЯННОГО ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	405
Е. Е. ПЕГАНОВ, С. В. ПОПРУЖЕНКО_ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО БИХРОМАТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ГАЗОВОЙ МИКРОМИШЕНЬЮ.....	406
О. Е. ВАЙС, М. Г. ЛОБОК, В. Ю. БЫЧЕНКОВ.....	407
УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА .....	407
Д. А. ГОЖЕВ, О. Е. ВАЙС, С. Г. БОЧКАРЕВ, М. Г. ЛОБОК, В. Ю. БЫЧЕНКОВ.....	408
НЕКОГЕРЕНТНОЕ СИНХРОТНОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ БЛУЖДАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИКРОКЛАСТЕРНУЮ СРЕДУ .....	408
Е. О. ДМИТРИЕВ, Н. Д. БУХАРСКИЙ, Ф. А. КОРНЕЕВ_ОСОБЕННОСТИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДНЫХ ТОКОВ В КОЛЬЦЕВЫХ МИШЕНЯХ .....	409
А. В. БЕРЕЗИН, А. М. ФЕДОТОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ПО ДЕТЕКТИРОВАНИЮ ФОТОН-ФОТОННОГО РАССЕЙАНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ФОКУСИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ .....	410
А. А. НИКОЛАЕВ, В. Н. АЗЯЗОВ_КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ 1-АМИНОЭТАНОЛА С АЦЕТАЛЬДЕГИДОМ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	411
<b>Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ .....</b>	<b>412</b>
Д. В. БОРТКО, В. А. ШИЛОВ, О. С. ВАСИЛЬЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОКЛАСТЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДА ТАНТАЛА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ .....	413
Н. В. МОРОЗОВ, К. Е. ЛАХМАНСКИЙ, Л. А. АКОПЯН, О. Ю. ЛАХМАНСКАЯ КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР НА ХОЛОДНЫХ ИОНАХ КАЛЬЦИЯ-40 .....	414
А. В. БИБИКОВ, А. В. НИКОЛАЕВ, И. В. БОДРЕНКО, П. В. БОРИСЮК Е. В. ТКАЛЯ РАЗЛИЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АТОМОВ БОРА В ЭКЗОЭДРАЛЬНОМ И ЭНДОЭДРАЛЬНОМ Фуллерене C <sub>60</sub> .....	415
Д. О. ТРЕГУБОВ, А. А. ГОЛОВИЗИН, Д. А. МИШИН, Д. И. ПРОВОРЧЕНКО, М. О. ЯУШЕВ, К. Ю. ХАБАРОВА, В. Н. СОРОКИН, Н. Н. КОЛАЧЕВСКИЙ ПРЕИМУЩЕСТВА НЕЧУВСТВТЕЛЬНОГО К ОКРУЖЕНИЮ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ЧАСАМИ НА АТОМАХ ТУЛИЯ.....	416

БОРИСЮК П.В, БУХАРСКИЙ Н.Д., ТЕЛЬНОВ Е.Ю., ТРИЧЕВ К.К., ЧЕРЕПАНОВ П.А. УВЕЛИЧЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИОНОВ ПОПАДАЮЩИХ В АППЕРТУРУ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКОЙ ПАУЛИ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПО СРЕДСТВОМ ФОКУСИРОВАНИЯ АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ .....	417
Т. СОЛАРЕВИЧ, П.В. БОРИСЮК, Т. М. КОРМИЛИЦЫН_ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДМНП ИТЭР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ Д-Д И Д-Т НЕЙТРОНАМИ .....	419
В.А. ШИЛОВ, Д. В. БОРТКО, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА НА КРЕМНИИ .....	420
А.П. ВЯЛЫХ, А.В. СЕМЕНКО, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ, Д.В. СУТЫРИН_ПЕРВИЧНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АТОМОВ ИТТЕРБИЯ В МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ.....	421
К.П. ГАЛСТЯН, И.В. ЗАЛИВАКО, А.С. БОРИСЕНКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, Н.В. СЕМЕНИН, М.Д. АКСЕНОВ, А.Е. КОРОЛЬКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ_РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ НА ИОНАХ ИТТЕРБИЯ-171 .....	422
П.М. ГУНИН, С.С. ДОНЧЕНКО__РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МАКЕТА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО УГЛОМЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССОГЛАСОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ МЕЖСПУТНИКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА КОСМИЧЕСКОЙ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ .....	423
<b>Секция СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>426</b>
П.В. КОНАРЕВ, В.В ВОЛКОВ_РАЗДЕЛЕНИЕ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ВКЛАДОВ В ИНТЕСИВНОСТЬ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ДВУХ КОНФОРМАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ ФЕРМЕНТА 3-ИЗОПРОПИЛМАЛАТ ДЕГИДРОГЕНАЗЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЙ КОЛОНКИ.....	427
С.В. АМАРАНТОВ__ВЫБОР СТАРТОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ ДЛЯ ИХ РАСЧЕТА ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ.....	428
В.И. АККУРАТОВ, А.Г. КУЛИКОВ, Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ, А.Е. БЛАГОВ_IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА РЕНТГЕНДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ .....	429
Г.С. ПЕТЕРС, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ, М.А. МАРЧЕНКОВА, К.Б. ИЛЬИНА, А.Е. СУХАНОВ, Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ_МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНЦИИ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ «БИОМУР» НА КУРЧАТОВСКОМ ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	430
Р.М. МЕНШАРАПОВ, Н.А. ИВАНОВА, Д.Д. СПАСОВ, А.А. ЗАСЫПКИНА, Е.А. СЕРЕГИНА, М.В. СИНЯКОВ, В.Н. ФАТЕЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАТИНОВЫХ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ МЕТОДОМ EXAFS-СПЕКТРОСКОПИИ .....	431

А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ, Л.П. СУХАНОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖАЙШЕЙ КООРДИНАЦИОННОЙ СФЕРЫ ЖЕЛЕЗНОГО ЦЕНТРА В МОЛЕКУЛЕ ОКСИГЕМОГЛОБИНА С ПОМОЩЬЮ XANES-СПЕКТРОСКОПИИ.....	432
А.А. СЕРЕГИН, О.В. ЧЕРНЫШЕВА, А.В. ШЕЛЯКОВ, Н.Н. СИТНИКОВ, К.А. БОРАДАКО_ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СПЛАВОВ TiNiCuS ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕДИ.....	433
С.В. РОГОЖКИН, А.В. КЛАУЗ, А.А. ХОМИЧ, А.А. БОГАЧЁВ, А.А. НИКИТИН, А.А. ЛУКЪЯНЧУК, О.А. РАЗНИЦЫН, А.С. ШУТОВ, Н.А. ИСКАНДАРОВ, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ, Ю.Е. ГОРШКОВА, Г.Д. БОГУЧАВА_КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ .....	434
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, Б.Р. ГАЙНАНОВ, О.В. ЧЕРНЫШЁВА, А.А. ИВАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ, Н.А. КОЛЫШКИН, Е.В. ХРАМОВ, Я.В. ЗУБАВИЧУС, И.В. ЩЕТИНИН, Н.А. ЦАРЕНКО, Н.В. ОГНЕВСКАЯ_ЗАВИСИМОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ (Pr <sub>1-x</sub> Yb <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ОТ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА .....	435
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, А.А. ИВАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ, Е.С. КУЛИКОВА, И.В. ЩЕТИНИН, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ, С.М. НОВИКОВ, В.С. ВОЛКОВ_ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДОВ Ln <sub>2</sub> M <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (Ln = La-Yb, Y; M = Ti, Zr, Ce).....	436
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, Ф.Э. ДУБЯГО, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, Б.Р. ГАЙНАНОВ, А.А. ИВАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ, Е.С. КУЛИКОВА, Н.А. КОЛЫШКИН, Е.В. ХРАМОВ, Я.В. ЗУБАВИЧУС, И.В. ЩЕТИНИН, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ, С.М. НОВИКОВ, В.С. ВОЛКОВ, Н.А. ЦАРЕНКО, Н.В. ОГНЕВСКАЯ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ, ЛОКАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ХРОМИТОВ LnCrO <sub>3</sub> .....	437
Д.Д. МИЩЕНКО М.В. АРАПОВА, А.Н. ШМАКОВ_СТРУКТУРА И ФАЗОВАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЛАНТАН-ЗАМЕЩЕННОГО НИКЕЛАТА ПРАЗЕОДИМА, СИНТЕЗИРОВАННОГО С МОДИФИКАЦИЯМИ СИНТЕЗА ПЕКИНИ .....	438
В.А. ГРИГОРЬЕВ, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ_ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ РЫХЛОСТИ И РАЗРЫВНОСТИ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ СПИРАЛЕВИДНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ ПО МАЛОУГЛОВЫМ ДАННЫМ МОДИФИЦИРОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ «ИМИТАЦИИ ОТЖИГА» .....	439
Й. ШМАЙСНЕР, А.Н. ТЮЛЮСОВ_РАСЧЕТ КРИВОЙ КАЧАНИЯ ДВУХКРИСТАЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИХ КРИСТАЛЛАХ InSb В ГЕОМЕТРИИ ЛАУЭ-ЛАУЭ .....	440

**Секция  
ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– к.ф.-м.н., доцент  
Петровский Виктор Николаевич

Секретарь секции

– к.ф.-м.н.,  
Губский Константин Леонидович

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

Д. В. ПАНОВ, И. В. ШИШКОВСКИЙ  
*Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ НА МОРФОЛОГИЮ И ГЕОМЕТРИЮ ОДИНОЧНЫХ ТРЕКОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПЕРЕПЛАВЛЕНИИ СТАЛИ 316L**

В работе приведены результаты исследования влияния содержания серы на морфологию и геометрию одиночных треков с различной мощностью при лазерном переплавлении поверхности. На основе данных о топографии поверхности выделены различные режимы поверхностного переплавления. Получены экспериментальные результаты высокоскоростной съемки динамики ванны расплава при переплавлении одиночных треков. На их основе оценена деформация поверхности ванны расплава.

D.V. PANOV, I.V. SHISHKOVSKY  
*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

## **EFFECT OF SULPHUR CONCENTRATION ON SURFACE MORPHOLOGY AND GEOMETRY OF SINGLE-TRACK LASER SURFACE REMELTING 316 STAINLESS STEEL**

In the presented work, the effect of sulphur concentration on surface morphology and geometry of single tracks with different laser power is considered. Different surface melting regimes are highlighted based on the surface morphology data. High Speed videos of the melt pool during the single-track laser remelting was acquired. Comparison between melt pool surface deformation between samples with different sulphur content was done.

Лазерное полирование является перспективной технологией финишной обработки поверхности. Основная цель данного процесса – уменьшения шероховатости поверхности путем локального расплавления и перераспределения материала в зоне расплава. Лазерное полирование позволяет уменьшить шероховатость поверхности до значений  $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ . Однако, достижения такой низкой шероховатости является сложной задачей, требующей оптимизации режимов лазерной обработки. Было замечено, что режим лазерной обработки может варьироваться для сплавов с одинаковым наименованием. Также при лазерном полировании возможно образование паразитных структур таких как: выпуклости, подрезов и чешуйчатости [1].

В работах, связанных с лазерной сваркой показано, что такие дефекты имеют гидродинамическую природу и связаны с наличием эффекта Марангони в ванне расплава. В свою очередь, данный эффект является очень чувствительным к концентрации поверхностно активных веществ. В данной работе проверена гипотеза о наличии связи количества поверхностно активных веществ и морфологией поверхности после лазерного переплавления.

Для проверки гипотезы были изготовлены образцы нержавеющей стали (Hoganas, SS316L) методом прямого лазерного выращивания. Для управления содержанием серы при изготовлении образцов был добавлен порошок в FeS. Далее с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии и газовой инфракрасной спектроскопии измерен общий химический состав и концентрация серы в образцах.

В работе приведены результаты исследования влияния содержания серы на морфологию и геометрию одиночных треков с различной мощностью при лазерном переплавлении поверхности. На основе полученных результатов показаны различные режимы формирования топографии поверхности при лазерном переплавлении. Выделены три зоны одиночного трека, где наблюдаются различные паттерны формирования топографии. Зона начала, конца трека и промежуточная зона. Показана, возможность формирования как кратера, так и выпуклой деформации поверхности в зонах начала и конца одиночной линии и зависимость данного эффекта от концентрации серы. В промежуточной зоне одиночного трека показан переход от инвертированных подрезов к выпуклости в зависимости от мощности. На основе данных высокоскоростной съемки оценена деформация поверхности ванны расплава для одиночных треков при различной концентрации серы.

### *Список литературы*

1. Nüsser, C., Kumstel, J., Kiedrowski, T., Diatlov, A., & Willenborg, E. (2015). Process- and material-induced surface structures during laser polishing. *Advanced Engineering Materials*, 17(3), 268–277. <https://doi.org/10.1002/adem.201400426>

А.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, М.А. МУРЗАКОВ<sup>1</sup>, Н.В. ГРЕЗЕВ<sup>1</sup>, И.Н. ШИГАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТО ИРЭ-Полус, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТАНДЕМ-ДУГОВАЯ СВАРКА ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Представлен способ гибридной лазерной тандем-дуговой сварки тавровых сварных соединений из стали марки 09Г2С толщиной до 16 мм. Проведено сравнение со способом гибридной лазерной сварки с одной сварочной дугой. Показано соотношение погонной энергии дуг и луча при увеличении свариваемой толщины для выбранных оптимальных режимов сварки. Исследована структура и механические свойства полученных тавровых соединений.

A.A. VASILIEV<sup>1</sup>, M.A. MURZAKOV<sup>1</sup>, N.V. GREZEV<sup>1</sup>, I.N. SHIGANOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>NTO IRE-Polus, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

### HYBRID LASER TANDEM-ARC WELDING OF LOW-ALLOY STEEL T-JOINTS

A method for hybrid laser tandem-arc welding of tee welded joints made of 09G2S steel with a thickness of up to 16 mm is presented. A comparison is made with the method of hybrid laser welding with a single welding arc. The ratio of the heat input of the arcs and the beam is shown with an increase in the welded thickness for the selected optimal welding modes. The structure and mechanical properties of the resulting tee joints were studied.

Сочетание высокоэнергетического лазерного источника с дуговым источником позволяет благодаря синергетическому эффекту увеличить проплавление, смягчить термический цикл, стабилизировать горение дуги, а также более эффективно использовать лазерное излучение, исключить необходимость последующей правки деталей, термообработки [1]. Технология гибридной лазерной сварки перспективна для получения надёжных соединений горизонтальных панелей с вертикальными рёбрами жёсткости, но наименее изученными являются тавровые соединения с толщиной стенки более 10 мм [2], ввиду крайне малого проведения исследований из-за необходимости применения лазеров мощностью более 15 кВт.

Технологические работы проводили на роботизированном стенде с волоконным лазером производства ООО НТО "ИРЭ-Полус" с мощностью 30 кВт и двумя сварочными инвертерами Fronius с током до 500А и горелками MIG/MAG. Гибридный процесс реализовывался совмещением в одной сварочной ванне сначала лазерного луча и одной, а затем двух сварочных дуг. Сваривались тавровые соединения пластин из стали 09Г2С толщинами 12 и 16 мм с кромками после лазерной резки.

Критерием выбора оптимальных режимов принималось стабильное формирование сварного шва с плавным переходом катета к основному и формированием обратного валика. На выбранных режимах рассчитана суммарная погонная энергия и определено соотношение погонной энергии тандемной дуги (дуг) и луча. Предположительно увеличение доли погонной энергии сварочной дуги по отношению к лазерному лучу смягчит термический цикл сварки, тем самым уменьшит твердость сварного шва [1].

В экспериментах на тавровых соединениях пластин 12 мм использование второй сварочной дуги позволило увеличить долю погонной энергии дуги с 60 до 73%. Также при увеличении скорости сварки до 1,2 м/мин доля погонной энергии дуги составила 63%, что соответствует соотношениям на режимах с одной дугой.

В экспериментах по гибридной лазерной сварке с двумя дугами на тавровых соединениях пластин 16 мм с увеличением скорости сварки от 1,5 до 2,1 м/мин доля погонной энергии дуги уменьшалась с 60% до 53%, при этом общая погонная энергия снижалась с 1187 кДж/м до 946 кДж/м.

Изучение макрошлифов полученных тавровых швов показало наличие широкой «дуговой» зоны расположенной в лицевой части шва на глубине до 25% от провариваемой стенки тавра и более узкой «лазерной» в корневой части шва (Рис. 1). В широкой части ЗТВ шире по сравнению с узкой частью шва. Более широкая ЗТВ также наблюдается со стороны привариваемой стенки, что свидетельствует о различии в теплоотводе при сварке. На швах получен катет до 7,0 мм, ширина узкой части шва 1,1-1,3 мм.



Рис. 1. Макроструктура тавровых сварных соединений на пластинах толщиной: а) 12 мм; б) 16 мм

При использовании в гибридном процессе двух сварочных дуг на скорости сварки 2,1 м/мин на тавровых соединениях пластин толщиной 12 мм получены сварные швы с твердостью в металле шва не более 291HV, а ЗТВ до 332HV. На тавровых соединениях пластин 16 мм на скорости сварки 2,1 м/мин твердость металла шва выросла до 345HV, а ЗТВ до 366HV, в свою очередь на скорости 1,5 м/мин в ЗТВ твердость не превышала 346HV, что соответствует нормативным значениям, равным 350HV.

Гибридной лазерной тандем-дуговой сваркой на тавровых соединениях пластин из стали 09Г2С получено качественное формирование швов с нормативными значениями твердости при толщине стенки 12 мм на скорости сварки до 2,1 м/мин и при толщине 16 мм на скорости сварки до 1,5 м/мин. При этом доля погонной энергии дугового процесса составляла 60% и выше.

#### Список литературы

1. Churiaque C., Sánchez-Amaya J., Gumenyuk A., Rethmeier M. The effects of HLAW parameters for one side T-Joints in 15 mm thickness naval steel // Metals. 2021. №11. P. 1–19.
2. Unt A. Faber laser and hybrid welding of T-joint in structural steels // Lappeenranta. 2018. 52 p.



М.А. ЗАЙКИНА<sup>1</sup>, Е.А. АВИЛОВА<sup>1</sup>, Е.А. ЕЛТЫШЕВА<sup>1</sup>, Д.А. СИНЕВ<sup>1</sup>,  
А.Ю. ШИШОВ<sup>2</sup>, Е.М. ХАЙРУЛИНА<sup>2</sup>, И. И. ТУМКИН<sup>2</sup>  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ В СРЕДЕ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ**

В рамках настоящей работы была изучена возможность повышения эффективности прямой лазерной записи токопроводящих структур на поверхности полиимида, стеклотекстолита и фторопласта методом лазерно-индуцированного осаждения металлов из глубоких эвтектических растворителей.

М.А. ZAIKINA<sup>1</sup>, Е.А. AVILOVA<sup>1</sup>, Е.А. ELTYSHEVA<sup>1</sup>, D.A. SINEV<sup>1</sup>, V.P. VEIKO<sup>1</sup>,  
A.YU. SHISHOV<sup>2</sup>, E.M. KHAIRULLINA<sup>2</sup>, I.I. TUMKIN<sup>2</sup>  
*ITMO University, St. Petersburg, Russia*  
*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

## **INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF FORMATION CONDUCTING STRUCTURES ON THE SURFACE OF POLYMERIC AND COMPOSITE DIELECTRIC MATERIALS BY THE METHOD OF LASER-INDUCED DEPOSITION FROM DEEP EUTECTIC SOLVENTS**

In this work, we studied the possibility of increasing the efficiency of direct laser writing of conductive structures on the surface of polyimide, fiberglass and polytetrafluoroethylene (PTFE) by laser-induced deposition of metals from deep eutectic solvents.

Согласно тенденции развития электроники, все больший спрос появляется на элементы гибкой электроники. Вследствие этого встает вопрос о создании технологий, обеспечивающих достаточную вариативность, скорость и простоту формирования токопроводящих элементов с достаточной адгезией к поверхности и устойчивостью к деформациям без нарушения целостности структур. В качестве перспективного способа предлагается использовать метод лазерно-индуцированного осаждения из глубоких эвтектических растворителей. Создание структур этим методом не требует использования сложного оборудования или дорогостоящих компонентов, технологии просты в освоении и имеют большой потенциал развития. Перспективным представляется использование осажденных материалов для создания сенсоров, детектирующих элементный состав, а также для локального восстановления разрывов и дефектов в участках электрических цепей. Такой метод имеет потенциал трансфера на любой материал подложки при должном исследовании особенностей осаждения. Предшествующие исследования показывают возможность записи структур, по сопротивлению превышающих сопротивление чистой меди не более чем в два раза. В то же время, стоит вопрос о том, как повысить эффективность формирования треков на поверхности диэлектриков. Также важно определить, какие параметры при переходе от одного материала к другому влияют на итоговый результат осаждения. Настоящая работа посвящена решению этих проблем.

В настоящей работе в качестве источника излучения выступала технологическая лазерная установка МинМар-кер 2 на базе волоконного импульсного Yb-лазера ( $\lambda = 1070$  нм, средняя мощность до 20 Вт). Параметры записываемых структур корректировались с помощью управления значениями регулируемых параметров, а также с помощью корректировки схем нанесения с учетом особенностей используемого растворителя, определенного как оптимальный в предшествующих исследованиях. Для увеличения эффективности формирования структур было предложено использовать предварительную подготовку подложек с целью создания адгезийного рельефа и дополнительных центров осаждения меди. Исследовано осаждение на подложки из фторопласта, стеклотекстолита и полиимида. Также было определено, что основополагающими факторами, влияющими на результат осаждения, являются физико-химические свойства используемой подложки. На результат осаждения влияет то, как именно материал ведет себя при взаимодействии с излучением. Например, расплавляется ли приповерхностный слой подложки, что позволяет повысить адгезию и надежность формируемых структур.

Коллектив авторов благодарит Физико-технический факультет Университета ИТМО за поддержку научных и исследовательских проектов студентов в рамках гранта НИРМА.



В.М. ПРОКОПЬЕВ<sup>1</sup>, Р.Р. СУСЛОВ<sup>1</sup>, И.А. ФИЛАТОВ<sup>1</sup>, Р.И. БОГДАНОВ<sup>2</sup>, С.А.ХУБЕЖОВ<sup>1</sup>,  
Г.В. ОДИНЦОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ, ОБРАЗОВАННОЙ ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ AISI 430

В данной работе исследовалось влияние структурирования наносекундным лазером на стойкость к питтинговой коррозии нержавеющей стали AISI 430. Рассмотрен состав оксидной пленки на поверхности, проведены испытания на уровень защиты от коррозии.

V.M. PROKOPIEV<sup>1</sup>, R.R. SUSLOV<sup>1</sup>, I.A. FILATOV<sup>1</sup>, R.I. BOGDANOV<sup>2</sup>, S.A.  
KHUBEZHOV<sup>1</sup>,  
G.V. ODINTSOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## INVESTIGATION OF ANTI-CORROSION PROPERTIES OF AN OXIDE FILM FORMED BY LASER RADIATION ON THE SURFACE OF AISI 430 STEEL

In this work, we investigated the effect of nanosecond laser structuring on the pitting corrosion resistance of AISI 430 stainless steel. The composition of the oxide film on the surface is considered, tests for the level of protection against corrosion are carried out.

В современном индустриальном мире большое внимание привлекает тема защиты от коррозии. Даже нержавеющая сталь нуждается в дополнительной защите от питтинговой (точечной) коррозии в агрессивных растворах. Традиционные методы защиты, такие как металлические и лакокрасочные [1] покрытия, не всегда бывают эффективны, а также могут оказывать токсичное воздействие на окружающую среду [2]. Поэтому лазерная антикоррозионная защита металлов рассматривается как альтернативное решение. Однако, многие исследования проводятся на дорогостоящем оборудовании и с использованием дополнительных материалов, что затрудняет внедрение метода в промышленность.

Целью нашего исследования является повышение стойкости стали AISI 430 к питтинговой коррозии с помощью широко распространенной в промышленности наносекундной лазерной установки “МиниМаркер-2”. Были подобраны режимы с различными плотностями мощности и процентами перекрытия для определения оптимальных настроек лазерного излучения. Рассматриваются различные физико-химические механизмы, влияющие на степень защиты, такие как образование оксидной пленки и придание гидрофобных свойств поверхности. В процессе работы над темой была выявлена необходимость более подробного изучения состава образующейся под воздействием лазерного излучения оксидной пленки, которая и является основным фактором, обеспечивающим повышение антикоррозионной защиты. По этой причине был проведен XPS-анализ, позволяющий более точно оценить влияние лазерного излучения на фазовый состав поверхности и определить то, как от образовавшихся оксидов зависит стойкость к питтинговой коррозии. Электрохимические коррозионные испытания проводились в водном растворе 3,5% NaCl, шероховатость поверхности определялась с помощью контактного профилометра Hommelwerke T8000. Гидрофобизация поверхности после лазерного структурирования проводилась с помощью низкотемпературного отжига в муфельной печи ПМ-10.

В процессе работы была повышена стойкость к питтинговой коррозии используемой стали. Определено

положительное влияние пленки из оксидов металлов Fe и Cr на защищенность стали. Также был сделан вывод, что образцы, обработанные излучением с меньшей плотностью мощности, показали лучшие результаты из-за негативного влияния шероховатости. Данный эффект объясняется тем, что из-за гомогенного режима смачивания и отсутствия воздушной прослойки на границе раздела при росте шероховатости поверхности растет площадь контакта между подложкой и агрессивной жидкостью.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г., Соглашение № 075-11-2021-045 от 24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения».

### Список литературы

1. Kausar A. Corrosion prevention prospects of polymeric nanocomposites: A review //Journal of Plastic Film & Sheeting. – 2019. Т. 35. – №. 2. – С. 181–202.
2. Raja P. B., Sethuraman M. G. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review //Materials letters. 2008. – Т. 62. – №. 1. – С. 113-116

Е. А. ДАВЫДОВА, И. А. ФИЛАТОВ, М. А. МИХАЛЕВИЧ, А. А. НОВОПАШИН, А.  
ПЕЛЬТЕК, Г. В. ОДИНЦОВА

*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ СПЛАВОВ ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОГО ОБРАСТАНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ**

В данной работе исследовались состояние смачиваемости, уровень адгезии и геометрические параметры структур стали и алюминия для снижения биообрастания материалов. Обработка производилась при помощи структурирования поверхности наносекундным лазерным излучением, в ходе чего были получены гидрофобные структуры, имитирующие листья лотоса и розы. Также на полученных структурах была количественно измерена степень обрастания для исследования наличия противообрастающих свойств.

E. A. DAVYDOVA, I. A. FILATOV, M. A. MIKHALEVICH, A. A. NOVOPASHIN, A. PELTEK,  
G. V. ODINTSOVA

*ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia*

## **INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF LASER RADIATION TO PROTECT ALLOYS FROM UNWANTED FOULING IN AQUEOUS ENVIRONMENT**

In this work, the state of wettability, the level of adhesion and the geometric parameters of steel and aluminum structures were studied to reduce the biofouling of materials. Processing was carried out by structuring the surface with nanosecond laser radiation, during which hydrophobic structures were obtained that imitated lotus and rose leaves. The degree of fouling was also quantitatively measured on the structures obtained to investigate the presence of antifouling properties.

В современной индустрии особый интерес для промышленности представляют поверхности с различным состоянием смачиваемости: как гидрофобные, так и гидрофильные. Одним из актуальных применений вышеупомянутых структур является защита материала от биологического обрастания в водной среде.

В данной работе было рассмотрено влияние лазерного структурирования на возможность снижения степени биообрастания помещенных в воду сплавов. В качестве инструмента обработки был выбран волоконный иттербиевый наносекундный лазерный источник с длиной волны 1064 нм, так как металлы хорошо поглощают излучения на данной длине волны, а также данная лазерная установка является коммерчески доступной. Для оценки морфологии структур и состояния смачиваемости использовались методы оптической микроскопии, профилометрии и метод лежащей капли. С помощью исследования угла скатывания были получены данные о степени адгезии обработанного материала. Количественная степень биообрастания оценивалась с помощью химических индикаторов на основе резазурина и резорурфина. С помощью лазерной записи в работе получены гидрофильные структуры на поверхности сплавов, а также рассмотрены такие дополнительные обработки после лазерного структурирования как: последующий низкотемпературный отжиг на протяжении 4 часов при температуре в 100 С° или выдержка на воздухе 7 недель.

Во время разработки дизайна структур, который представлял собой ортогональные канавки, важно было добиться определенных геометрических параметров получаемых треков. Задачей было максимально приблизиться к геометрическим значениям микроструктур лотоса и розы, а именно, ширине 20–25 мкм и глубине 10–12 мкм для лотоса, ширине 15–20 мкм и глубине 7–10 мкм для розы соответственно. Расстояние между соседними треками было выбрано в диапазоне от 15 до 20 мкм. Также, исходя из того, что в исследовании были рассмотрены организмы размерами от 50 мкм, для исследования зависимости степени биологического обрастания помещенных в воду структур от их геометрических параметров, была создана поверхность со структурой, состоящей из крупных лунок диаметром 90 мкм.

При проведении эксперимента образцы помещались в аквариумы с динамической средой, создаваемой электрическими насосами. Вода для исследований была набрана в Финском заливе, рядом с городом Сосновый Бор [1]. Образцы находились в динамической среде от 1 до 4 недель, после чего их поверхность исследовалась на степень биообрастания, уровень адгезии и состояние смачивания.

После проведенных исследований был сделан вывод, что лазерное структурирование с последующей адсорбцией органических соединений на поверхность материала, приводящей к созданию гидрофобных гидроксильных групп, способно снизить степень биообрастания поверхности материала. Также с помощью лазерной обработки возможно создать наноиерархические структуры с различной адгезией, имитирующие поверхность лотоса и розы.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г., Соглашение № 075–11-2021-045 от 24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения».

### *Список литературы*

1. Поляк Ю. М. и др. Мониторинг Финского залива Балтийского моря: влияние антропогенных факторов на биогеохимические процессы в прибрежной зоне // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29, №. 2. С. 99–117.

## ВОЗМОЖНОСТИ РУЧНОГО ЛАЗЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ТИТАНЕ

Представленная работа направлена на исследование физико-химических свойств оксидных пленок на поверхности титана, сформированных в результате непрерывного лазерного излучения. Полученные результаты лягут в основу работы по созданию устройства для нанесения цветных изображений поверхности металлических изделий в ручном режиме управления.

A.A. MOROZOVA, D.S. POLYAKOV, G.V. ODINTSOVA  
National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia

## POSSIBILITIES OF HAND-HELD LASER DEVICE FOR APPLICATION OF COLOR IMAGES ON TITANIUM

The present work is aimed at studying the physicochemical properties of oxide films on the titanium surface formed as a result of continuous laser radiation. The results obtained will form the basis of the work on the creation of a device for applying color images of the surface of metal products in manual control mode.

Значительный интерес представляет создание специализированного лазерного инструмента для нанесения цветных изображений на поверхности металлов, управление которым выполняется в ручном режиме. Процесс нанесения цвета на поверхность металлов в результате использования данного инструмента обуславливается формированием тонких оксидных пленок на поверхности подложки в результате лазерного воздействия в воздушной среде. Контролируемый процесс создания таких цветных покрытий называется цветной лазерной маркировкой (ЦЛМ). В работе [1] были представлены новые технологические возможности ЦЛМ при использовании режимов лазерного воздействия, позволяющий достигнуть температуры выше температуры испарения. Путем повторного лазерного воздействия на обработанную ранее подложку можно испарить оксидный слой или сформировать оксидную плёнку с отличными оптическими характеристиками. Данные возможности были продемонстрированы на базе иттербиевого волоконного лазерного источника с импульсным режимом работы.

В свою очередь, разрабатываемое устройство должно быть выполнено на основе непрерывного лазерного источника, что позволяет предотвратить самовозбуждение при неизбежном попадании доли отраженного излучения в излучатель [2]. В связи с этим возникает необходимость в исследовании физико-химических свойств оксидных пленок, формируемых в результате непрерывного лазерного воздействия.

В ходе работы были определены оптимальные параметры режимов лазерного воздействия для формирования цветных «линий» на поверхности титана. Полученные образцы были исследованы с помощью оптической микроскопии, спектрофотометрии, сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. По результатам математического моделирования было установлено, что в центре трека достигается температура выше температуры испарения, что позволяет сделать вывод о возможности расширения функциональных возможностей данного инструмента аналогично возможностям ЦЛМ. В рамках работы представлены первичные результаты по разработке технологии нанесения цветного изображения на поверхность металлов специализированным ручным инструментом.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г., Соглашение № 075-11-2021-045 от

24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения»

### Список литературы

1. Veiko V. P. et al. Laser paintbrush as a tool for modern art //Optica. – 2021. – Т. 8. – №. 5. – С. 577-585.
2. Вейко В. П. и др. О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ЛАЗЕРНОЙ МИНИАТЮРЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЛОКАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ //Оптический журнал. – 2020. – Т. 87. – №. 10. – С. 103-109

М.К. ДРОЗДОВ, Н.Д. БУХАРСКИЙ, Ф.А. КОРНЕЕВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННОГО ПУЧКА ПРОТОНОВ ПО СИГНАЛАМ НА РАДИОХРОМНЫХ ПЛЕНКАХ

В данной работе представлен нейросетевой метод восстановления спектров лазерно-ускоренных протонов при помощи диагностической стопки радиоохромных пленок. Описан процесс обучения сети, верификация её работы на основе сравнения восстановленных спектральных распределений с заданными и проведено сравнение с известными алгоритмами, описанными в литературе. Предложенный метод позволяет определять сложные спектральные распределения и облегчает анализ экспериментальных данных для различных существующих и новых схем ускорения частиц.

M.K. DROZDOV, N.D. BUKHARSKII, PH. A. KORNEEV  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## A NEURAL NETWORK METHOD TO RECONSTRUCT THE ENERGY SPECTRUM OF A LASER-ACCELERATED PROTON BEAM FROM SIGNALS ON RADIOCHROMIC FILMS

This paper presents a neural network method for reconstruction of laser-accelerated proton spectra using a diagnostic stack of radiochromic films. The process of training the network, the verification of its work based on the comparison of the recovered spectral distributions with the given ones, and the comparison with the known algorithms described in the literature are described. The proposed method makes it possible to determine complex spectral distributions and facilitates the analysis of experimental data for various existing and new particle acceleration schemes.

Многообразие лазерно-плазменных методов ускорения заряженных частиц, которые описываются различными моделями, в силу сложности внутренних физических процессов, не позволяет рассчитывать пространственно-спектральные характеристики выходных пучков в достаточной степени аккуратно, как, например, это возможно в случае стандартных ускорителей. Радиоохромные пленки являются удобным инструментом для нахождения энергетических характеристик пучков [1], при этом позволяя диагностировать значительную пространственную область и анализировать угловое распределение частиц.

В случае исследования протонных и ионных пучков, часто стопки радиоохромных плёнок обрабатываются в предположении о поглощении в каждом слое только протонов определённой энергии, соответствующей брэгговскому пику. Для более аккуратного восстановления спектров, можно проводить поэтапное восстановление спектра в предположении его гладкости [2]. При наличии достаточного количества слоев радиоохромных пленок, оказывается возможным полноценное восстановление спектра с необходимой точностью.

Известные методы обработки результатов измерений протонной радиографии требуют некоторых предположений о спектрах либо не отличаются высокой точностью. В данной работе предлагается метод восстановления, основанный на использовании машинного обучения, который оказывается намного более универсальным и не требует предположений о спектрах частиц. Кроме того, данный метод отличается высокой скоростью обработки после проведённого машинного обучения, которое выполняется один раз для используемого набора радиоохромных плёнок и фильтров в стопке. На основе предлагаемого метода возможно не только определение спектров положительно заряженных тяжёлых частиц, но и, при дополнительном обучении, определение характеристик электронных и рентгеновских потоков.

### *Список литературы*

1. F. Nürnberg et al. // *Rev. Sci. Instrum.* 2009. Vol. 80, № 3. P. 033301.2.
2. M. Schollmeier, M. Geissel, A. B. Sefkow, and K. A. Flippo // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. Vol. 85, № 4. P. 043305

А.А. СВИРИДОВА, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ИВАНОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИКИ AlN ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Представлено исследование влияния параметров лазерной обработки импульсного наносекундного лазерного излучения на степень металлизации и качество поверхности алюмонитридной керамики. Были проведены опыты по созданию структур с наименьшим сопротивлением, получены и проанализированы зависимости сопротивления, толщины проводящего слоя и шероховатости поверхности от перекрытия импульсов, средней мощности излучения в воздухе и аргоне.

A.A. SVIRIDOVA, A.S. SHCHEKIN, V. N. PETROVSKIJ, A.A. IVANOV  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## LASER PROCESSING OF AlN CERAMICS FOR MICROELECTRONICS APPLICATIONS

The study of the influence of laser processing parameters of pulsed nanosecond laser radiation on the degree of metallization and surface quality of aluminum nitride ceramics is presented. Experiments were carried out to create structures with the lowest resistance and the dependences of the resistance, thickness of the conductive layer and surface roughness on the overlap of pulses, average radiation power in air and argon were obtained and analyzed.

Техническая керамика AlN является незаменимым материалом подложки для электротехнических изделий, для чего керамику подвергают металлизации. Технология металлизации диэлектрических материалов в основном формируется на гальванических процессах, которые состоят из сложных, многостадийных процессов, затрачивающих большое количество ресурсов. Лазерная обработка является эффективным способом металлизации [1]. Этот способ обработки характеризуется высокой точностью и управляемостью процесса, позволяет усовершенствовать механические и электрические свойства материала, создаёт условия для нанесения меди на печатные платы за счёт гальванического меднения, что позволяет результативно решить актуальную проблему ускорения и упрощения процесса создания продуктов микроэлектроники.

Керамика на основе нитрида алюминия отличается высокими электроизоляционными свойствами и теплопроводностью. Металлизация керамики происходит за счёт реакции разложения в результате воздействия лазерного излучения на поверхность непроводящего нитрида алюминия:  $\text{AlN}(\text{solid}) + h\nu \rightarrow \text{Al}(\text{solid}) + \text{N}(\text{gas})$  [1,2].

Цель данной работы – исследование влияния параметров лазерной обработки импульсного лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 1,064$  мкм на качество и степень металлизации поверхности керамической подложки AlN путём исследования структуры поверхности и измерения толщины проводящего слоя.

Для изучения влияния параметров лазерного излучения на процесс металлизации была получена зависимость сопротивления от длительности импульсов, исходя из которой были выбраны длительности импульса 4 нс и 200 нс, соответствующие наибольшему и наименьшему значению сопротивления и представляющие интерес для анализа. Плотность энергии как параметр частоты выбиралась максимально возможной для наибольшего воздействия на керамическую подложку. Вследствие высокой химической активности чистого алюминия с кислородом, что приводит к образованию оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), которые отрицательно влияют на проводимость структур, процесс лазерной металлизации проводился в двух средах: аргоне и воздухе.

### *Список литературы*

- 1.Kozioł P. E. et al. // Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 287. P. 165- 171.
- 2.Yang Q. et al. // J. Mater. Sci. 2019. Vol. 54, №. 22. P. 13874-13882.

А.П. ЛАСКОВНЕВ<sup>1</sup>, М.И. МАРКЕВИЧ<sup>1</sup>, В.И. ЖУРАВЛЕВА<sup>2</sup>, Д.Ж. АСАНОВ<sup>3</sup>, А.Б. КАМАЛОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза Узбекистан

## ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ Si, InP В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Представлен метод формирования коллоидных растворов полупроводников (InP, Si) в водной среде при воздействии сфокусированным излучением наносекундного лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме. Показано, что в воде формируется ансамбль наночастиц Si, InP разного размера сферической формы. Методом сканирующей электронной микроскопии установлены особенности морфологии поверхности кратера поликристаллического кремния и монокристаллического фосфида индия.

A.P. LASKOVNEV<sup>1</sup>, M.I. MARKEVICH<sup>1</sup>, V.I. ZHURAVLEVA<sup>2</sup>, D.J. ASANOV<sup>3</sup>, A.B. KAMALOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz Uzbekistan dauranbek83@list.ru

## LASER INFLUENCE ON THE SURFACE OF Si, InP IN AQUEOUS ENVIRONMENT

A method is presented for the formation of colloidal solutions of semiconductors (InP, Si) in an aqueous medium under the action of focused radiation from a nanosecond yttrium aluminum garnet laser (LS-2134D) with a wavelength of 1064 nm, generating in a two-pulse mode. It is shown that an ensemble of spherical Si, InP nanoparticles of different sizes is formed in water. Using the method of scanning electron microscopy, the features of the morphology of the surface of the crater of polycrystalline silicon and single-crystal indium phosphide are established.

На основе наночастиц (НЧ) создаются различные функциональные устройства. Важной проблемой нанопотоники является создание устройств, действие которых основано на взаимодействии света с наночастицами полупроводников, преобразовании и использовании световой энергии. Для успешной реализации данных технологий требуются высокопроизводительные методы генерации наночастиц необходимой морфологии, без примесей и загрязнений [1, 2]. Так наночастицы фосфида индия (InP) перспективны для оптоэлектронных систем, их синтез является сложным и дорогостоящим процессом с использованием ядовитых источников фосфора. Интерес к кремнию связан с возможностью создания на поверхности кремния микрорельефов. Структурирование поверхности кремния приводит к уменьшению коэффициента отражения в оптическом диапазоне. Данное свойство может использоваться для эффективности работы солнечных батарей.

Цель работы – модификация поверхности полупроводников (кремния, фосфида индия) и получение наночастиц при воздействии лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме в водной среде.

В качестве мишени использовали поликристаллический кремний (КНР) и монокристаллический фосфид индия (пластины из монокристаллов, легированные Zn, диаметром 50,8мм, толщиной 350 мкм), а в качестве среды, в которой находились мишени, применяли дистиллированную воду. Жидкость принудительно не перемешивали. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~ 0,05 Дж).

Образованная в результате испарения материала мишени под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц материала, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции. Образцы Si обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 50 – 1000 Дж при временах экспозиции от 1 до 10 мин. (размеры образцов: 10x30x12 мм), а образцы InP - лазерным излучением с вложенной энергий 2400 Дж при времени экспозиции 40 мин. В процессе получения и во время хранения водных растворов наночастиц фосфида индия и кремния не применяли поверхностно-активные вещества. Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе S-4800 (фирма «НИТАСНИ», Япония).

Методом лазерной абляции получены водные растворы наночастиц фосфида индия и кремния. Показано, что формируется ансамбль наночастиц разного размера и формы близкой к сферической. Методом сканирующей электронной микроскопии установлены особенности морфологии поверхности кратера поликристаллического кремния и монокристаллического фосфида индия, находящихся в дистиллированной воде при импульсной лазерной обработке в режиме сдвоенных импульсов.

### Список литературы

1. Risha G.A., Connel T.L., Yetter R.A. and other // J. Propul. Power. 2014. Vol. 30, №1. P. 133 – 142.
2. Казилин Е.Е., Маркевич М.И., Конкин С.В. и другие // Перспективные материалы. 2008. №3. С. 60 – 63.



В.Г. СРЕДИН<sup>1</sup>, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ<sup>2</sup>, А.П. МЕЛЕХОВ<sup>3</sup>, Р.Ш. РАМАКОТИ<sup>3</sup>,  
С.М.ДЗЯДУХ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военная академия ВВСН им. Петра Великого, МО Балашиха, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МДП СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Приводятся результаты исследования ВФХ МДП структур на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , подвергнутых действию мягкого рентгеновского излучения. Предлагается модель генерации поверхностных дефектов излучением.

V.G. SREDIN<sup>1</sup>, A.V. VOITSEKHOVSKII<sup>2</sup>, A.P. MELEHOV<sup>3</sup>, R.S. RAMAKOTI<sup>3</sup>, S.M. DZYADUKH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military Academy of the Strategic Missile Forces Peter the Great, Balashikha, Russia

<sup>2</sup>National State Research University Tomsk, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## THE MECHANISM OF DEFECT FORMATION IN MOS STRUCTURES BASED ON $Cd_xHg_{1-x}Te$ UNDER THE ACTION OF SOFT X-RAY RADIATION OF LASER PLASMA

The results of a study of  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -based structures exposed to soft X-ray radiation are presented. A model of generation of surface defects in these structures by radiation is proposed.

Процесс дефектообразования в полупроводниках под действием рентгеновского излучения связывают с распадом электронных возмущений, вызванных поглощением рентгеновских квантов [1,2]. Энергии кванта мягкого рентгеновского излучения (0,4 – 10 кэВ) достаточно для возбуждения электронов L, M, N оболочек ионного остова кристаллов полупроводников. При этом мягкое рентгеновское излучение (МРИ) поглощается атомами, расположенными как в узлах кристаллической решетки, так и в междоузлиях, в результате чего может произойти генерация различных типов точечных дефектов кристаллической решетки.

В настоящей работе проведено исследование влияния МРИ, генерируемого лазерной вакуумной искрой, на спектр поверхностных состояний в МДП структурах, сформированных на основе полупроводниковых твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с составами  $0.23 \leq x \leq 0.3$ , в качестве диэлектрика использовался  $Al_2O_3$ , осажденный низкотемпературным плазменным методом атомарно-слоевого нанесения на поверхность кристалла [3]. На полученных таким образом МДП-структурах в интервале температур 9-77 К были проведены исследования адмиттанса.

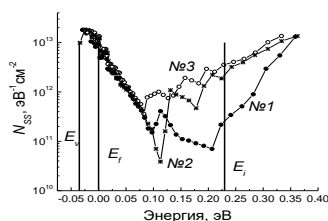


Рис. 1. Спектры плотности быстрых поверхностных состояний

На рисунке 1 представлены спектры плотности быстрых поверхностных состояний, полученных в МДП структуре на основе  $Cd_{0.23}Hg_{0.77}Te$  при  $T = 77$  К, номера кривых соответствуют дозам облучения в порядке ее роста. Полученные результаты показывают, что воздействие МРИ к изменению плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела, к некоторому увеличению концентрации основных носителей заряда (около 2 раз). При определенных режимах облучения наблюдается значительное (в 4-15 раз) уменьшение значений  $R_{опз}$  при температурах 9-30 К. Возможной причиной изменения перечисленных параметров МДП-структур является перестройка примесно-дефектной системы границы раздела диэлектрик-полупроводник и приповерхностного слоя полупроводника. Сопоставление с результатами, полученными нами на других образцах показывает, что характер перестройки примесно-дефектной системы в значительной степени определяется режимом воздействия мягкого рентгеновского излучения и исходной дефектностью структуры. В частности, известно, что кристаллы со структурой сфалерита являются полярными, вследствие чего некоторые свойства их поверхности зависят от ее кристаллографической ориентации. В [4,5] показано, что эффекты, обусловленные полярностью, наблюдаются и в твердых растворах  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . Это обстоятельство следует учитывать при анализе процессов поверхностного дефектообразования в исследуемых МДП структурах.

### Список литературы

1. Вавилов В. С. // УФН. 1997. Т. 167, № 4. С. 407.
2. Клиндер М.И., Лущик Ч.Б., Машовец Т.В. и др. // УФН. Т.147, № 3. С.523–558.
3. Zhang P. and others // Journal of Electronic Materials. 2016. V.45, № 9. P. 4716–4720.
4. Sredin V.G., Lanskaya O.G., Popovnin V.M. // Semiconductors. 1996. Т. 30, № 3. С. 215–216.
5. Средин В.Г., Мезин Ю.С., Укроженко В.М. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т.35, №11. С. 1335–1337.

М.А. МУРЗАКОВ<sup>1</sup>, Н.Н. ЕВТИХИЕВ<sup>1,2</sup>, Н.В. ГРЕЗЕВ<sup>1</sup>, Д.М. КАТАЕВ<sup>1</sup>, А.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ КРЕМНИЯ И СТЕКЛА

Проведено исследование процесса лазерной сварки фемтосекундными импульсами боросиликатного стекла и кремниевой подложки. Определены параметры лазерного излучения, которые минимизируют степень воздействия на кремниевую подложку. При энергиях импульса в диапазоне от 11 до 15 мкДж происходит формирование сварного шва на границе раздела «стекло-кремниевая подложка», дальнейшее увеличение энергии приводит к разрушениям в стекле и кремнии. Значительное влияние на процесс соединения стекла и кремния оказывает скорость перемещения лазерного луча – отмечено, что при повышении скорости обработки происходит увеличение ширины зоны сварки и уменьшение степени разрушений как в стекле, так и в кремниевой подложке.

M.A. MURZAKOV<sup>1</sup>, N.N. EVTIKHIEV<sup>1,2</sup>, N.V. GREZEV<sup>1</sup>, D.M. KATAEV<sup>1</sup>, A.A. VASILIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LLC "IRE-POLUS" LTD, Fryazino, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DETERMINATION OF THE DEGREE LASER RADIATION EXPOSURE TO A SILICON SUBSTRATE DURING LASER WELDING OF SILICON AND GLASS

A study of the laser welding process by femtosecond pulses of borosilicate glass and silicon substrate has been carried out. The parameters of laser radiation to minimize the degree of impact on the silicon substrate are determined. At pulse energies in the range from 11 to 15  $\mu\text{J}$ , a weld is formed at the interface "glass-silicon substrate", further increase in energy leads to destruction in glass and silicon. A significant influence on the process of joining glass and silicon is exerted by the speed of movement of the laser beam – it is noted that when the processing speed increases, the width of the welding zone increases and the degree of destruction decreases both in the glass and in the silicon substrate.

В настоящий момент для создания на кремниевой пластине массива необходимых активных микроструктур используется технологии адгезивного временного бондинга [1], суть которой в возможности выполнения технологических операций (литография, осаждение и травление слоев и т. д.). В данном способе для соединения пластины кремния и стекла (выполняющего роль пластины носителя) используется адгезивный материал, требующий после нанесения сушку, имеющий паразитные дефекты затекания наносимых жидкостей на обратную сторону пленки и образования пузырей, создающих дефекты пленок [2].

В работе определены степени воздействия лазерного импульса длительностью 220 фс на кремниевую подложку в процессе лазерной сварки боросиликатного стекла и кремния. При воздействии ультракороткого импульса (УКИ) возникают механизмы нелинейного поглощения – многофотонная лавинообразная ионизация [3], которая приводит к процессам плавления диэлектриков на границе раздела двух заготовок. Предлагаемый способ соединения кремниевой подложки и стекла позволит отказаться от адгезионных материалов, увеличить скорость соединения, а минимизация воздействия УКИ уменьшит деформации в заготовках.

Процесс лазерной сварки стекла и кремниевой подложки можно описать следующим образом: две заготовки располагаются внахлест друг относительно друга, лазерное излучение фокусируется через верхнее прозрачное стекло на границу раздела заготовок и происходит процесс плавления, за счет нелинейных эффектов поглощения. В ходе экспериментов установлено, что при энергиях в импульсе 11-15 мкДж наблюдается процесс соединения двух заготовок, при увеличении энергии происходит разрушение как стеклянной пластины, так и кремниевой подложки. Также отмечено, что при увеличении скорости обработки происходит увеличение ширины сварного шва и уменьшение степени воздействия на стеклянную пластину и кремний. Получены образцы диаметром 160 мм при скорости сварки 50 мм/с и при энергии в импульсе 11 мкДж и 15 мкДж, при этих параметрах степень воздействия на кремниевую пластину (глубина сварного шва) составляет значения 80 мкм и 120 мкм соответственно. Таким образом при определенном сочетании параметров лазерной обработки удалось получить соединения стекла и кремния с минимально возможным воздействием на кремниевую подложку.

### Список литературы

1. Гусев Е.Э., Фомичев М.Ю. и др. // Nanoindustry Russia. 2020. №13. С. 556-559
2. Фомичев М. Ю. // Микроэлектроника и информатика. 2020. С. 46.
3. Miyamoto I., Svecsek K., Okamoto Y. and Schmidt M. // Appl. Phys. A. 2014. 114. P. 187-208.
- 4.

М.Б. ШАВЕЛКИНА, М.М. МАЛИКОВ, Т.И. БОРОДИНА, Г.Е. ВАЛЬЯНО

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ГРАФИТА МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ДЛЯ 2D ПЕЧАТИ

Продemonстрировано формирование бездефектных частиц графита при облучении в спиртовом растворе технического углерода импульсно-периодическим лазером на парах меди.

M.B. SHAVELKINA, M.M. MALIKOV, T.I. BORODINA, G.E. VALLIANO

*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

## PRODUCTION OF GRAPHITE NANOPARTICLES BY LIQUID-PHASE LASER ABLATION FOR 2D PRINTING

The formation of defect-free graphite particles upon irradiation of technical carbon in an alcohol solution by a repetitively pulsed copper vapor laser was demonstrated.

Принтерные технологии – это новое направление в получении электронных компонентов на гибких носителях печатными принтерами с использованием наночернил [1]. Преимущества данных технологий: гибкость электронных устройств, простота производства и его дешевизна. Среди параметров, предъявляемых к чернилам, концентрация частиц, их размер, разброс по размеру и т.д. Одним из масштабируемых способов создания суспензии на основе наночастиц является метод лазерной абляции в жидкости. Известно, что абляция мишени происходит при воздействии импульсного лазерного излучения на твердую мишень, находящуюся в контакте с жидкостью, при поверхностной интенсивности выше  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> [2,3]. Он сопровождается выбросом плазменного факела, состоящего из ионизированных и нейтральных атомов целевого вещества и окружающей жидкости. Поскольку жидкость препятствует разлету продуктов абляции, давление внутри объема факела может достигать нескольких единиц. ГПа; температура плазмы 4000–5000 К; плотность  $10^{22}$ – $10^{23}$  см<sup>-3</sup>. В этих условиях при высокой частоте столкновений атомов и молекул в плазме образуются наноразмерные комплексы частиц целевого вещества и жидкости, а также продукты их химического взаимодействия.

Для экспериментов использовался импульсно-периодический лазер на парах меди. Частота следования импульсов излучения составляла 10 кГц, Средняя мощностью излучения, суммарная на двух длинах волн 0.51 и 0.578 мкм, равнялась (10 – 12) Вт. При длительности импульсов  $t \sim 20$  нс и энергии в импульсе излучения  $\sim 1.0$  мДж пиковая мощность достигала  $\sim (50 - 55)$  кВт. Плотность энергии и плотность мощности излучения лазера в пятне фокусировки на вращающейся мишени составляли  $(50 - 55)$  Дж/см<sup>2</sup> и  $(2.5 - 2.7) \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Время облучения  $\tau_{\text{обл}}$  мишеней варьировалось от 30 до 60 минут. Мишени были изготовлены из технического углерода. В качестве жидкой среды были применены медицинский спирт и дистиллированная вода. Полученный коллоидный раствор высушивался на стеклянных или медных подложках. Выделенные частицы были исследованы на растровом электронном микроскопе Nova NanoSem 650 и рентгеновском дифрактометре ДРОН-2. Размер синтезированных частиц составил несколько микрометров.

Рентгеноструктурный анализ образцов показал, что полученный в воде материал представляет собой трехмерно упорядоченный графит с максимально достижимой степенью трехмерного упорядочения (параметр трехмерной упорядоченности  $p_3=1$ ). Межплоскостное расстояние  $d(002)$  составляет 0,3358 нм. Кристаллиты графита расположены таким образом, что кристаллографические плоскости (001) в них параллельны поверхности пластинки. В спирте формируются частицы графита с  $p_3=1$ , а  $d(002)$  составляет 0,3354 нм. Таким образом, при использовании воды в качестве среды образуются частицы с дефектной структурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-01129-23-00).

### *Список литературы*

1. Корнилов Д. Ю., Ткачев С. В., Зайцев Е. В., Ким В. П., Кушнир А. Е. Принтерные технологии в электронике. Материалы и устройства для печати - первый российский семинар (Москва, 15. 12. 2017) Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2017. Т. 9. № 2. С. 181.
2. Yang, G.W., Prog. Mater. Sci., 2007. V. 52. P. 648.
3. Карпунин В.Т., Казарян М.А., Протасов М.В., Маликов М.М., Бородин Т.И., Вальяно Г.Е., Гололобова О.А. Краткие сообщения по физике ФИАН., 2017. №6. С. 22

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ СКАНИРУЮЩИМ ЛУЧОМ

В работе рассмотрено решение обратной задачи теплопроводности для поиска энергетического распределения, необходимого для получения равномерной зоны модифицирования при обработке неплоских поверхностей металлических изделий сканирующим лазерным лучом с переменной мощностью излучения.

V.D. VORONOV, E.D. ISHKINYAEV, V.N. PETROVSKIY  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SOLVING AN INVERSE HEAT CONDUCTION PROBLEM TO OBTAIN THE ENERGY DISTRIBUTION DURING LASER SURFACE PROCESSING WITH A SCANNING BEAM

The paper considers solving the inverse heat transfer problems to find energy distribution required for creating a uniform modification zone on non-planar surfaces during the processing of metallic parts by a scanning laser beam with a variable radiation power.

В большинстве задач лазерной термообработки поверхности, таких как закалка, сварка, легирование, наплавка и др., требуется достижение равномерного температурного распределения на всей обрабатываемой поверхности при воздействии заданным излучением. Для этого проектируются оптические системы, позволяющие переформировать гауссов пучок в необходимое для конкретной задачи термообработки распределение интенсивности в поперечном сечении путем изменения формы преломляющих линз или использования дифракционных оптических элементов [1, 2]. Однако такие системы не обладают достаточной гибкостью в использовании в различных задачах, так как не позволяют изменять габариты получаемого распределения с сохранением профиля интенсивности.

Для более гибкой обработки подходит использование сканирующей оптики, которое позволяет производить движение луча с высокими скоростями (порядка 10 м/с) с возможностью быстрого изменения мощности в процессе обработки. При обработке осциллирующим лучом с частотой порядка десятков Гц можно создавать равномерный тепловой фронт с минимальными колебаниями температуры в области сканирования вследствие инертности теплопроводности [3]. Если при этом модулировать технологические параметры обработки, такие как скорость движения луча, амплитуда осцилляций и мощность излучения в процессе сканирования, то можно достичь практически любого теплового распределения в области воздействия.

Для получения равномерного температурного распределения на неплоской поверхности необходимо найти параметры обработки осциллирующим лучом, создающие соответствующий тепловой фронт. Для поиска этих параметров в работе было проведено моделирование с использованием метода конечных элементов.

В модели рассчитывается интегральная интенсивность за период осцилляции по формуле:

$$I(t_n, x, y, z) = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} \frac{2P(t)}{\pi D(z)^2} \exp\left(-8 \frac{(x - x_0 - V_{||}t)^2 + (y - y_0 - \int V_{\perp} dt)^2}{D(z)^2}\right) dt,$$

где  $P(t)$  – функция мощности излучения по времени,  $D(z)$  – диаметр пятна излучения на поверхности,  $(x_0, y_0)$  – начальная координата луча,  $V_{||}$  – продольная скорость движения оптической системы,  $V_{\perp}$  – скорость осцилляции луча,  $t_n$  – период осцилляции. При достаточно высоких частотах обработки сканирование поверхности с  $I(t_n, x, y, z)$  можно считать эквивалентным обработке статическим источником с аналогичным распределением плотности мощности.

Для создания равномерного температурного распределения на неплоской поверхности необходимо решить обратную задачу теплопроводности по поиску оптимального распределения интенсивности в пятне лазерного луча. Задача решалась итерационно методом наименьших квадратов, где в каждой итерации решения производится сравнение заданного температурного распределения с распределением, полученным при решении, с последующей корректировкой параметров обработки.

### Список литературы

1. Klocke F., Schulz M., Gräfe S. // Coatings. 2017. Vol. 7, № 6.
2. Sundqvist J. and other // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 247. P. 48-54.
3. Sancho P. and other // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 263. P. 223-232.

И.А. СТОЛЯРОВ, И.Р. ОВСЯНКИН, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ,  
Е.А. БАЗДНИКИНА, А.Н. СУЧКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ АМОРФНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

В работе исследуются возможности создания трехмерных аморфных структур из порошка на основе Zr и Ti методом прямого лазерного выращивания. На основе моделирования тепловых полей подобран оптимальный режим наплавки, обеспечивающий высокую скорость охлаждения для предотвращения кристаллизации. Получен образец размерами 15x15x16,5 мм со степенью аморфности до 59%.

I.A. STOLYAROV, I.R. OVSYANKIN, E.D. ISHKINYAEV, V.N. PETROVSKIY,  
E.A. BAZDNIKINA, A.N. SUCHKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## CREATION OF THREE-DIMENSIONAL AMORPHOUS STRUCTURES BY DIRECT ENERGY DEPOSITION

The article explores the possibilities of creating three-dimensional amorphous structures from powder based on Zr and Ti by direct energy deposition. Based on the modeling of thermal fields, the optimal cladding parameters were selected, which provide a high cooling rate to prevent crystallization. A sample of 15x15x16.5 mm in size with an amorphous degree of up to 59% was obtained.

Для решения многих задач современной промышленности и приборостроения могут быть использованы аморфные металлические сплавы. Основная проблема использования таких сплавов для создания конструкционных и функциональных материалов традиционными методами - ограничение форм и размеров получаемых изделий. Решением данной проблемы может быть применение прямого лазерного выращивания или DED (direct energy deposition). При использовании данного метода взаимодействие между источником лазерного излучения и порошком (из которого и получается аморфный сплав) происходит очень быстро в ограниченной области. Скорость локального охлаждения в этом случае значительно выше, чем критическая скорость охлаждения сплава. Это позволяет сохранять аморфную структуру наплавляемой детали после затвердевания.

Структура, формируемая в процессе наплавки, существенно зависит от параметров процесса. Локальные перегревы аморфной подложки могут приводить к формированию кристаллической фазы, а неравномерное распределение потока подаваемого материала – к искажению формы образца и формированию пористости. Для устранения таких эффектов необходимо подобрать оптимальный режим печати образца, варьируя параметры процесса, такие как скорость движения головы лазера и мощность лазерного излучения.

В рамках подбора режима печати был проведен ряд экспериментов, в которых изменялись скорость обработки, мощность лазерного излучения, расход порошка и др. Кроме того, для упрощения поиска оптимальных параметров и траектории наплавки (см. рис.1), была построена упрощенная модель теплового распределения в процессе лазерного воздействия.

В результате был выбран режим, соответствующий оптимальной форме валика и глубине проплавления: скорость обработки 900 мм/мин, мощность 200 Вт, при этом диаметр пятна лазера на подложке – 0,66 мм, скорость подачи порошка – 2,1 г/мин. Итоговые размеры одного валика составили: высота – 0,19 мм, ширина – 0,79 мм.

Получившийся в результате послойного выращивания образец имеет длину и ширину 15 мм, а также высоту 16,5 мм. Степень его аморфности варьируется от 50% до 59% в зависимости от метода оценки. В образце были обнаружены кристаллические образования, что говорит о необходимости дополнительных исследований, направленных на увеличение скорости охлаждения при наплавке многослойной структуры.



А

Б

В

Рис. 1. «Предлагаемые траектории выращивания многослойной структуры;

А – поперечная наплавка, Б – наплавка с дополнительным граничным слоем, В – наплавка «зигзагом»  
(последний выбран в качестве оптимального)

## УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ЗА СЧЁТ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

В данной работе исследована зависимость углов смачивания от параметров обработки поверхности импульсным наносекундным лазером с последующим нанесением гидрофобизирующей жидкости. Получены режимы для создания гидрофобных структур с низкой адгезией.

A. I. GRISHINA, N. N. SHCHEDRINA, G. V. ODINTSOVA  
ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia

## STEEL SURFACE WETTING CONTROL BY LASER STRUCTURING FOR CREATING AN AUTONOMOUS FLUID FLOW

This paper studies dependence of wetting angles on parameters of surface treatment with pulsed nanosecond laser with subsequent application of hydrophobic fluid. The modes for creating hydrophobic structures with low adhesion are obtained.

В данной работе исследуется влияние лазерного структурирования на углы смачивания и адгезию дистиллированной воды к поверхности из нержавеющей стали AISI 304. Целью исследования является разработка износостойких гидрофобных поверхностей, которые могут быть использованы для отвода конденсированной влаги в системах управления температурным режимом [1] и конденсации пара [2], в микрофлюидных системах [3], для создания самоочищающихся поверхностей и поверхностей с защитой от обледенения [4], а также в микросистемах для разделения жидкостей с различным поверхностным натяжением [5].

В данной работе использовался иттербиевый волоконный лазер «МиниМаркер-2» мощностью 50 Вт, с длиной волны 1064 мкм, частотой следования импульсов 50–100 кГц и длительностью импульса 100 нс для создания гидрофобных структур с низкой адгезией. В предыдущих исследованиях было показано, что обработка поверхности структурированием сразу после лазерного воздействия может только уменьшить угол смачивания [6]. Поэтому в данной работе поверхности дополнительно покрывались гидрофобизирующим спреем Glaco Mirror Coat, который представляет собой спиртовую суспензию из силанизированных наночастиц кремния [7]. Оценка морфологии структур и режима смачивания проводилась с помощью оптической микроскопии, метода лежащей капли и измерения контактного краевого угла. Степень адгезии качественно измерялась путём наклона поверхности до предельного угла, при котором капля начинает соскальзывать с поверхности. Для достижения большего диапазона углов смачивания и получения низкой адгезии использовалось сочетание лазерного структурирования и нанесения гидрофобного покрытия. Для достижения этой цели было подобрано два подхода, включающее нанесение Glaco на сталь и лазерное удаление некоторых участков покрытия, а также нанесение Glaco после лазерной обработки.

Таким образом, в данной работе были получены поверхности с низкой адгезией с использованием лазерного структурирования и гидрофобного покрытия. Эти поверхности можно использовать для создания структур для направленного автономного течения жидкости путем лазерного формирования областей с различными углами смачивания от супергидрофобного до гидрофильного.

### Список литературы

1. Lowrey S. et al. Survey of micro/nanofabricated chemical, topographical, and compound passive wetting gradient surfaces // *Langmuir*. – 2021. – Т. 38. №. 2. – С. 605-619.
2. Sommers A. D. et al. Self-propelled water droplet movement on a laser-etched radial gradient copper surface // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Т. 173. – С. 115226.
3. Morrisette J. M. et al. Rapid, self-driven liquid mixing on open-surface microfluidic platforms // *Scientific reports*. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 1800.
4. Prime H. et al. Micro-fabricated aluminium surfaces for reduced ice adhesion // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2022. – Т. 136. – С. 110646.
5. Chowdhury I. U. et al. Autonomous transport and splitting of a droplet on an open surface // *Physical Review Fluids*. – 2021. – Т. 6. – №. 9. – С. 094003.
6. Shchedrina N. et al. Wetting angle stability of steel surface structures after laser treatment // *Optical and Quantum Electronics*. – 2020. – Т. 52. – С. 1-12.
7. Luo J. T. et al. Slippery liquid-infused porous surfaces and droplet transportation by surface acoustic waves // *Physical Review Applied*. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 014017



А.К. ЛИСИЧНИКОВ, К.А. МИХАЙЛОВА, Ю.Ю. КАРЛАГИНА, Г.В. ОДИНЦОВА,  
Ю.Р. КОЛОБОВ

*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия  
Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*

## **ЛАЗЕРНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ТРАВМОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ SLM**

Рассмотрена проблема необходимости постобработки поверхности титановых травматологических имплантатов, изготовленных методом SLM (Selective Laser Melting), которая обусловлена сплавлением не всех частиц титанового порошка при изготовлении. Не сплавленные частицы порошка приводят к снижению прочностных характеристик поверхности и могут привести к негативным последствиям в процессе их эксплуатации. Предложен метод лазерной обработки поверхности SLM- имплантатов излучением на иттербиевом импульсном волоконном лазере с длиной волны 1064 нм для уменьшения их шероховатости. Проведен анализ физических процессов, приводящих к уменьшению шероховатости данных изделий.

A.K. LISICHNIKOV, K.A. MIHAYLOVA, Yu.Yu. KARLAGINA, G.V. ODINTSOVA, Yu.R. KOLOBOV

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

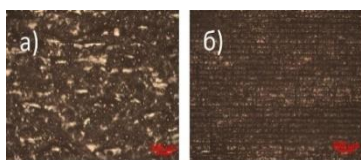
Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

## **LASER REDUCING THE SURFACE ROUGHNESS OF TRAUMATOLOGICAL TITANIUM IM-PLANTS PRODUCED BY THE SLM METHOD**

The problem of requirement of post-processing of the surface of titanium traumatological implants manufactured by the SLM (Selective Laser Melting) method caused by the melting of not all particles of titanium powder during manufacturing, is considered. Non-melted powder particles lead to a decrease in the strength characteristics of the surface and can cause negative consequences during their usage. A variant of laser processing of the surfaces of implants to reduce their roughness, fabricated by this method on an ytterbium pulsed fiber laser with a wavelength of 1064 nm is proposed. Analyzed physical processes leading to a decrease in the roughness of these products.

Технология SLM (Selective Laser Melting) – относительно молодая аддитивная технология, зарекомендовавшая себя, как уникальный метод по изготовлению объемных изделий по 3D модели из порошков металлов и металлических сплавов, в том числе - травматологических титановых имплантатов. Одним из важных недостатков данной технологии на сегодняшний день является высокая шероховатость поверхности, возникающая в процессе изготовления изделия [1]. Данная проблема обусловлена тем, что не все частицы порошка проплавляются во время сплавления, оставляя на поверхности сферообразные капли, сильно влияющие на общую шероховатость [2]. Таким образом, с одной стороны важно избавиться от частиц порошка, с другой – важно сохранить пористость поверхности и биоинертный химический состав для обеспечения биосовместимости имплантатов.

В работе представлен метод лазерной полировки поверхностей титановых SLM изделий при помощи излучения иттербиевого импульсного волоконного лазера с целью уменьшения шероховатости. Обработка режима лазерной обработки производилась на различных образцах: пластинах различной толщины и разной конфигурации поверхности и на реальных черепных имплантатах. Анализ особенностей рельефа поверхности до и после проводился при помощи метода контактной профилометрии и оптической микроскопии. Оценка результатов профилометрии производилась по параметру Sdr – шероховатости по относительной площади. На обработанных образцах шероховатость удавалось уменьшить вплоть до 50% в сравнении с необработанным изделием. Анализ полученных результатов показал, что предложенный метод постобработки поверхности позволяет избавиться от оставшихся после SLM частиц порошка, оставляя после себя канавки со сравнимо меньшим отклонением по высоте от основной поверхности: до обработки перепады высоты на поверхности составляли 60-70 мкм, после лазерной обработки 20-30 мкм, что положительно отражается на приживаемости имплантата. Данная постобработка является важным этапом изготовления имплантатов, а подобная технология является практичной и удобной для ее использования в местах изготовления титановых имплантатов по технологии SLM, компенсируя ее недостатки прямо на месте производства.



*Рис. 1. Снимки поверхностей титановых пластин, изготовленных методом SLM а) до обработки; б) после лазерной обработки*

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г., Соглашение № 075–11-2021-045 от 24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения»

### *Список литературы*

1. Rotaru H. and others // Maxillofacial plastic and reconstructive surgery. 2015. Т. 37, № 1. С. 1-6.
2. Panov D. and others // Optics & Laser Technology. 2022. Т. 156. С. 108535

Д.А. КОЧУЕВ, М.Н. ГЕРКЕ, Р.В. ЧКАЛОВ, Р.М. ДРОГИН  
*Владимирский государственный университет им А.Г. и Н.Г. Столетовых, Россия*  
**ВЫЯВЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИСТОЧНИКА  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРНЫХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОБРАЗЦЕ ZNS**

Проведено исследование образца методом послойной регистрации рассеяния лазерного излучения. Анализ полученных изображений с последующим выявлением максимальной глубины регистрации рассеяния для каждой длины волны лазерного излучения органолептическим методом.

D.A. KOCHUEV, M.N. GERKE, R.V. CHKALOV, R.M. DROGIN  
*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Russia*  
**IDENTIFICATION OF THE MOST SUITABLE WAVELENGTH OF THE LASER  
RADIATION SOURCE FOR REGISTRATION OF STRUCTURAL INHOMOGENEITIES IN  
THE YATA SAMPLE**

The sample was studied by the method of layer-by-layer registration of laser radiation scattering. Analysis of the obtained images with subsequent detection of the maximum depth of scattering registration for each wavelength of laser radiation by the organoleptic method.

В рамках данной работы проведено исследование рассеяния лазерного излучения на дефектах структуры образца из поликристаллического CVD ZnS [1]. Предполагается, что поры, содержащиеся в структуре данного образца, меньше либо сопоставимы с длиной волны видимого излучения. Для получения рассеяния будут использованы источники лазерного излучения видимого спектрального диапазона, детектор с соответствующей спектральной чувствительностью.

Исследование проводилось в спектральном диапазоне 400-800 нм и 1100 нм, что обусловлено спектральной чувствительностью используемого приемника излучения. Для получения «картины» рассеяния были использованы диодные источники непрерывного лазерного излучения, видимого спектрального диапазона и источник фемтосекундного лазерного излучения для возбуждения люминесценции на дефектах структуры образца. Образец перемещался по вертикальной оси с использованием прецизионного линейного транслятора. Регистрация изображения рассеяния осуществлялась для каждого положения образца. Данный метод называется конфокальная лазерная сканирующая микроскопия и он часто используется в биологических и медицинских областях и заключается в отражении лазерного луча, сфокусированного в прозрачной среде. Для получения изображения выбирается только фокальная плоскость с рассеянием лазерного излучения на дефектах [2].

Длины волн непрерывных источников лазерного излучения 410, 540, 650 нм средней мощностью 100 мВт. Так же было проведено исследование с использованием фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1030 нм.

Эксперимент был проведён на одном и том же участке образца. Исследование происходило с изменением положения образца относительно плоскости фокусировки объектива. Для каждого источника лазерного излучения было сделано максимальное количество изображений, на которых можно было беспрепятственно различить рассеяние на хотя бы одном дефекте. После завершения сканирования, все сохранённые изображения были проанализированы для выявления оптимальной высоты регистрации рассеяния для каждой длины волны, результаты качественной оценки максимальной глубины сканирования являются таковыми: 410 нм – 60 мкм; 517 нм – 160 мкм; 540 нм – 220 мкм; 650 нм – 260 мкм; 1030 нм – 675 мкм. На рис. 1 представлена группа изображений, содержащая распределение рассеяния позволяющее получить данные о структуре образца и содержащая паразитные проекции рассеяния, препятствующие правильной интерпретации результатов регистрации.

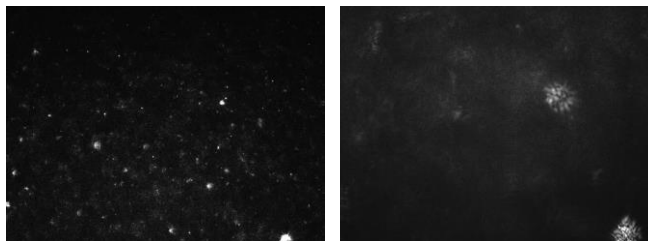


Рис. 1. Пример изображения в градациях серого, полученных с разной глубины образца 302/58В пригодного для анализа распределения дефектов (слева) и содержащего непригодные для анализа материалы (справа)

Все изображения были помещены в stl файл специальной программой который может быть открыт любым средством просмотра и обработки файлов данного стандарта.

*Список литературы*

1. Zhenyi F. and others // Journal of crystal growth. 2002. Т. 237. С. 1707-1710.
2. Boulesteix R. and others // Materials Letters. 2010. Т. 64, №. 16. С. 1854-1857.

И. А. ХРИСАНОВ, Ю. А. САТОВ, А. А. ЛОСЕВ, А. Н. БАЛАБАЕВ,  
А. В. ШУМШУРОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

## ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО<sub>2</sub> ЛАЗЕРА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Одним из важных направлений применения пучков тяжелых ионов является моделирование воздействия ионизирующих излучений космического пространства на применяемую при постройке отечественных космических аппаратов электронную компонентную базу. Для получения таких пучков в РФЯЦ-ВНИИЭФ [1] в настоящее время идет создание ускорительного комплекса. В работе представлен один из промежуточных результатов по разработке лазерной системы для лазерно-плазменного тяжелоионного источника.

I. A. KHRISANOV, Yu. A. SATOV, A. A. LOSEV, A. N. BALABAEV, A. V. SHUMSHUROV,  
A. A. VASILIEV

National Research Center «Kurchatov Institute» - Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

## SHAPING OF THE POWERFUL CO<sub>2</sub> LASER PULSES FOR LASER HEAVY ION SOURCE

One of the important heavy ion beams applications is modeling the influence of space radiation on the electronic component base used in the construction of spacecrafts. To obtain such beams, the acceleration complex is currently creating in RFNC-VNIIEF [1]. The paper presents one of the intermediate results on the development of a laser system for a laser-plasma heavy-ion source.

Экспериментальная реализация рассчитанной предварительно схемы формирования мощного короткого импульса СО<sub>2</sub> лазера в схеме «задающий генератор – усилитель» [2] с использованием нелинейного насыщающегося поглотителя [3] для модификации фронта импульса задающего генератора позволила получить на выходе лазерной установки пиковую мощность излучения около 6 ГВт.

На рис. 1 изображена осциллограмма лазерного импульса.

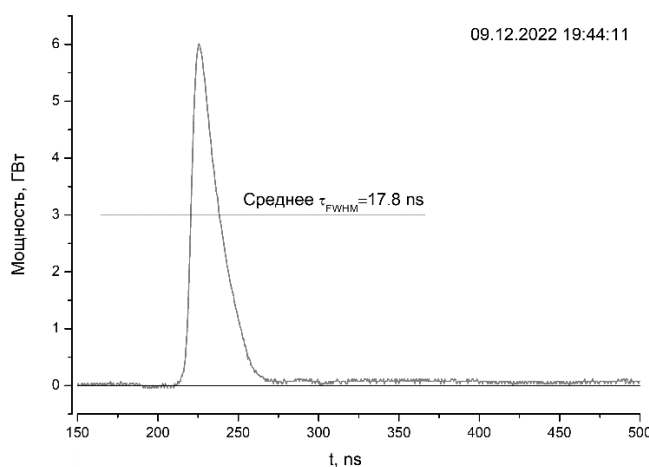


Рис. 1. Нормированная на мощность осциллограмма лазерного импульса на выходе установки

### Список литературы

1. Будников Д. В., Воронцов С. В., Глушков С. Л. и другие // Вопросы атомной науки и техники. 2021. № 4. С. 5.
2. Балабаев А. Н., Сатов Ю. А., Хрисанов И. А. и другие // Препринт ИТЭФ. 2014. №4
3. Сатов Ю. А., Хрисанов И. А., Шумшуров А. В. и другие // Препринт ИТЭФ. 2016. №1.

М.В. ИОНИН, А.А. ИОНИН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ, О.А. РУЛЕВ, Д.В. СИНИЦЫН

*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

## **СВЕРЛЕНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПММА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЦЕЛЕВЫХ СО- и СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ С ВЧ НАКАЧКОЙ**

В данной работе представлены результаты экспериментов, в ходе которых удавалось получать в ПММА отверстия с большим аспектным отношением (~100) за счет правильного выбора условий фокусировки лазерного луча и средней мощности СО-лазера с ВЧ накачкой. Выполнено сравнение возможностей сверления отверстий в ПММА СО- и СО<sub>2</sub>-лазерами с ВЧ накачкой

M.V. IONIN, A.A. IONIN, YU.M. KLIMACHEV, A.YU. KOZLOV, O.A. RULEV, D.V. SINITSYN  
*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **DRILLING OF HIGH ASPECT RATIO HOLES IN PMMA BY RADIATION OF RF-PUMPED CO- AND CO<sub>2</sub>-LASERS**

This paper presents the results of experiments in which it was possible to obtain holes with a high aspect ratio (~100) in PMMA due to the correct choice of laser beam focusing conditions and the average power of an RF-pumped CO laser. Comparison of holes drilling possibilities by CO and CO<sub>2</sub> lasers with RF pumping is performed.

Полиметилметакрилат (ПММА) представляет собой жесткий аморфный полимер (C<sub>5</sub>O<sub>2</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub>, относящийся к термопластам. Он обладает высокой прозрачностью в видимой части спектра, хорошей стойкостью к различным воздействиям окружающей среды, хорошими физико-механическими и электроизоляционными свойствами. Он находится в твердом состоянии при комнатной температуре, а при нагревании размягчается и переходит в вязкотекучее (пластичное) состояние, при охлаждении твердеет и сохраняет способность снова переходить в вязкотекучее состояние. Среди прозрачных полимеров ПММА обладает уникальной атмосферостойкостью, а также устойчивостью к ультрафиолетовому излучению. Благодаря своим свойствам ПММА широко применяется в светотехнике, авиа- и машиностроении, микро- и нанoeлектронике. Благодаря низкой токсичности (биосовместимости) и высокой устойчивости к бактериям ПММА используется в медицине и медицинских исследованиях.

Из-за увеличения вязкости материала при нагреве возникают трудности при механической обработке ПММА. Особенно это заметно при сверлении глубоких отверстий малого диаметра, при формировании пропилов малой ширины или при формировании микроканалов для производства «лабораторий на чипе» («Lab-on-a-Chip»). Для выполнения таких операций можно использовать лазерное излучение видимого или УФ-диапазона, однако, из-за высокой прозрачности материала обработка ПММА возможна только методом абляции высокоинтенсивными лазерными импульсами. В среднем ИК-диапазоне ПММА имеет интенсивные полосы поглощения, а в спектральном диапазоне от 5.6 до 12 мкм практически непрозрачен уже при толщине образца ~1 мм.

Одним из лазерных источников в этом спектральном диапазоне является СО-лазер, работающий на многочисленных фундаментальных колебательно-вращательных переходах молекулы СО в диапазоне длин волн 5-7 мкм. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию особенностей сверления высокоаспектных отверстий субмиллиметрового диаметра в ПММА излучением импульсно-периодического щелевого СО-лазера с ВЧ накачкой.

Характеристики и режимы работы использованного импульсно-периодического щелевого СО-лазера с ВЧ накачкой подробно описаны в [1]. Средняя мощность СО-лазера варьировалась в диапазоне от 5 до 30 Вт.

Эксперименты по сверлению отверстий в ПММА проводились путем фокусировки луча СО-лазера на поверхность образца. При этом изменялись следующие параметры: острота фокусировки (использовались линзы с фокусным расстоянием 300, 200 и 80 мм), смещение образца относительно положения геометрического фокуса линзы и средняя мощность импульсно-периодического лазерного излучения. Показано, что при фокусировке лазерного луча на поверхность ПММА в материале формировался своего рода волновод, по которому происходило дальнейшее распространение лазерного луча, что позволяло сверлить протяженные отверстия с большим аспектным соотношением. При этом, пока продолжалась обработка лазерным излучением, вокруг образовавшегося канала визуально наблюдалась небольшая зона нагрева материала. Однако, образующаяся область нагретого материала вокруг зоны взаимодействия с лазерным излучением была относительно мала из-за низкой теплопроводности ПММА. При более сильном нагреве материал деполимеризуется и выходит из зоны облучения в виде пара или дыма.

При фокусировке, подобранной оптимальным образом (фокусное расстояние линзы F=200 мм, расстояние до поверхности ПММА 215 мм), в ПММА формировался канал практически постоянного диаметра (среднее значение D~0.5 мм) длиной до 40 мм (аспектное отношение ~100) с небольшим уменьшением диаметра к концу канала.

Скорость сверления отверстия в образце, помимо параметров фокусировки, в основном зависела от средней мощности СО-лазера. На рис. 1 представлена зависимость времени сверления отверстия в образце ПММА толщиной 40 мм (с момента включения лазера до момента выхода лазерного луча из образца) от средней мощности лазера при использовании линзы с F=200 мм. Средняя мощность лазера в этих экспериментах изменялась путем изменения параметров импульсов ВЧ разряда накачки (и, соответственно, энергии отдельных лазерных импульсов) при постоянной частоте следования импульсов f=400 Гц.

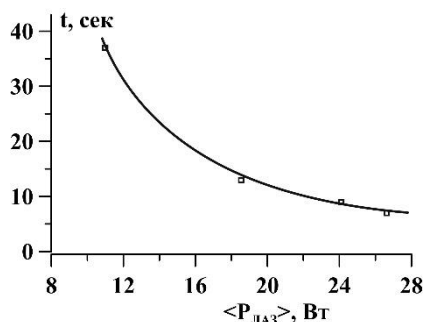


Рис. 1. Время  $t$  сверления сквозного отверстия в образце ПММА толщиной 40 мм в зависимости от средней мощности СО-лазера.

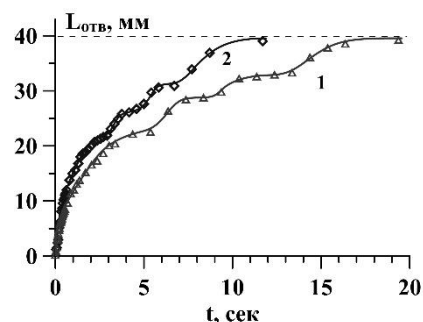


Рис. 2. Динамика образования каналов в образце ПММА при различной средней мощности СО-лазера. Линза с  $F=200$  мм. 1 -  $\langle P_{\text{ЛАЗ}} \rangle = 11.4$  Вт,  $f=500$  Гц; 2 -  $\langle P_{\text{ЛАЗ}} \rangle = 15.6$  Вт,  $f=1000$  Гц.

На рис. 2 показана динамика формирования длины просверленного отверстия  $L_{\text{отв}}$  в образце ПММА для различной средней мощности СО-лазера  $\langle P_{\text{ЛАЗ}} \rangle$  и оптимальных параметров фокусировки. Данные на рис.2 получены путем покадровой обработки видеозаписей процесса лазерного сверления. Средняя мощность лазера варьировалась частотой следования  $f$  импульсов ВЧ разряда накачки (и генерации) СО-лазера при одинаковой длительности импульсов накачки. Неравномерную динамику сверления отверстий можно объяснить накоплением в формирующемся канале частиц испаряемого материала, которые удаляются за счет диффузии в течение достаточно длительного времени (принудительное выдувание/отсос продуктов взаимодействия не осуществлялся). И хотя испаряемый материал имеет относительно низкое поглощение на длинах волн СО-лазера, частицы испаряемого материала внутри канала могут рассеивать лазерное излучение, и этот процесс может иметь волнообразный характер из-за циклического накопления и испускания продуктов вонне канала.

Аналогичные эксперименты по сверлению отверстий в ПММА проводились с использованием СО<sub>2</sub>-лазера, работающего на длине волны 10.6 мкм. В работе применен импульсно-периодический щелевой ВЧ разрядный СО<sub>2</sub>-лазер. Однако сформировать отверстия такой же длины и качества, как в предыдущих экспериментах, при средней мощности лазера, сравнимой с мощностью СО-лазера, не удалось. Кроме того, диаметр получаемых отверстий почти всегда был неравномерным по длине просверливаемого канала.

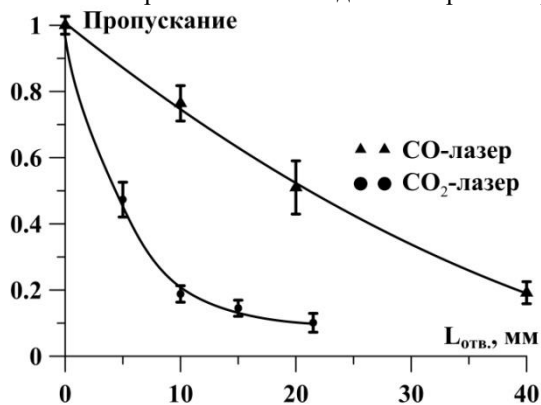


Рис. 3. Пропускания излучения в волноводном канале ПММА для СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров

Неспособность СО<sub>2</sub>-лазера формировать волноводные каналы в ПММА может быть связана с тем, что испаряемый материал имеет полосу поглощения с максимумом вблизи 10.6 мкм. Таким образом, образующиеся в канале пары ПММА сильно поглощают лазерное излучение и не допускают образования глубоких отверстий.

На рисунке 3 показано сравнение пропускания излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в волноводном канале ПММА. Излучение СО<sub>2</sub>-лазера средней мощностью до 6 Вт смогло пройти через пластинку толщиной 22 мм, при установке пластинки 25 мм излучение на выходе не было зарегистрировано. В тоже время излучение СО-лазера средней мощностью до 12 Вт прошло через пластинку 40 мм. Уровень пропускания 0.2 достигается для СО<sub>2</sub>-лазера при длине канала 10 мм, а для СО-лазера при длине канала 40 мм, т.е. в 4 раза длиннее.

Продемонстрировано, что использование излучения СО-лазера (длина волны  $\sim 5.0-5.5$  мкм) для сверления ПММА позволяет получать отверстия с большим аспектным отношением ( $\sim 100$ ) за счет правильного выбора условий фокусировки лазерного луча и средней мощности лазера. Выбор специального режима работы СО-лазера - увеличение мощности лазера со временем, по мере углубления лазерного луча в образец, вероятно, позволит за счет компенсации потерь излучения в волноводе сформировать в ПММА отверстия с еще большим аспектным отношением и постоянным диаметром по всей длине отверстия.

При использовании СО<sub>2</sub>-лазера в тех же условиях получить аналогичные результаты оказалось невозможным из-за существенного различия поглощения ПММА и продуктов его испарения для СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров.

#### Список литературы

1. А.А. Ionin, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, O.A. Rulev, D.V. Sinitsyn, M.V. Ionin, Infrared Physics & Technology, 120 (2022) 103921

И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.А. ИОНИН  
*Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 11.4 МКМ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛАХ SrMoO<sub>4</sub> И LiGaS<sub>2</sub>**

Экспериментально продемонстрировано преобразование chirpированного, растянутого до 200 пс, импульса ближнего ИК-диапазона титан-сапфирового лазера (спектрально ограниченная длительность 90 фс) в средний ИК-диапазон последовательно в ВКР-активном кристалле SrMoO<sub>4</sub> и квадратично нелинейном кристалле LiGaS<sub>2</sub>.

I.O. KINYAEVSKIY, A.V. KORIBUT, L.V. SELEZNEV, YU.M. KLIMACHEV, A.A. IONIN  
*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **GENERATION OF PICOSECOND PULSES WITH A WAVELENGTH OF 11.4 $\mu\text{m}$ BASED ON CONSISTENT FREQUENCY CONVERSION OF A TITANIUM-SAPPHIRE LASER RADIATION IN SrMoO<sub>4</sub> AND LiGaS<sub>2</sub> CRYSTALS**

The frequency conversion of a chirped near-IR titanium-sapphire laser pulse (transform-limited pulse duration of 90 fs) into the mid-IR range consistently in an SRS-active SrMoO<sub>4</sub> crystal and a second-order nonlinear LiGaS<sub>2</sub> crystal is experimentally demonstrated.

Лазерные системы, излучающие импульсы среднего ИК-диапазона ультракороткой (фемто- и пикосекундной) длительности являются уникальным инструментом для экспериментальных исследований в области нелинейной оптики, физики плазмы, создания наноструктур и ряда других. Поэтому в ОКРФ ФИАН ведутся комплексные исследования по разработке методов преобразования ультракоротких импульсов ближнего ИК-диапазона в район длины волны 11 мкм. В текущей работе разработан источник пикосекундных лазерных импульсов с длиной волны излучения 11.4 мкм на основе спектрального преобразования растянутых во времени chirpированных импульсов излучения титан-сапфирового лазера при помощи последовательно применяемых эффектов вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в ВКР-активном кристалле SrMoO<sub>4</sub> и генерации разностной частоты (ГРЧ) в квадратично-нелинейном кристалле LiGaS<sub>2</sub>. Этот лазерный источник является усовершенствованием схемы, ранее продемонстрированной в [1].

В эксперименте использовался титан-сапфировый лазер с длиной волны излучения 0,75 мкм, длительностью импульса 90 фс, энергией импульса до 12 мДж. Лазерные импульсы были растянуты во времени до ~200 пс с помощью «стретчера» на дифракционных решетках и сфокусированы линзой с фокусным расстоянием 1 м. Кристалл SrMoO<sub>4</sub> длиной 10.5 мм был установлен до фокуса лазерного пучка и обеспечивал генерацию стоксового импульса на длине волны ~0.81 мкм за счёт ВКР эффекта. Энергетическая эффективность ВКР преобразования составляла 6%. Основным эффектом, ограничивающим повышение эффективности ВКР преобразования, оказалось нелинейное поглощение в кристалле SrMoO<sub>4</sub>.

Далее за фокусом лазерного пучка был установлен кристалл LiGaS<sub>2</sub> длиной 2 мм в положении, при котором интенсивность излучения была близка к оптическому разрушению его поверхности. Таким образом, в нелинейный кристалл LiGaS<sub>2</sub> направлялось излучения на основной частоте титан-сапфирового лазера (волна накачка) и на сдвинутой при ВКР частоте (сигнальная волна) для их преобразования в средний ИК-диапазон методом ГРЧ. Энергия импульса излучения среднего ИК диапазона с центральной длиной волны 11.4 мкм достигала ~250 нДж, что в 4 раза выше, чем в предыдущей схеме [1]. Ширина спектра на полувысоте составила ~0,14 мкм, что соответствует спектрально-ограниченной длительности импульса ~1 пс. В настоящее время работы по увеличению энергии и эффективности разработанного источника лазерных импульсов среднего ИК-диапазона продолжаются.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10068, <https://rscf.ru/project/22-79-10068/>.

### *Список литературы*

1. Kinyaevskiy I.O., Koribut A.V., Grudtsyn Y.V. and others // Laser Phys. Lett. 2022. Vol. 19, № 9. P. 095403.



МОЖАЕВА М.Д.<sup>1,2</sup>, КОРШУНОВ А.А.<sup>1,2</sup>, ГАРМАТИНА А.А.<sup>2,3</sup>, ГОРДИЕНКО В.М.<sup>2</sup>,  
ДЫМШИЦ Ю.М.<sup>2</sup>, КОЛДАЕВ В.В.<sup>2</sup>, ДЬЯЧКОВА И.Г.<sup>2</sup>, АСАДЧИКОВ В.Е.<sup>2</sup>, МИНАЕВ Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

## **ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ВЫХОД РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА МЕДНУЮ МИШЕНЬ.**

Зарегистрировано рентгеновское излучение с поверхности медной мишени при воздействии остросфокусированного волоконного лазера на нее. Представлены зависимости выхода РИ от энергии и частоты следования импульсов лазера. При увеличении частоты выход РИ сначала возрастает линейно, потом стабилизируется и начинает снижаться. При увеличении энергии импульсов зависимость степени  $\sim 3$  и последующее насыщение.

MOZHAIEVA M.D.<sup>1,2</sup>, KORSHUNOV A.A.<sup>1,2</sup>, GARMATINA A.A.<sup>2,3</sup>, GORDIENKO V.M.<sup>2</sup>,  
DYMSHITS Y.M.<sup>2</sup>, KOLDAEV V.V.<sup>2</sup>, DYACHKOVA I.G.<sup>2</sup>, ASADCHIKOV V.E.<sup>2</sup>, MINAEV N.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National research nuclear university MEPHI (Moscow engineering physics institute)

<sup>2</sup>FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow

<sup>3</sup>SRC "Kurchatov Institute", Moscow

## **THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY OF LASER PULSES ON THE OUTPUT OF X- RAY PHOTONS WHEN EXPOSED TO THE ACUTELY FOCUSED RADIATION OF A FIBER LASER ON A COPPER TARGET**

We registered X-ray radiation from the surface of a copper target when exposed to an acutely focused fiber laser on it. The dependences of X-ray yield on the energy and frequency of laser pulses are presented. As the frequency increases, the X-ray yield first increases linearly, then stabilizes and begins to decrease. With an increase in the pulse energy, the dependence of the degree is  $\sim 3$  and the subsequent saturation.

Для исследования внутренней структуры объектов с помощью рентгеновского излучения (РИ) методом фазо-контрастная рентгенография [1] необходимо создание микрофокусного рентгеновского источника. Перспективным кандидатом является волоконный лазер, работающий с высокой частотой повторения импульсов и низкой энергией в импульсе.

Целью представляемой работы является исследование зависимости выхода рентгеновских фотонов от лазерной энергии и частоты воздействующих импульсов при воздействии излучения фемтосекундного волоконного лазера на медную мишень с целью создания микрофокусного рентгеновского источника.

Установлено, что выход рентгеновского излучения, при воздействии фемтосекундного волоконного лазера ( $\lambda=1030$  нм, максимальная энергия в импульсе 30 мкДж, средняя мощность до 20 Вт, минимальная длительность импульсов 280 фс) в секунду линейно зависит от частоты лазерных импульсов в диапазоне 100-500 кГц, сопровождающееся увеличением лазерной мощности. Затем мощность импульсов стабилизируется. Выход рентгеновского излучения стабилизируется в диапазоне 500 кГц – 1000 кГц, и затем падает при дальнейшем увеличении частоты воздействия импульсов. Стабилизация выхода в диапазоне 500-1000 кГц скорее всего объясняется тем, что падение максимальной энергии в импульсе компенсируется увеличением числа импульсов. Измеренные зависимости от энергии демонстрируют кубическую зависимость при частотах 200-1000 кГц.

При максимальном значении лазерной энергии 30 мкДж и частоте воздействия 500-1000 кГц выход составил 109 фот/с/ в 2пи, что согласуется с данными, получаемыми с помощью миллиджоульных лазерных систем. [2,3].

### *Список литературы*

1. А.П. Петраков // Журнал технической физики, 2003, том 73, вып. 5, С 84-85
2. L. Martin, J. Benlliure., et. al., // Physica Medica 2021. V.82. P.164-166.
- 3 Ivanov, K. A., Gavrilin, I. M., et. al., // Laser Physics Letters, 18(7), 075401.

М.В. ИОНИН<sup>1</sup>, И.О. КИНЯЕВСКИЙ<sup>1,2</sup>, Ю.М. КЛИМАЧЕВ<sup>1</sup>, А.М. САГИТОВА<sup>1</sup>, Н.Н. ЮДИН<sup>2</sup>,  
М.М. ЗИНОВЬЕВ<sup>2</sup>, С.Н. ПОДЗЫВАЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

## ШИРОКОПОЛОСНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СО-ЛАЗЕРА В ПРОСВЕТЛЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ ZnGeP<sub>2</sub>

Исследована широкополосная генерация суммарных частот излучения СО-лазера в просветленном нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub> в двухпроходной схеме. Максимальное значение коэффициента преобразования достигало ~10%.

M.V. IONIN<sup>1</sup>, I.O. KINYAEVSKIY<sup>1,2</sup>, YU.M. KLIMACHEV<sup>1</sup>, A.M. SAGITOVA<sup>1</sup>,  
N.N. YUDIN<sup>2</sup>, M.M. ZINOVEV<sup>1,2</sup>, S.N. PODZYVALOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

## BROADBAND FREQUENCY CONVERSION OF A CO LASER IN AR-COATED NONLINEAR CRYSTAL ZnGeP<sub>2</sub>

Broadband sum frequencies generation of CO laser radiation in an AR-coated nonlinear ZnGeP<sub>2</sub> crystal in a two-pass scheme is studied. The maximum value of the conversion coefficient reached ~10%.

Эксперименты проводились с использованием криогенного СО-лазера низкого давления с накачкой разрядом постоянного тока. В качестве активной среды СО-лазера использовалась смесь He:N<sub>2</sub>:CO:Воздух = 140:11:2:1 при напряжении на трубке 8.5 кВ и токе 7 мА. Давление смеси составляло 7.7 Торр. Резонатор лазера был образован глухим сферическим зеркалом (радиус кривизны R = 9 м) и плоским выходным зеркалом с пропусканием ~25%. Внутри резонатора помещалось плоское полностью отражающее вращающееся зеркало, которое обеспечивало работу лазера в режиме модуляции добротности резонатора. Спектр излучения СО-лазера насчитывал примерно 66 линий в интервале длин волн от 4.9 до 6.2 мкм с максимумом мощности вблизи длины волны 5.2 мкм. Пиковая мощность излучения СО лазера достигала ~4.5 кВт [1].

Для контроля средней мощности излучения его часть (~5%) с помощью плоскопараллельной пластинки из CaF<sub>2</sub> направлялась на сферическое зеркало (R = 1 м). Излучение фокусировалось на измеритель мощности Орпир-3А и фотодетектор (РЕМ1-10.6, временное разрешение 1 нс) для контроля временной формы суммарного по спектру импульса, для чего использовалась пластинка из ВаF<sub>2</sub> (коэффициент отражения ~6.5%). Основная часть излучения (~95%) с помощью линзы через плоское оборотное зеркало (коэффициент отражения R ~ 99% в диапазоне длин волн генерации суммарных частот (ГСЧ) и ~10% в диапазоне длин волн генерации СО-лазера) фокусировалась в нелинейный кристалл ZnGeP<sub>2</sub>. Нелинейный кристалл ZnGeP<sub>2</sub> был выращен и просветлен с обеих сторон в ООО «ЛЮК» (коэффициент пропускания ~85-90% в диапазоне длин волн ГСЧ и ~92-95% в диапазоне длин волн полосы генерации СО-лазера).

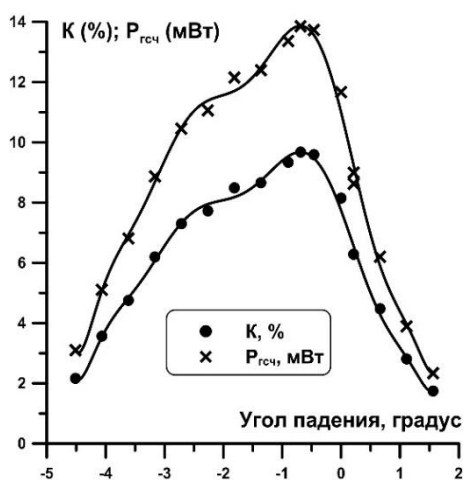


Рис. 1 Зависимости средней мощности ГСЧ (P<sub>ГСЧ</sub>) и коэффициента преобразования (K) от угла падения излучения СО-лазера на кристалл (два прохода прямо α ~ 0°)

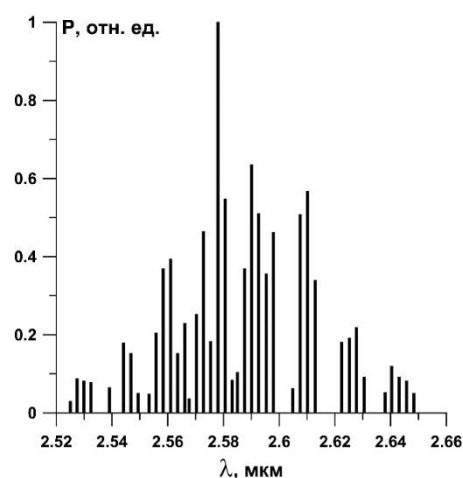


Рис. 2 Спектра ГСЧ (два прохода прямо α ~ 0°)

В эксперименте использовалась двухпроходная схема ГСЧ, когда излучение СО-лазера фокусировалось обратно в кристалл сферическим зеркалом (R = 3 м). При этом луч СО-лазера направлялся либо прямо назад,

либо отклонялся на некоторый угол в горизонтальной плоскости ( $\alpha \sim 1^\circ$ ), но так, чтобы проходить через нелинейный кристалл. Излучение ГСЧ, полученное в результате двух проходов излучения СО-лазера, и часть излучения СО-лазера отражалось обертоном зеркалом в сторону сферического зеркала, а затем, направлялось на измерение характеристик ГСЧ. Кварцевая пластина применялась в качестве спектрального фильтра для отделения излучения суммарных частот от излучения СО-лазера. Измерялись следующие характеристики излучения ГСЧ: форма импульса, средняя мощность и спектр. Для измерения средней мощности и формы импульса излучение ГСЧ отводилось на измеритель мощности Ophir-3A и фотодетектор (PEM-L-3, временное разрешение 0.5 нс) с помощью сферического зеркала ( $R = 0.5$  м) и пластины из  $\text{BaF}_2$ . Для измерения спектра ГСЧ его излучение с помощью зеркал направлялось на вход спектрометра ИКС-31. Отселективное излучение попадало на фотодетектор Thorlabs PDA20H (временное разрешение 35 мкс).

Средняя мощность ГСЧ росла квадратично, а коэффициента преобразования  $K$  (рассчитывался как  $P_{\text{ГСЧ}}/P_{\text{СО}}$ , где  $P_{\text{ГСЧ}}$  – средняя мощность суммарных частот,  $P_{\text{СО}}$  – средняя мощность падающего на кристалл излучения СО-лазера) – линейно с ростом средней мощности падающего на кристалл излучения СО-лазера. На рисунке 1 представлены зависимости средней мощности ГСЧ и коэффициента преобразования от угла падения излучения СО-лазера на кристалл при втором проходе прямо назад. Видно, что максимумы обеих величин достигаются при угле падения равном примерно  $-0.7^\circ$ . Максимальная средняя мощность ГСЧ составила 14 мВт. Данному значению мощности суммарных частот соответствует значение  $K = 9.67\%$ . Для нормального падения коэффициент преобразования был несколько меньше -  $K = 8.15\%$ . Это говорит о том, что угол среза кристалла не совсем совпадает с оптимальным для процесса многочастотного преобразования при некритичном фазовом синхронизме в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$ . На рисунке 2 представлен спектр ГСЧ, полученный в условиях максимальной эффективности преобразования, который содержит 40 линий в диапазоне длин волн от 2.52 мкм до 2.65 мкм.

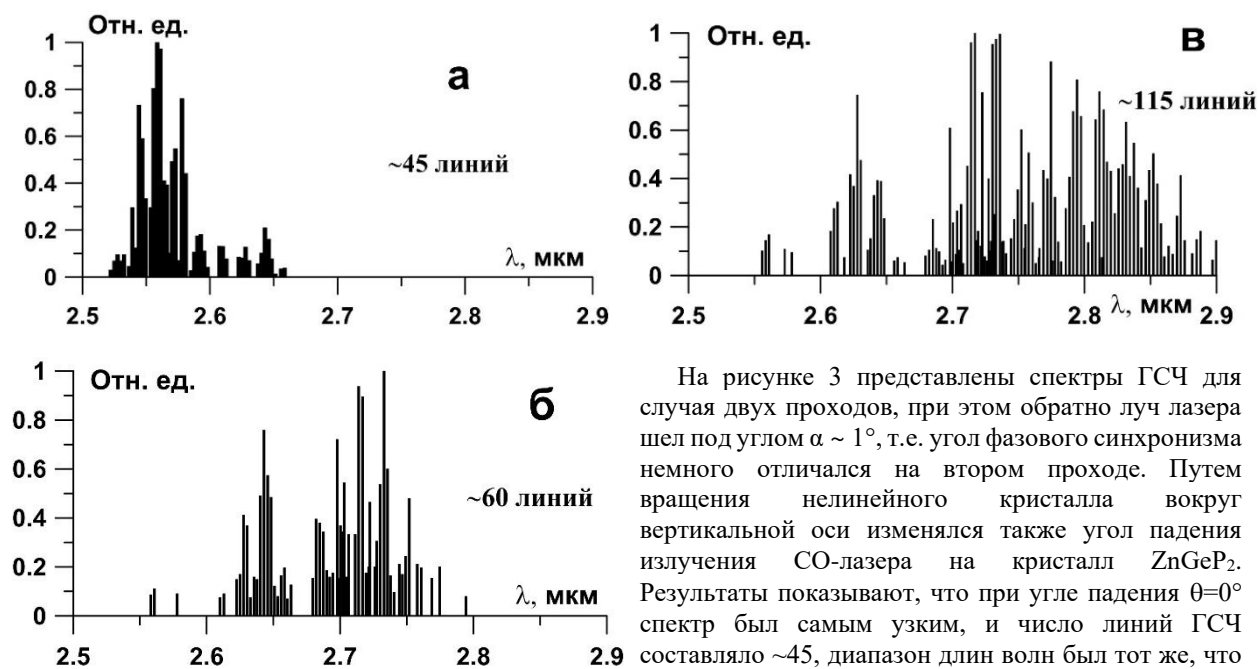


Рис. 3 Спектр ГСЧ (два прохода, обратно под углом  $\alpha \sim 1^\circ$ ), при различных значениях угла падения излучения ( $\theta$ ) СО лазера на кристалл  $\text{ZnGeP}_2$ .

а -  $\theta=0^\circ$ , б -  $\theta=-2.0^\circ$ , в -  $\theta=-4.0^\circ$

На рисунке 3 представлены спектры ГСЧ для случая двух проходов, при этом обратно луч лазера шел под углом  $\alpha \sim 1^\circ$ , т.е. угол фазового синхронизма немного отличался на втором проходе. Путем вращения нелинейного кристалла вокруг вертикальной оси изменялся также угол падения излучения СО-лазера на кристалл  $\text{ZnGeP}_2$ . Результаты показывают, что при угле падения  $\theta=0^\circ$  спектр был самым узким, и число линий ГСЧ составляло  $\sim 45$ , диапазон длин волн был тот же, что и для  $\alpha \sim 0^\circ$  (см. рисунок 2). При угле падения  $\theta=-2.0^\circ$  спектр расширился в длинноволновую область до 2.8 мкм, число линий ГСЧ составляло  $\sim 60$ . При угле падения  $\theta=-4.0^\circ$  спектр расширился в длинноволновую область до 2.9 мкм, число линий ГСЧ составляло  $\sim 115$ .

Таким образом, была исследована широкополосная ГСЧ в просветленном нелинейном кристалле  $\text{ZnGeP}_2$  в двухпроходной схеме, когда излучение СО-лазера фокусировалось обратно в кристалл сферическим зеркалом. Максимальное значение коэффициента преобразования достигало  $\sim 10\%$ . Состав спектра ГСЧ мог регулироваться изменением угла падения излучения СО-лазера на кристалл  $\text{ZnGeP}_2$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20103, <https://rscf.ru/project/22-22-20103/>.

#### Список литературы

1. Андреев Ю.М. и др. // Квантовая электроника. 2013. Vol. 43, № 2. P. 139–143.

А.Г. БОНДАРЕНКО, Г.В. АЛЕКСАН, А.В. ПАЛЕХОВА, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ, Р.А.  
ЗАКОЛДАЕВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

## ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ МИКРОФЛЮИДНОЙ СИСТЕМЫ НА СТЕКЛЕ ДЛЯ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА

Предложена технология CO<sub>2</sub>-лазерной записи микрофлюидной системы на поверхности кварцевого стекла. Микрофлюидная система представляла собой канал глубиной 50±5 мкм, шириной 1±0,1 мм и шероховатостью (S<sub>a</sub>) до 1 мкм. В качестве объектов исследования микрофлюидной системы использовались люминол, коллоидный раствор наночастиц серебра и перекись водорода. Раствор наночастиц серебра позволил усилить сигнал протекающей хемилюминесцентной реакции в чипе в 3 раза. Скорость изготовления микрофлюидного чипа составила 2 минуты.

A.G. BONDARENKO, G.V. ALEXAN, A.V. PALEKHOVA, D.R. DADADZHANOV, R.A.  
ZAKOLDAEV

*ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

## LASER WRITING OF MICROFLUIDIC SYSTEM ON GLASS FOR CHEMILUMINESCENT ANALYSIS OF REACTIVE OXYGEN SPECIES

The technology of CO<sub>2</sub>-laser writing of a microfluidic system on the fused silica surface is proposed. The microfluidic system includes a channel with a depth of 50±5 μm, a width of 1±0.1 mm and a roughness (S<sub>a</sub>) of up to 1 μm. Luminol, colloidal solution of silver nanoparticles and hydrogen peroxide were used as objects of research for the microfluidic system. The solution of silver nanoparticles made it possible to amplify the signal of the ongoing chemiluminescent reaction in the chip by 3 times. The fabrication time of the chip is 2 minutes.

CO<sub>2</sub>-лазерная обработка поверхности кварцевых стекол, является бесконтактным, экологичным и гибким методом создания микроструктур [1]. Управление микрогеометрией поверхности стекла позволяет изготавливать поверхностные микрофлюидные (МФ) системы, которые востребованы в медицине и инженерии. Современные коммерческие CO<sub>2</sub>-лазерные установки с использованием гальванометрических сканаторов могут представлять удобный инструмент для изготовления МФ элементов и систем на поверхности стекол. В частности, мы ранее [2] продемонстрировали реализацию CO<sub>2</sub>-лазерной записи микрофлюидных элементов и систем с возможностью перемещения жидкости со скоростью 4-15 мм/с.

В настоящей работе предложена запись МФ системы для проведения хемилюминесцентного (ХЛ) анализа активных форм кислорода (АФК). Подобный анализ актуален для диагностики окислительного стресса, который вызывается скоплением АФК и приводит к снижению фертильности у мужчин и раку. Несмотря на простоту использования и высокую чувствительность, хемилюминофоры имеют слабую ХЛ из-за низкого квантового выхода. Для преодоления этого недостатка предложено использовать металлические плазмонные частицы. При совпадении плазмонного резонанса наночастиц и полос люминесценции хемилуминофора, происходит усиление излучения за счёт присутствия молекул в сильном ближнем поле вокруг наночастиц.

В данной работе продемонстрировано использование коммерческой лазерной установки "С-Marker" (ООО "Лазерный центр", Россия) для изготовления МФ системы на поверхности кварцевого стекла. В качестве хемилуминофора использовались молекулы люминола. Кинетика ХЛ была измерена счетчиком фотонов H11890 Hamamatsu. В качестве окислителей люминола использовались 15% гипохлорит натрия и 30% пероксид водорода. Спектры оптической плотности получали на спектрофотометре СФ-56 (ЛОМО) в диапазоне длин волн 200–800 нм.

В результате была изготовлена МФ система глубиной 50±5 мкм, шириной 1±0,1 мм и шероховатостью (S<sub>a</sub>) до 1 мкм для снятия оптических откликов сигналов ХЛ. Для получения сигналов оптическая прозрачность материала была сохранена в 70-85% в видимом диапазоне. Было исследовано влияние серебряных наночастиц на ХЛ люминола и выявлено увеличение интенсивности приблизительно в 3 раза при концентрации наночастиц серебра CAgNP = 10<sup>-6</sup> М и концентрации люминола Cлюм = 10<sup>-4</sup> М. При отклонении концентрации серебряных наночастиц как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения интенсивность ХЛ уменьшается.

Авторы выражают благодарность ООО "Лазерный центр" за предоставление необходимого оборудования для проведения лазерной записи. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-71-10103.

### *Список литературы*

1. Perrone E., Cesaria M., Zizzari A., Bianco M., Ferrara F., Raia L., Arima V. *Materials Today Bio.* 2021, V. 12, P. 100163.
2. Бондаренко А. Г., Заколдаев Р., Рамос-Веласкес А. *Оптика и спектроскопия*, 2022, Т. 130, № 9, С. 1405-1409.
3. Chen J., Qiu H., Zhao S. // *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 2020. V. 122, P. 115747.
4. Radi R., Cosgrove T. P., Beckman J. S., Freeman B. A. // *Biochemical Journal.* 1993, V. 290, №. 1, P. 51-57.
5. Dadadzhyanov D. R., Gladkikh I. A., Baranov M. A., Vartanyan T. A., Karabchevsky A. // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2021, V. 333, P. 129453

К.А. ЕГОРОВА, К.А. РОЗАНОВ, А.Д. СИДОРОВА, Ф.А. ГОРЕНСКИЙ, А.Д. АГАРКОВ,  
Д.А. СИНЕВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

## **ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОД СЛОЕМ ГРАФИТОВОГО ПОРОШКА**

В настоящем проекте представлены результаты экспериментального исследования по оптимизации параметров лазерной обработки для регулирования механических характеристик поверхностного слоя металлических образцов. Обработка проводилась под дополнительным слоем графитового порошка, находящегося в сжатых условиях, что привело к образованию на поверхности твердого покрытия. Полученные результаты демонстрируют потенциал для улучшения эксплуатационных характеристик изделий в машиностроении или металлообработке. Кроме того, была протестирована термическая стабильность полученных структур для исследования их пригодности в использовании в высокотемпературных средах.

X.A. EGOROVA, K.A. ROZANOV, A. D. SIDOROVA, F.A GORENSKY, A.D. AGARKOV, D.A.  
SINEV

*ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

## **CHANGING THE MECHANICAL PROPERTIES OF METAL SAMPLES BY LASER TREATMENT UNDER A LAYER OF GRAPHITE POWDER**

This study presents the results of an experimental investigation into the optimization of laser treatment parameters to regulate the mechanical characteristics of the surface layer of metal samples. The treatment was conducted under an additional compressed layer of graphite powder, which resulted in the formation of a solid coating on the surface. The obtained results demonstrate the potential for improving the operational characteristics of products in mechanical engineering or metalworking. Additionally, the thermal stability of the resulting structures was tested to investigate their suitability for use in high-temperature environments.

Лазерная обработка металлических деталей при варьировании параметров лазерного излучения позволяет получить специфические свойства поверхностного слоя, такие как повышенная твердость, износостойкость, лиофильность и коррозионная стойкость, которые необходимы в ряде отраслей промышленности. Кроме того, лазерная обработка обеспечивает точное и контролируемое изменение металлических поверхностей, позволяя получать требуемые характеристики с высокой точностью и воспроизводимостью результатов за короткое время обработки. Таким образом, дальнейшее изучение лазерной обработки металлических деталей обладают огромным потенциалом для разработки более эффективных и устойчивых производственных процессов. Но для выявления потенциала лазерной обработки для улучшения функциональных свойств формируемых поверхностей и обеспечения высокой производительности метода необходимо изучать и искать новые подходы осуществления обработки, например методы структурирования под вспомогательными веществами [1-2].

В настоящем проекте исследуется получение твердого поверхностного покрытия на деталях, сформированных лазерным методом под слоем графитового порошка. Значение твердости зависит от параметров обработки (например, от температуры и давления), так как при воздействии лазерного излучения в приповерхностных слоях металла происходит термохимическая реакция между компонентами, что влияет на итоговое структурно-фазовое состояние металла. Получение твердого покрытия данным методом облегчено путем предварительного окисления поверхностного слоя образца [3].

Таким образом, по результатам исследований была предложена методика обработки с применением вспомогательного покрывного материала, удерживающего графитовый порошок в сжатых условиях для формирования в зоне обработки лазерно-индуцированной микроплазмы [4]. Дополнительно будет проведена оценка термической стабильности металлических образцов, которая является важным шагом в оценке их пригодности для применения при высоких температурах.

Работы выполнены при финансовой поддержке научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения научно-исследовательских работ на базе Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО (конкурс НИР МиА)

### *Список литературы*

1. Damian Janicki The friction and wear behavior of in-situ titanium carbide reinforced composite layers manufactured on ductile cast iron by laser surface alloying // Surface and Coatings Technology, 2021, Vol. 406, 126634
2. Nisar Ali, Shazia Bashir, Umm-i-Kalsoom, et al Effect of liquid environment on the titanium surface modification by laser ablation // Applied Surface Science, 2017, Vol. 405, pp. 298-307.
3. Veiko V.P., Andreeva Y.M., Cuong L., et al. Laser paintbrush as a tool for modern art // Optica, 2021, Vol. 8, No. 5, pp. 577-585
4. В.П.Вейко, С.А.Волков, Р.А.Заколдаев Лазерно-индуцированная микроплазма как инструмент микроструктурирования прозрачных сред// Квантовая электроника. 2017. Т.47, с. 842–848.

К.Ф. ЗНОСКО

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь*

## **МЕХАНИЗМЫ РОСТА ВЫНОСА МАТЕРИАЛА ИЗ ЭРОЗИОННОГО КРАТЕРА ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ**

Показано, что рост выноса материала из эрозионного кратера, при воздействии на металлы парными наносекундными лазерными импульсами, обусловлен высокой температурой (600–700 °С) кратера, который образован первым импульсом в паре. Взаимодействие второго лазерного импульса с «горячей поверхностью кратера», при уменьшении межимпульсного временного интервала до 1 мкс, приводит к росту выноса материала из него практически на порядок.

K.F. ZNOSKO

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus*

## **MECHANISMS OF THE GROWTH OF MATERIAL REMOVAL FROM EROSION CRATER DURING THE TRANSITION TO DOUBLE-PULSE LASER ABLATION OF METALS**

It is shown that the growth of material removal from the erosion crater, when metals are exposed to paired nanosecond laser pulses, is due to the high temperature (600-700 °C) of the crater, which is formed by the first pulse in the pair. The interaction of the second laser pulse with the «hot surface of the crater», when the inter-pulse time interval is reduced to 1 μs, leads to an increase in the material removal from it by almost an order of magnitude.

Интерес к исследованиям по взаимодействию парных лазерных импульсов с веществом обусловлен технологическим прорывом в разработке таких лазеров и заметным снижением их стоимости. Их применение для обработки материалов приводит к росту эффективности самого процесса, увеличению массы аблированного вещества в расчете на единицу затраченной энергии излучения [1–3]. Воздействие на материал парными импульсами приводит к росту интенсивности интегрального свечения эрозионной плазмы и спектральных линий ее атомов и ионов [4–5].

Значительное увеличение выноса материала из эрозионного кратера и интенсивности свечения плазменного факела объяснялось различными физическими механизмами. Например, поглощением второго импульса, самофокусировкой лазерного луча в плазменном факеле от первого импульса. Уменьшение временного интервала между лазерными импульсами в паре приводит к росту абляционного выноса материала из кратера и росту интенсивности свечения эрозионной плазмы [3]. Нагрев образца значительно повышает эффективность лазерной абляции [6].

Экспериментальная установка описана в [7]. YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер, работающий на длине волны 1,06 мкм, мог генерировать как одиночные, так и парные импульсы длительностью ~15 нс, разделенные регулируемым в диапазоне 1–300 мкс временным интервалом. Энергия одиночного импульса могла изменяться от 5 мДж до 40 мДж.

Изучение лазерных кратеров и прошитых отверстий в тонких пластинках из алюминия, меди и нержавеющей стали показало, что кратеры окружает область отожженного металла. Наблюдаются кольцеобразные цвета побежалости, что указывает на то, что пластинки были подвержены действию высокой температуры, которая привела к интенсивному окислению их поверхностей и изменению структуры металла. Диаметры отожженных областей составляли 2–4 диаметра самого кратера. Также видно наличие слабых брустверов, окружающих кратеры, и микрокапельные выбросы, которые образованы расплавленным металлом вытесненным давлением плазменного облака.

При лазерной абляции одиночными импульсами Ni-Cr сплава нагретого до ~1000°С вынос материала возрастал в ~3,5 раза. Это показывает, что температура объекта, на который фокусируется лазерное излучение, значительно влияет на эффективность взаимодействия лазерного излучения с ней и вынос материала из эрозионного кратера.

Оценка температуры в эрозионном кратере осуществлялась сравнением интенсивностей ряда спектральных линий никеля, хрома и их ионов эрозионной плазмы, образованной одиночными импульсами на нагретом образце Ni-Cr сплава, с интенсивностями этих же спектральных линий эрозионной плазмы, образованной парными импульсами на том же самом образце, но находящемся при комнатной температуре. Получено, что температура эрозионного кратера через 1 мкс после воздействия первого лазерного импульса находится в диапазоне 600–700 °С.

Важным фактором, влияющим на рост эффективности взаимодействия лазерного излучения с «горячей поверхностью» является то, что она обладает более высокой поглощающей способностью лазерного излучения. Это приводит к тому, что падающее лазерное излучение значительно слабее отражается от горячей поверхности.

### *Список литературы*

1. Sattman R, Sturm V., Noll R. // Journal of Physics D: Applied Physics. 1995. Vol. 28, No. 10. P. 2181–2187.
2. Першин С.М. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 63–67.

КУТЛУБУЛАТОВА И.А.<sup>1,2</sup>, ИВАНОВ Д.С.<sup>1,2</sup>, ЛУКАШЕНКО С.Ю.<sup>1</sup>, ГРИГОРЬЕВА М.С.<sup>1,2</sup>,  
ЗАВЕСТОВСКАЯ И.Н.<sup>1,2</sup>

*1 ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 г. Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53*

*2 ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31*

## **ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ АБЛЯЦИИ КРЕМНИЯ, ОБЪЕДИНЯЮЩАЯ МЕТОДЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ**

В работе представлены результаты по моделированию абляции кремния в рамках гибридной модели, объединяющей методы молекулярной динамики и двухтемпературной модели. Определен порог плавления и механизм абляции кремния.

KUTLUBULATOVA I.A.<sup>1,2</sup>, IVANOV D.S.<sup>1,2</sup>, LUKASHENKO S.YU.<sup>1</sup>, GRIGORYEVA M.S.<sup>1,2</sup>,  
ZAVESTOVSKAYA I.N.<sup>1,2</sup>

*1 P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*2 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **HYBRID MODEL OF SILICON ABLATION COMBINING THE METHODS OF MOLECULAR DYNAMICS AND TWO-TEMPERATURE MODEL**

The results of modeling silicon ablation using a hybrid model that combines the methods of molecular dynamics and the two-temperature model are presented. The melting threshold and the mechanism of silicon ablation are determined.

Наиболее перспективным методом производства чистых и не токсичных наночастиц кремния является метод лазерной абляции, позволяющий получить узкое распределение наночастиц по размерам как в воздухе, так и в коллоидных растворах. Метод лазерной абляции широко используется как для структурирования подложек, так и синтеза наночастиц [1-2].

В представленной работе было проведено моделирование лазерной абляции кремниевой мишени при облучении короткими лазерными импульсами с помощью гибридной модели, объединяющей методы молекулярной динамики и двухтемпературной модели (МД-пДТМ). Определен порог плавления подложки кремния после ее облучения 270 фс лазерным импульсом на длине волны 800 нм. Рассчитанный в ходе моделирования порог плавления кремниевых подложек соответствует значению близкому к 0.32 Дж/см<sup>2</sup>. Использование гибридной модели позволило выявить механизмы абляции кремния короткими лазерными импульсами. Установлено, что в отличие от металлов, где наблюдается два механизма лазерной абляции: фазовый взрыв и спалляция (откол), последний полностью подавлен в случае кремниевой мишени. Это позволяет использовать лазерные режимы с ультракороткими импульсами и большей плотностью потока лазерного излучения для эффективного производства наночастиц кремния, так как оставляют нуклеацию его паров как единственный механизм их формирования, а плотность потока лазерного излучения как единственный параметр, ответственный за средний размер получаемых наночастиц.

Разработанный численный подход, реализованный в модели МД-пДТМ, является перспективным методом для выявления механизмов плавления облученных мишеней кремния, с учетом их динамически изменяющихся термодинамических параметров: давления, температуры и плотности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00861.

### *Список литературы*

1. P. Blandin, et al. J. Mater. Chem. B (2013) Vol.1, pp. 2489–2495
2. M. B. Gongalsky, et al, Sci. Rep. (2016) Vol. 6, p. 24732



## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ В ВАЛИКАХ БРОНЗЫ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В статье исследуется влияние режимов лазерной наплавки на изменение микротвердости в валиках бронзы. Показано, что изменения скорости и дистанции наплавки вызывают заметные изменения средней микротвердости материала валиков.

M.A. KARDAPOLOVA, N.I. LUTSKO, L.I. PILETSKAIA  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

## MICROHARDNESS FORMATION BEHAVIORS IN BRONZE TRACKS, DEPOSITED BY LASER CLADDING

The article investigates the influence of laser cladding regimes on the change in the bronze tracks microhardness. It is shown that changes in the speed and distance of cladding cause noticeable changes in average microhardness of the tracks material.

Лазерная наплавка является быстроразвивающейся технологией упрочнения-восстановления поверхностей. Покрытия, полученные лазерной наплавкой, имеют небольшой размер зерна, низкую степень диффузии, меньшее количество дефектов, они характеризуются высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью [1].

В данной работе исследовалось влияние режимов лазерной наплавки на среднюю микротвердость в валиках из бронзы ПГ-19М-01. Валики наносились на образцы из стали 45 на установке, оснащенной непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером. Наплавка выполнялась при мощности 1000 Вт с различными скоростями и дистанциями наплавки. Микротвердость исследовали по глубине валиков с шагом 0,05 мм на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

Были определены средние величины микротвердости и построены графики изменения микротвердости от скорости наплавки (рис. 1) и дистанции наплавки (рис. 2). При малых скоростях наплавки и, соответственно, большом энергокладе, в валиках из бронзы ПГ-19М-01 образуется достаточно крупнозернистая структура с низкой микротвердостью. С ростом скорости наплавки и уменьшением энергоклада в валики, величина зерна уменьшается, а микротвердость растет. При скорости наплавки 250 мм/мин формируется оптимальная зернистость структуры и наблюдается максимальная микротвердость. С увеличением скорости наплавки из-за уменьшения энергоклада в покрытие в нем создаются условия неполного сплавления материала валиков по границам зерен и микротвердость уменьшается.

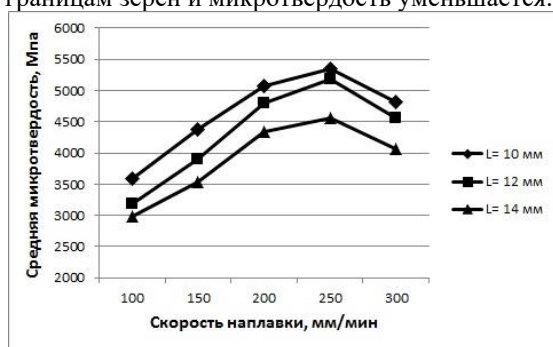


Рис. 1. Зависимость микротвердости от скорости наплавки

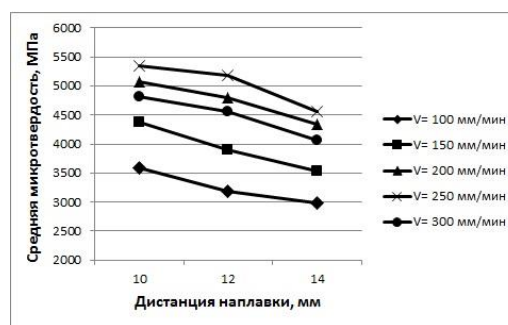


Рис. 2. Зависимость микротвердости от дистанции наплавки

С увеличением дистанции наплавки изменяется положение фокуса лазерного излучения относительно покрытия и основы и условия поглощения энергии лазерного излучения. При дистанции 10 мм (фокус в материале основы), основа проплавляется максимально, диффузия железа из основы в валик из бронзы большая, а микротвердость валика имеет максимальное значение. При дистанции 12 мм (фокус на поверхности основы) степень проплавления основы уменьшается, меньше железа попадает в валик, микротвердость валика из бронзы снижается. При дистанции 14 мм (фокус в покрытии), основа проплавляется минимально, уменьшается диффузия железа в валик, микротвердость валика из бронзы имеет низкое значение.

### Список литературы

1. Naghiyan Fesharki, M. Microstructure investigation of Inconel 625 coating, obtained by laser cladding and TIG cladding methods [Электронный ресурс]/ M. Naghiyan Fesharki, R. Shoja-Razavi, H.A. Mansouri, H. Jamali// Surface & Coating Technology. – 2018. – V. 353. – P. 25-31. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.061>.

## ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ СЛОЕВ САМОСВЯЗАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ ИЗ ТОНКОДИСПЕРСНОСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ СТЫКОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ГЕРМЕТИЗАЦИИ И СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЙ

Исследованы возможности спекания одного или нескольких слоев из самосвязанного карбида кремния методом нагрева слоя на поверхности образцов с помощью непрерывного лазерного излучения. Слои наносились как на поверхность образцов, так и между ними. Слои отличались размерами входящих в шихту частиц. При этом в экспериментах не использовались высокотемпературные нагревательные печи. Качество нанесенных слоев оценивалось несколькими физическими методами при наличии и отсутствии в образцах свободного кремния.

S. A. LYSENKO, N. N. YURYSHEV, N.P. VAGIN  
*P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

## LASER SINTERING OF SELF-BONDED SILICON CARBIDE LAYERS FROM FINE COMPONENTS FOR JOINING SURFACES, SEALING, AND CREATING COATINGS

The possibilities of sintering one or more layers of self-bonded silicon carbide by heating the layer on the sample surface with the help of continuous laser radiation have been studied. The layers were deposited both on the surface of the samples and between them. The layers differed in the sizes of the particles included in the mixture. At the same time, high-temperature heating furnaces were not used in the experiments. The quality of the deposited layers was evaluated by several physical methods in the presence and absence of free silicon in the samples.

В экспериментах по лазерному спеканию нескольких слоев из самосвязанного карбида кремния у отдельных образцов [1] в качестве прослоек были опробованы варианты шихты из тонкодисперсных компонентов для создания более качественного контакта между частицами первичного и вторичного SiC в месте стыковки двух поверхностей. Область спекания определяется размером лазерного пятна площадью в 25 мм<sup>2</sup>.

Методом реакционного спекания [2] были осуществлены стыковки ранее полученных образцов из самосвязанного карбида кремния через тонкую прослойку. Также на поверхности образцов наносились покрытия из одного или нескольких последовательно спеченных слоев. Толщина и состав каждого спекаемого слоя могли меняться в зависимости от решаемой задачи. На фотографиях представлены виды 2-х образцов, полученных лазерным спеканием, после их травления в смеси кислот для удаления свободного кремния.

Тонкие слои шихты, наносимые на ранее изготовленные образцы из самосвязанного SiC, позволяют соединять их выровненные поверхности. В перспективе это может оказаться полезным при стыковке или герметизации изделий с тонкими стенками, при заделке небольших швов или трещин, а также использоваться для уменьшения шероховатости поверхностей или при нанесении покрытий у изделий из других типов карбида кремния [3].

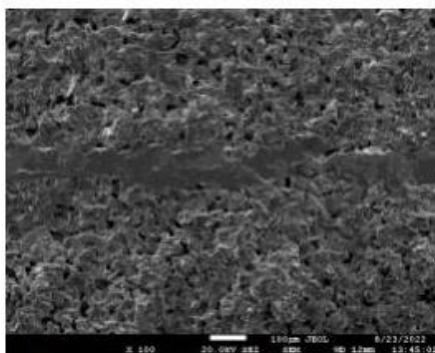


Рис. 1 Вид излома стыковки 2 образцов SiC через тонкодисперсную прослойку

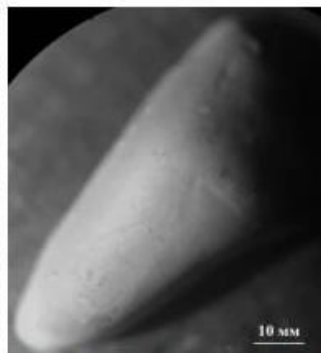


Рис. 2 а) Вид поверхности образца SiC с нанесенным на нее покрытием

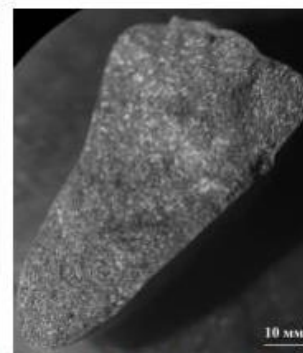


Рис. 2 б) Вид излома этого же образца SiC с покрытием

### Список литературы

1. N P Vagin, S A Lysenko and N N Yuryshev, Laser sintering of Si-SiC composite layers, 2021 Journal of Physics: Conference Series 2036 012036 doi:10.1088/1742-6596/2036/1/012036
2. Гнесин Г.Г., Карбидокремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 216 с.
3. Шикунов, В.Н. Курлов С.Л., Получение композиционных материалов на основе карбида кремния силицированием углеродных матриц, Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 12

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Исследовано влияние теплового воздействия от лазерного фемтосекундного излучения при лазерной абляции материалов. Проведена оценка степени вклада кинетической энергии в область обработки в зависимости от режима воздействия, установлены наиболее эффективные режимы воздействия при синтезе частиц.

A.V. KHARKOVA, D.A. KOCHUEV, K.S. KHORKOV

Vladimir State University A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia

## STUDY OF THE HEATING OF A MATERIAL DURING FEMTOSECOND LASER EXPOSURE

The effect of thermal exposure from laser femtosecond radiation during laser ablation of materials has been studying. The assessment of the degree of contribution of kinetic energy to the treatment area depending on the mode of exposure was carrying out, the most effective modes of exposure in the synthesis of particles were established.

В настоящее время одним из перспективных методов получения наноматериалов является метод лазерной абляции, который позволяет получать сферичные гранулы в достаточно узком диапазоне размеров [1-2]. При этом, данный метод также может способствовать образованию ванн расплава и брызг на поверхности материала вследствие образования лазерно-индуцированной плазмы и ее разогрева, что требует определенного контроля режимов воздействия.

В работе представлен эксперимент по измерению теплового вклада при лазерной фемтосекундной абляции. Эксперимент был проведен в вакуумной камере, давление газа (аргона) варьировалось от 2 до 20 Бар. Мощность излучения составляла 1 Вт. Длина волны излучения – 1030 нм, время импульса – 280 фс. В качестве образца была использована нержавеющая сталь марки AISI 304. Температура измерялась при помощи телевизионной камеры.

Эксперимент был проведен в двух режимах воздействия – точечном и сканирование излучением. В ходе проведенных экспериментов было обнаружено, что при точечном воздействии температура нагрева была значительно выше, данный факт так объясняется образованием канавок на поверхности образца, за счет чего увеличивается и площадь обработки, энергия излучения теряется из-за расфокусировки лазерного луча. Данный факт приводит к тому, что процесс абляции теряет свою эффективность. Более низкие температуры были зафиксированы при сканировании лазерным лучом. На рисунке 1 представлена зависимость температуры нагрева материала от количества лазерных импульсов при различной скорости сканирования лучом, количество импульсов не изменялось и составляло 100 000. Из-за высоких скоростей обработки эффективного разогрева поверхности не происходит, образованные частицы покидают место обработки практически беспрепятственно.

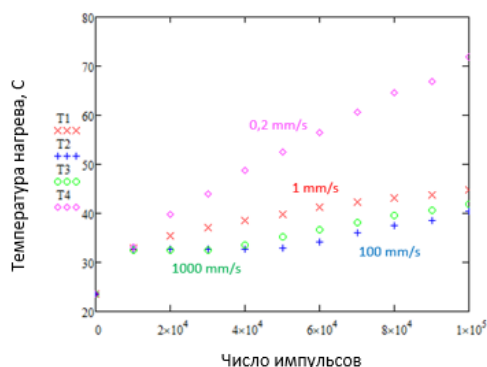


Рис. 1. Зависимость температуры нагрева от времени воздействия при сканировании лазерным лучом

Важным являлось установление влияния степени нагрева материала на эффективность процесса абляции, было установлено, что эффективность процесса была более низкая с увеличением вклада тепловой энергии в область обработки за счет вклада энергии от лазерно-индуцированной плазмы, что приводило к образованию зоны расплава.

### Список литературы

1. Kostyukov, A. I., Snytnikov, V. N., Yelisseyev and others // Adv. Pow. Tech. 2021. Vol 32, №8, P. 2733–2742.
2. Voznesenskaya A., Kireev A., Ivashchenko A // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299, P. 205–209.

В.А. НОВИКОВ<sup>1,2</sup>, Г.В. ГУСЕВА<sup>1</sup>, С.И. ЯРЕСЬКО<sup>1,2</sup>

1 - Самарский филиал ФИАН, Самара, Россия

2 - Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ

Рассмотрены структурные превращения, протекающие при локальном лазерном воздействии на поверхность быстрорежущих сталей повышенной теплоустойчивости. Проведены исследования структуры зон, возникающих вследствие наличия градиента температур в материале образца, изучено влияние параметров процесса лазерной обработки на глубину проникновения температуры и характер структурных превращений в материале

V.A. NOVIKOV<sup>1,2</sup>, G.V. GUSEVA<sup>1</sup>, S.I. YARESKO<sup>1,2</sup>

1 - Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

2 - Samara State Technical University, Samara, Russia

## STRUCTURAL CHANGES DURING LASER MODIFICATION OF STEELS WITH INCREASED HEAT RESISTANCE

Structural transformations occurring under local laser action on the surface of high-speed steels of increased heat resistance are considered. The structure of zones arising due to the presence of a temperature gradient in the sample material has been studied, the influence of the laser treatment parameters on the depth of temperature penetration and the nature of structural transformations in the material has been studied.

Изучение процессов, протекающих при упрочнении инструментальных сталей и сплавов методами локального термического воздействия, является актуальной проблемой в современном машиностроении. Одним из способов повышения прочности, теплоустойчивости, износостойкости, триботехнических свойств контактирующих поверхностей, надежности и долговечности металлообрабатывающего инструмента является локальная лазерная закалка [1, 2]. Однако проведение лазерной закалки на быстрорежущих сталях может приводить к частичному разупрочнению материала, поэтому выбор режима обработки является основной задачей для получения требуемого результата. В настоящей работе проведены исследования влияния скорости сканирования (от 2 до 10 мм/с) и мощности (от 60 до 100 Вт) лазерного излучения на формирование структурных зон в поверхностном слое, микроструктуры данных зон и твердости закаленного материала быстрорежущих сталей ЭП657 (P12Ф2К8М3) и ЭП722 (P9М4К6С). По результатам проведенных экспериментов выявлено, что лазерная обработка предварительно закаленных инструментальных сталей ЭП657 и ЭП722 приводит к появлению в структуре материала следующих характерных зон (рис. 1): зоны оплавления (зоны переплава), характеризующейся ячеистой структурой (рис. 1б); зоны закалки, которая отличается укрупненным зерном и частичным растворением карбидов; переходной зоны (рис. 1в), где выявлено наличие избыточной карбидной фазы и зоны основного материала. Проведение лазерного упрочнения привело к незначительному изменению твердости материала на глубинах до 300 мкм, что указывает на отсутствие термического разупрочнения закаленного материала.

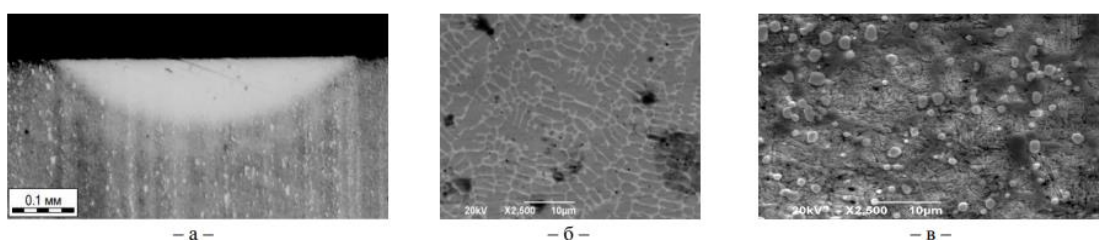


Рис. 1. Микроструктура материала инструментальной стали ЭП657 после лазерной обработки: а – внешний вид с характерными зонами, в – микроструктура зоны оплавления, б – микроструктура переходной зоны

Проведенные исследования позволили установить механизм упрочнения и выявить оптимальный режим лазерной обработки быстрорежущих сталей ЭП657 и ЭП722, при котором обеспечивается повышение механических характеристик поверхностного слоя без появления деструктивных изменений в структуре материала и снижения прочности в глубинных слоях.

### Список литературы

1. Токарев Д.И., Дроздов А.А., Морозов Е.А. и др. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т.21, №4. – С.34-41. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.04
2. Козаков А.Т., Ярьеско С.И., Сидашов А.В. Модификация и анализ поверхности сталей и сплавов. – Ростов н/Д: Изд-во ФГБОУ ВПО РГУПС, 2015. – 378с.

## **ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗНАЧЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ШЕРОХОВАТОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛЕЙ ШХ15 И 40ХН2МА**

В работе рассмотрены конструкционные стали 40ХН2МА, ШХ15 обработанные методом ударного лазерного упрочнения. Получены результаты остаточных напряжений на поверхности материала. Исследовано влияние ударного лазерного упрочнения на шероховатость и микротвёрдость.

A.K. KUTUKOV, R.V. SMIRNOV, E.A. PEGANOV, I.S. MAKOGON, M.A. MILLER  
JSC «SSC RF TRINITI», Moscow, Russia

## **THE INFLUENCE OF LASER SHOCK PROCESSING (LSP) ON RESIDUAL STRESS VALUES, ROUGHNESS AND MICROHARDNESS IN THE SURFACE LAYER OF STEELS SHKH15 AND 40KHN2MA**

In this paper considers structural steels 40KHN2MA, SHKH15 processed by laser shock peening. The results of residual stresses were obtained on the surface of the material. The effect of laser shock peening on roughness and microhardness has been studied.

Остаточные напряжения (ОН), относящиеся к механо-физико-химическим характеристикам поверхностного слоя одновременно с механическими свойствами, фазовым и химическим составом, определяют способность материала выдерживать нагрузки. ОН могут быть как положительными, так и отрицательными. Самое негативное влияние оказывают растягивающие остаточные напряжения. При эксплуатации изделий наведенные сжимающие ОН могут приводить к повышению порога усталостной прочности на 35-50%. Сжимающие ОН, способные увеличивать порог усталостной прочности [1], составляют основную задачу материаловедения. При этом разработанная технология, позволяющая увеличить сжимающие напряжения, одновременно не должна ухудшать прочностные характеристики твердости и значения шероховатости. Для существующих технологий обработки материалов увеличение твердости и сжимающих ОН без изменения шероховатости поверхности является сложно реализуемой задачей [2]. Лазерная ударная обработка (ЛУО) позволяет решить упомянутую проблему. Главным преимуществом лазерной ударной обработки (ЛУО) перед другими механическими методами обработки заключается в отсутствии прямого воздействия лазерного излучения на поверхность обрабатываемого материала, что не позволяет изменить качество поверхности. Отсутствие значительного термического влияния позволяет избежать образования градиентных термонапряжений. По причине высокой эффективности данный упрочняющий метод обработки освоен и широко применяется за рубежом во многих отраслях промышленности [3].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния режимов ЛУО на ОН, микротвердость и шероховатость поверхностного слоя конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА. Выбранные марки сталей относятся к недорогим и широко распространённым материалам из которых изготавливают ответственные изделия такие как подшипники, бурильные замки и т.д. К данным изделиям предъявляются высокие требования как к твердости поверхностного слоя, так и к порогу усталостной прочности.

Исследования наведенных напряжений проводились методом дифрактометрии на многофункциональном рентгеновском дифрактометре ДРОН-8. Микротвердость образцов до и после обработки определялась методом Виккерса. С помощью конфокальной микроскопии контролировалось изменение шероховатости поверхности после обработки.

В ходе работы определены оптимальные режимы обработки образцов, которые определяются плотностью мощности лазерного излучения, при которых в поверхностном слое ШХ15 и 40ХН2МА образуются максимальные значения сжимающих ОН и без изменения величин шероховатости и микротвердости.

Результаты работы показывают практическую значимость метода ЛУО и указывают на необходимость его дальнейшего развития в России.

### *Список литературы*

1. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д.Вишняков, В.Д.Пискарев.– М.: Металлургия, 1989.– 254 с.
2. Gujba A.K., Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening // Materials. 2014. Vol. 7, iss. 12. P. 7925–7974.
3. Новиков, И. А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор) / И. А. Новиков, Ю. А. Ножницкий, С. А. Шибяев // Авиационные двигатели. – 2022. – № 2(15). – С. 59-82. – DOI 10.54349/26586061\_2022\_1\_59. – EDN ZVZZHF.

Д.С. СТЕПАНЮК, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ, В.А. ШКУРАТОВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

## ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЛАВЛЕНОМ КВАРЦЕ ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛИМП

Настоящий доклад посвящен исследованию процесса изготовления фазовых оптических элементов на плавленном кварце с помощью технологии лазерно-индуцированной микроплазмы. В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований по выявлению основных факторов в технологии ЛИМП, определяющих воспроизводимость результатов структурирования поверхности плавленного кварца, обеспечивающих высокую эффективность преобразования энергии ФОЭ и качества ее функционирования. Экспериментальные исследования позволили установить, что к основным факторам при реализации ЛИМП относятся плотность мощности излучения, длительность импульсов, частота следования импульсов, скорость сканирования и коэффициент перекрытия. Также было установлено, что не менее важную роль при изготовлении ФОЭ играет однородность плотности по поверхности графитовой пластины.

D.S. STEPANYUK, G.K. KOSTYUK, A.A. PETROV, V.A. SHKURATOVA  
*ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*

## MANUFACTURING OF PHASE OPTICAL ELEMENTS ON FUSED QUARTZ BY LIMP TECHNOLOGY

This report is devoted to the study of the manufacturing process of phase optical elements on fused quartz using laser-induced microplasma technology. The report presents the results of experimental studies to identify the main factors in LIMP technology that determine the reproducibility of the results of structuring the surface of fused quartz, ensuring high efficiency of the conversion of the energy of PHE and the quality of its functioning. Experimental studies have made it possible to establish that the main factors in the implementation of LIMP include the radiation power density, pulse duration, pulse repetition frequency, scanning speed and overlap coefficient. It was also found that uniformity of density over the surface of the graphite plate plays an equally important role in the manufacture of FOE.

В настоящее время значительное внимание уделяется созданию скалярных вихревых пучков с орбитальным угловым моментом [1]. Подобное внимание обусловлено тем, что для таких пучков со спиральным волновым фронтом характерно кольцевое распределение интенсивности, в котором интенсивность центральной части на оси пучка стремится к нулю [2]. Одним из основных фазовых оптических элементов, используемых для создания подобных пучков, является спиральная фазовая пластина (СФП), в каждом из секторов которой за исключением первого глубина травления увеличивается от сектора к сектору, обеспечивая сдвиг фазы от 0 в первом секторе до  $2\pi$  в последнем [3]. Не менее важное внимание уделяется мультиплицированию Гауссовых пучков, реализуемых с применением МБФП, состоящей из последовательности равного количества вытравленных секторов на глубину, обеспечивающую сдвиг фазы в  $\pi$ , то есть  $h = \lambda 2(n-1)$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $n$  – показатель преломления плавленного кварца для данной длины волны, и невытравленных секторов [4]. Оба фазовых оптических элемента, СФП и МБФП, могут быть изготовлены технологией ЛИМП. Перед изготовлением и СФП, и МБФП были выбраны и проанализированы основные факторы в ЛИМП, обеспечивающие воспроизводимость результатов структурирования поверхности плавленного кварца, обеспечивающих высокую эффективность преобразования энергии ФОЭ и качество их функционирования. Экспериментальные исследования позволили установить, что к основным факторам в реализации технологии ЛИМП относятся плотность мощность излучения  $q$ , длительность импульсов  $\tau$ , частота следования импульсов  $\nu$ , скорость сканирования  $v$  и коэффициент перекрытия  $p$ , определяемый как  $p = 1 - v/\nu d$ , где  $d$  – диаметр лазерного пучка в плоскости контакта плавленного кварца и пластины прессованного графит. Также было установлено, что не менее важную роль при изготовлении ФОЭ технологией ЛИМП имеет однородность плотности графитовой мишени. Качество структурирования поверхности плавленного кварца оценивалось на контактом профилометре Hommel Tester T8000 с разрешением по высоте  $\pm 10$  нм и на оптическом микроскопе в технике дифракционноинтерференционного контраста. Эффективность преобразования энергии СФП и МБФП и качество их функционирования оценивались в схеме тестирования с Nd:YAG лазером с  $\lambda = 1,06$  мкм.

### *Список литературы:*

1. Yao A. M., Padgett M. J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // *Advances in Optics and Photonics*. – 2011. – Т. 3. – №. 2. – С. 161-204.
2. Haming Wei et al. 3D printing of micro-optic spiral phase plates for the generation of optical vortex beams // *IEEE Phot. Tech. Lett.* – 2019. – Т. 31. – №. 8. – С. 599-602.
3. Khonina S. N. et al. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates // *Sci. Rep.* 2018 Vol. 8 (1). P. 1-11.
4. Kostyuk G. K. et al. Multisector binary phase plates on fused silica for generation of optical vortex beams superposition: Fabrication, characterization, and applications // *Opt. Laser. Technol.* 2022. Vol. 152. N. 108161



## ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ В КРИСТАЛЛЕ SrMoO<sub>4</sub> ПРИ НАКАЧКЕ 300-ФС ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 515 НМ

Рассмотрено уширение спектра 300-фс лазерных импульсов на длине волны 515 нм в кристалле SrMoO<sub>4</sub>. Совместное действие фазовой самомодуляции и вынужденного комбинационного рассеяния приводит к эффективной генерации на модах спектра спонтанного рассеяния кристалла  $\nu_2=327$  см<sup>-1</sup> и  $\nu_1=888$  см<sup>-1</sup> с эффективностью ~60% и ~6% соответственно. Из зависимости уширения спектра от энергии лазерного импульса получено значение нелинейного показателя преломления  $6,8 \times 10^{-16}$  см<sup>2</sup>Вт<sup>-1</sup>.

A.V. KORIBUT, I.O. KINYAEVSKY, V.I. KOVALEV, A.A. IONIN  
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## STIMULATED RAMAN SCATTERING IN SrMoO<sub>4</sub> CRYSTAL UPON PUMPING 300-FS LASER PULSES AT A WAVELENGTH OF 515 NM

The spectrum broadening of 300-fs laser pulses at a wavelength of 515 nm in a SrMoO<sub>4</sub> is studied. The joint action of self-phase modulation and stimulated Raman scattering leads to efficient generation on the modes of the spontaneous scattering spectrum  $\nu_2=327$  cm<sup>-1</sup> and  $\nu_1=888$  cm<sup>-1</sup> of the crystal with an efficiency of ~60% and ~6%, respectively. From the dependence of the spectrum broadening on the laser pulse energy, the value of the nonlinear refractive index of  $6.8 \times 10^{-16}$  cm<sup>2</sup>W<sup>-1</sup> was obtained.

В работе [1] показано, что для 15-пс лазерных импульсов пороги ВКР генерации в кристаллах BaWO<sub>4</sub> (BWO) и SrMoO<sub>4</sub> (SMO) примерно равны, хотя коэффициенты ВКР усиления различны, что обусловлено различной шириной ВКР линии. Для ультракоротких импульсов, когда длительность импульса меньше времени дефазировки колебаний среды, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) проходит в нестационарном режиме с эффективностью на уровне 1%. В работе [2], для 300-фс лазерных импульсов была получена аномально высокая эффективность ВКР генерации в кристалле BWO, что было вызвано конструктивной интерференцией фазовой самомодуляции (ФСМ) и ВКР. Целью данной работы было исследование кристалла SMO в данном режиме, так как по сравнению с кристаллом BWO обладает меньшим временем дефазировки колебаний среды, что может значительно сказаться на эффективности ВКР генерации для ультракоротких импульсов.

Как и в [2] использовалось излучение лазера Satsuma (Amplitude Systemes) с параметрами: длительность 300 фс (FWHM), центральная длина волны 515 нм, диаметр 1,7 мм ( $1/e^2$ ), энергия до 2,7 мкДж (изменение за счет отстройки кристалла второй гармоники от синхронизма), частота повторения 1 кГц. Излучение фокусировалось в образец SMO толщиной 11 мм с помощью линзы с фокусным расстоянием 35 мм. Геометрический фокус находился в центре кристалла. За кристаллом устанавливалась линза с фокусным расстоянием 90 мм, которая фокусировала излучение на входную щель спектрометра (Avesta-150 FT). При увеличении энергии лазерных импульсов наблюдалось симметричное уширение спектра в отличие от кристалла BWO [2]. При энергии ~190 нДж уширение спектра достигало сдвига 300 см<sup>-1</sup>, и при последующем повышении энергии наблюдалось усиление компоненты со сдвигом соответствующему  $\nu_2=327$  см<sup>-1</sup>, а затем спад. Максимум эффективности генерации (~60%) достигался при энергии ~300 нДж. При энергии ~1 мкДж уширение спектра совпало со сдвигом сильнейшей ВКР моды  $\nu_1=888$  см<sup>-1</sup> и при последующем повышении энергии наблюдалось ее усиление. При энергии 2,7 мкДж достигался максимум эффективности преобразования и эффективность составила ~6% (рис. 1).

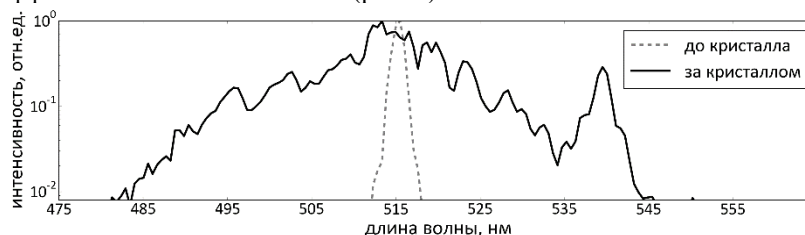


Рис. 1. Спектры излучения до и после кристалла SMO при энергии лазерного импульса 2,7 мкДж

В работе получен режим конструктивной интерференции ВКР и ФСМ для 300-фс лазерных импульсов в кристалле SMO. Однако эффективность генерации оказалась меньше, чем в кристалле BWO. Данное различие может быть связано с запаздывающим откликом Керровской нелинейности в кристалле BWO, которая приводит к максимуму уширения спектра в центре импульса и последующему эффективному преобразованию.

### Список литературы

1. Zverev P.G., Karasik A.Y., Basiev T.T. and others // Quantum Electron. 2003. Vol. 33, № 4. P. 331.
2. Kinyayevskiy I., Kovalev V., Danilov P. and others // Opt. Lett. 2021. Vol. 46, № 3. P. 697–700.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10068, <https://rscf.ru/project/22-79-10068/>.



## ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ МОД ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ДВУХЧАСТОТНЫМ *P*-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Рассмотрено возбуждение терагерцовых (ТГц) мод плазменного слоя под действием двухчастотного *p*-поляризованного лазерного излучения и показано, что плотность потока энергии ТГц моды может значительно превышать интенсивность лазерного излучения. Этот эффект связан с усилением *p*-поляризованного лазерного поля в слое околоритической плазмы при падении под углом полного отражения и резонансным возбуждением ТГц собственной моды плазменного слоя когда ее частота совпадает с разностью лазерных частот.

Yu.M. ALIEV, A.A. FROLOV  
*P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

## EXCITATION OF HIGH-INTENSITY TERAHERTZ SURFACE MODES OF PLASMA SLAB UNDER ACTION OF *P*-POLARIZED TWO-FREQUENCY LASER RADIATION

The THz mode excitation under the action of two-frequency *p*-polarized laser radiation on plasma slab is considered and it is shown that THz mode energy flux density can significantly exceed the laser radiation intensity. This effect occurs due to amplification of *p*-polarized laser field in near-critical plasma slab when it is incident at the angle of total reflection and resonant excitation of the THz eigenmode of plasma slab when its frequency coincides with the lasers frequency difference.

Рассмотрено возбуждение терагерцовой (ТГц) поверхностной моды при воздействии двух волн *p*-поляризованного лазерного излучения с близкими частотами ( $\omega_1, \omega_2$ ) на слой плазмы, когда вдоль его границы лазерные поля распространяются навстречу друг другу [1]. Решена граничная задача для двухчастотного *p*-поляризованного лазерного излучения, и найдено пространственное распределение лазерного поля в слое плазмы. Показано, что при падении лазерного излучения под углом полного отражения, когда выполнено условие  $\sin^2\alpha = \text{Re}\varepsilon(\omega_0)$ , происходит заметное усиление *p*-поляризованного лазерного поля в плазменном слое с околоритической концентрацией электронов, где  $\varepsilon(\omega_0)$  – диэлектрическая проницаемость плазмы,  $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ ,  $\alpha$  – угол падения. Вычислен пондеромоторный потенциал на разностной частоте и показано, что наиболее сильное пондеромоторное воздействие происходит при падении лазерного излучения на слой околоритической плазмы под углом полного отражения, величина которого определяется частотой электрон-ионных соударений.

Рассмотрена задача о возбуждении в плазме ТГц полей под действием пондеромоторных сил лазерного излучения на разностной частоте, и показано, что их пространственно-временное распределение в плазменном слое определяется значениями пондеромоторного потенциала на границах слоя. Показано, что при падении лазерного излучения под углом полного отражения возбуждается только симметричная мода плазменного слоя. Установлено, что если разностью частот лазерных полей совпадает с собственной частотой симметричной моды плазменного слоя, то происходит ее резонансное возбуждение и как следствие значительное увеличение электромагнитных полей ТГц моды. Вычислен вектор Пойнтинга ТГц моды плазменного слоя и исследована зависимость его абсолютного значения от угла падения лазерного излучения и толщины слоя (рис.1). Показано, что плотность потока ТГц энергии максимальна при падении двухчастотного *p*-поляризованного лазерного излучения на слой околоритической плазмы с толщиной сопоставимой с длиной волны лазера в условиях резонанса, когда разность лазерных частот  $\Delta\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$  совпадает с собственной частотой моды плазменного слоя. Показано, что плотность потока энергии ТГц моды плазменного слоя в условиях ее резонансного возбуждения может значительно превышать интенсивность лазерного излучения.

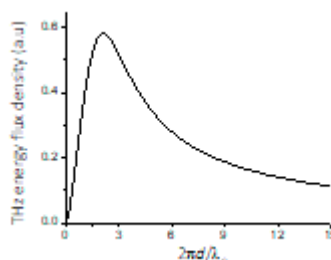


Рис. 1. Зависимость плотности потока энергии ТГц моды от толщины плазменного слоя  $d$ ,  $\lambda_0$  – длина волны лазерного излучения

### Список литературы

1. Aliev Yu. M., Frolov A. A. // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 105. № 4. P. 045203 (1-9).

КОЛЕСНИКОВ Н.М., БЕЛОВ А.С., ГУБСКИЙ К.Л., КРАТ С.А., ЕФИМОВ Н.Е.,  
ПРИШВИЦЫН А.С., КУЗНЕЦОВ А.П.

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ "МИФИСТ-0"**

Представлена схема интерферометра, оптимальная для измерения линейной плотности плазмы на токамаке «МИФИСТ». Описаны схемы обработки интерферометрических сигналов. Проведена оценка ошибки измерения линейной плотности плазмы. Представлена реализация интерферометра на токамаке. Приведены интерферометрические сигналы при работе токамака.

KOLESNIKOV N.M., BELOV A.S., GUBSKY K.L., KRAT S.A., EFIMOV N.E., PRISHVITSYN  
A.S., KUZNETSOV A.P.

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **HETERODYNE INTERFEROMETER FOR PLASMA ELECTRONIC DENSITY MEASUREMENT ON "MEPHIST-0" TOKAMAK**

The selected scheme of the interferometer for measuring the linear plasma density at the "MEPHIST" tokamak is presented. Schemes for processing interferometric signals are described. An estimate is made for the measurement error of the linear plasma density. An implementation of an interferometer on a tokamak is presented. The interferometric signals during the operation of the tokamak are presented.

Электронная плотность является одним из основных параметров, используемых для контроля режимов работы токамаков. Внесение зондов в долгоживущую высокотемпературную плазму не представляется возможным, поэтому для измерения электронной плотности используются дистанционные оптические методы. Для измерения электронной плотности плазмы на малом сферическом токамаке «МИФИСТ-0» разработан гетеродинный интерферометр на длине волны 10,6 мкм.

После запуска в рабочем режиме, в токамаке «МИФИСТ-0» ожидаются следующие параметры плазмы: электронная плотность  $10^{18} \div 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , время жизни плазмы до 30 мс [1]. Также, токамак обладает камерой сферической формы, что позволяет создавать уникальные конфигурации магнитного поля, не свойственные классическим тороидальным токамакам.

Геометрия токамака позволяет реализовать режим работы интерферометра на просвет, при этом, длина диагностической хорды составляет  $\sim 45$  см. При этом на длине волны излучения 10,6 мкм фазовый сдвиг, вносимый плазмой плотностью  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ , составляет  $\sim 0,12$  радиан. Частотное смещение в интерферометре обеспечивается акустооптическим модулятором, сдвигающим излучение на частоту 40 МГц.

Гетеродинный интерферометр смонтирован на раме из немагнитных материалов и виброразвязан от несущих конструкций токамака. Проведены испытания интерферометра на токамаке «МИФИСТ-0» при различных режимах установки: в состоянии покоя; с запуском всех удерживающих катушек, но без запуска рабочего газа, что препятствует образованию плазмы; при штатной работе установки. Испытания показали, что интерферометр не чувствителен к электромагнитным наводкам при работе токамака.

При использовании фотодиода ФД-294-2, максимально измеренная плотность плазмы составила  $7,9 \times 10^{17} \text{ м}^{-2}$ , что соответствует объемной плотности плазмы  $3 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$  в предположении параболического профиля распределения плотности плазмы вдоль диагностической хорды [2]. Максимальная погрешность измерения составляет  $1,3 \times 10^{17} \text{ м}^{-2}$  и обусловлена главным образом шумами фотоприема и фликкер-шумом задающего генератора. Использование фотодиода UM-I-10.6 позволило уменьшить шумы фотоприема, что должно снизить погрешность измерений до уровня  $1,3 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$ . В дальнейшем планируется оснастить интерферометр вторым гетеродинным каналом с отличной длиной волны для компенсации вибрационных помех [3].

### *Список литературы*

1. Kurnaev V.A. et al. The Project of MEFHIST Tokamak // *Physics of Atomic Nuclei*, 2019. Vol. 82, № 10. P. 1329–1331
2. Krat S. et al. MEFHIST-0 Tokamak for Education and Research // *Fusion Science and Technology*, 2023, Vol. 0, № 0. P. 1–19.
3. Carlstrom T.N., Ahlgren D.R., Crosbie J. Real-time, vibration-compensated CO<sub>2</sub> interferometer operation on the DIII-D tokamak // *Review of Scientific Instruments*. 1988. Vol. 59, № 7. P. 1063–1066.

<sup>1</sup>М.С. КОРНЕЕВ, <sup>2</sup>Д.О. ЗАМУРАЕВ, <sup>2</sup>А.Л. ШАМРАЕВ  
[1] Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
[2] РФЯЦ ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВРЕМЕННОГО КОНТРАСТА УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ.**

Изучен эффект генерации кросс-поляризованной волны в нелинейном кристалле BaF<sub>2</sub>. Найдены оптимальные параметры входного пучка и получена генерация XPW с максимальной эффективностью. Установлена зависимость эффективности генерации XPW от интенсивности ультракороткого лазерного импульса на кристалле.

<sup>1</sup>M.S. KORNEEV, <sup>2</sup>D.O. ZAMURAEV, <sup>2</sup>A.L. SHAMRAEV  
[1] National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
[2] RFNC VNIITF, Snezhinsk, Russia

## **INVESTIGATION OF THE ORTHOGONALLY POLARIZED WAVE GENERATION PROCESS FOR INCREASING THE TEMPORAL CONTRAST OF ULTRASHORT LASER PULSES.**

The effect of generation of a cross-polarized wave in a nonlinear BaF<sub>2</sub> crystal is studied. The optimal parameters of the input beam are found and the generation of XPW with maximum efficiency is obtained. The dependence of the XPW generation efficiency on the intensity of an ultrashort laser pulse on a crystal has been established.

В экспериментах по взаимодействию высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом временной контраст лазерного импульса является одним из важнейших параметров. Низкий временной контраст может привести к возникновению предплазмы вблизи поверхности мишени, изменяющей механизм взаимодействия мишени с основным лазерным импульсом.

Одним из способов повышения временного контраста ультракоротких лазерных импульсов является применение устройств, основанных на использовании нелинейно-оптического эффекта генерации ортогонально-поляризованной волны (XPW).

В настоящей работе проведены исследования эффективности генерации XPW в кристалле BaF<sub>2</sub>. Получена зависимость эффективности генерации XPW от интенсивности ультракороткого лазерного излучения на кристалле (Рис. 2). Достигнута эффективность более 20% при интенсивности фемтосекундных лазерных импульсов  $\sim 2 \times 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Результаты исследования будут использованы при модернизации фемтосекундной исследовательской лазерной установки.

А.А. БУРЦЕВ, В.В. ИОНИН, А.В. КИСЕЛЕВ, Н.Н. ЕЛИСЕЕВ,  
В.А. МИХАЛЕВСКИЙ, А.А. НЕВЗОРОВ, А.А. ЛОТИН  
*ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура, Россия*

## ОПТИЧЕСКИЕ НЕЙРОМОРФНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе представлены исследования оптического переключения тонкой пленки фазоизменяемого материала GST<sub>225</sub>, реализация и экспериментальное исследование прототипа оптического синапса на основе полимерного волновода и оптически управляемого элемента на основе пленки. Продемонстрирована возможность управления проходящим через волновод сигналом внешним лазерным воздействием на оптически-активный элемент.

A.A. BURTSEV, V.V. IONIN, A.V. KISELEV, N.N. ELISEEV,  
V.A. MIKHALEVSKY, A.A. NEVZOROV, A.A. LOTIN  
*ILIT RAS - Branch of FSRC «Crystallography and Photonics» of RAS, Shatura, Russia*

## OPTICAL NEUROMORPHIC SYSTEMS BASED ON PHASE-CHANGE MATERIALS

Presents the results of optical switching of the GST<sub>225</sub> thin film, an optical synapse prototype based on the polymer waveguide and an optically controlled film. We demonstrate the possibility of controlling an optical signal as it passes through waveguide by the action of an external laser on an optically active film.

Передача и хранение информации исключительно с помощью оптических технологий весьма желательна из-за изначально большой полосы пропускания, низких остаточных перекрестных помех и высокой скорости передачи информации по сравнению с электронными полупроводниковыми схемами [1]. Несмотря на достигнутые успехи, все существующие технологии обработки информации по-прежнему опираются на архитектуру фон Неймана и, следовательно, страдают от присущих ей узких мест в энергопотреблении; данные должны постоянно передаваться между физически разделенными модулями памяти и арифметико-логическим устройством, на что приходится затрачивать энергию и время. Для дальнейшего улучшения энергопотребления, функциональности, занимаемой площади и скорости связи систем ИИ необходим совершенно другой подход. Нейроморфные вычисления объединяют вычисления с хранилищем в одной ячейке, знаменуя переход к вычислительным архитектурам, отличным от традиционной схемы фон Неймана [2].

Наиболее заметные успехи в реализации этой идеи были достигнуты при использовании фазоизменяемых материалов, таких как GST<sub>225</sub> [3,4]. Сильный контраст оптических свойств для аморфной и кристаллической фаз, а также высокие скорости фазовых превращений делают этот материал наиболее перспективным на сегодняшний день для многих оптоэлектронных приложений. Уже реализованы схемы конфигурации устройства, в которой ФИМ наносится поверх оптического волновода из нитрида кремния [5]. Информация записывается непосредственно через величину оптического пропускания волновода, управляемую внешними импульсами. С помощью мощного лазерного импульса в масштабе времени нано- или субнано-секунд GST<sub>225</sub> переключается между кристаллической и аморфной фазами [6,7]. Несмотря на достигнутые успехи в экспериментальной реализации прототипов устройств оптических синапсов, создание синапсов на основе твердотельных оптических волноводов несет в себе определенные технологические трудности, что обуславливает сложность и дороговизну при производственном внедрении. Интегрированная фотоника на основе полимеров предлагает ряд преимуществ по сравнению с кремнием в ряде применений [8].

В работе представлен разработанный оптический синапс на основе интерфейса между полимерным волноводом и оптически управляемой тонкой пленкой (50 нм) GST<sub>225</sub>. При однократном импульсном воздействии ( $\lambda=532$  нм,  $\tau=15$  нс,  $E=33$  мДж/см<sup>2</sup>), продемонстрировано изменение уровня проходящего сигнала ( $\lambda=1550$  нм) с последующим восстановлением прежнего уровня пропускания [9]. Предложенная концепция создания оптических синапсов является самой дешевой из всех известных планарных технологий создания волноводных оптических синапсов и позволяет реализовать вычислительные элементы и архитектуры на их основе с высокой степенью гетерогенной интеграции.

### *Список литературы*

1. Z. Chai, X. Hu, F. Wang et al. // *Adv. Opt. Mater.* 2017. V.5. №7. 1600665.
2. Lian C. et al. // *Nanophotonics.* 2022. V. 11. №. 17. P. 3823-3854.
3. W. Zhang, R. Mazzarello, M. Wuttig et al. // *Nat. Rev. Mater.* 2019. V.4. P.150–168.
4. D. Kuzum, R. G. Jeyasingh, B. Lee et al. // *Nano. Lett.* 2012. V.12. P.2179–2186.
5. S-T. Han and Y. Zhou. *Photo-Electroactive Non-Volatile Memories for Data Storage and Neuromorphic Computing.* 2020. Woodhead Publishing.
6. Pathak A., Pandey S. K., Behera J. K // *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing. 2023. V.2426. №. 1. P. 012045.
7. A.V. Kiselev, V.V. Ionin, A.A. Burtsev et al. // *Optics & Laser Technology.* 2022. V.147. 107701.
8. Bakhla N., Laxmi P., Gangopadhyay P. // *Journal of Electronic Design Technology.* 2019. V.10. P. 20-26.
9. V.V. Ionin, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2021. V.119. P.081105.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЕЖА МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Достоинствами импульсного лазерного анализа как метода являются: универсальность по отношению к материалу, возможность исключения посторонних примесей и гибкость метода.

A. KOZLOV, D.D. STALIAROU, D.V. PETYUL, M.P. PATAPOVICH  
Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

## STUDING THE PROCESSES IN THE NEAR-SURFACE LASER PLASMA BY METHOD OF ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

The experiments were carried out using a laser two-pulse multichannel atomic emission spectrometer LSS-1. The advantages of pulsed laser analysis as a method are: versatility in relation to the material, the ability to exclude impurities and the flexibility of the method.

Крепёж, называемый декоративные гвозди, несёт в себе не только функциональную составляющую, но и может выступать в качестве украшения. Головка такого объекта может быть сделана из металла, пластика, кожи либо нескольких материалов, что позволяет применять его для скрепления различного вида составляющих. Декоративные гвозди используются для обивки мебели: диванов, кресел, кушеток, кроватей. Одним из наиболее популярных дизайнерских решений является расположение декоративных мебельных гвоздей на стыке разнородных материалов, что помогает максимально подчеркнуть все структурные элементы. Главной особенностью таких составляющих служит дизайн головки, которая может иметь самую разную форму. Что касается ее размера, то он может колебаться от мизерной бусинки бисера до большой пуговицы.

При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия на мишень возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа элементов, входящих в состав исследуемого образца (меди и цинка), а также контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы, направляемой на подложку [1, 2]. При проведении эксперимента был использован лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1 и были выбраны оптимальные режимы работы и длины волн для аналитических линий элементов: Cu (522,107 нм), Zn (472,35 нм).

В качестве примера, на рис. 1, приведен внешний вид головки исследуемого декоративного гвоздя (а), а также зависимость интенсивности линии данного химического элемента от числа двоек лазерных импульсов (б). Энергия импульсов в среднем составляла 49 мДж и задержка между импульсами равнялась 10 мкс.

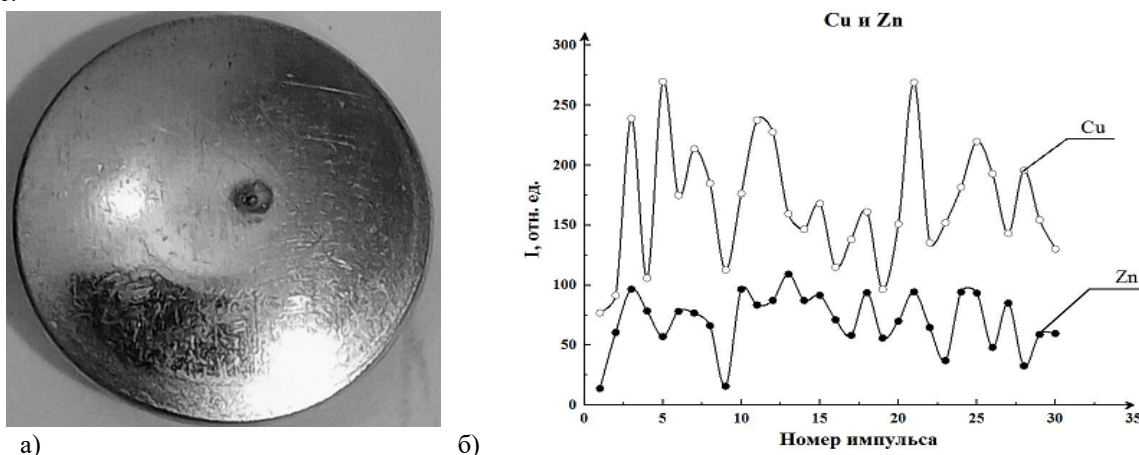


Рис. 1. Внешний вид головки декоративного гвоздя (а) и зависимость интенсивности линии элементов от числа импульсов (б)

На основании проведенных исследований можно заключить, что необходимыми условиями для проявления газодинамического и плазмообразующего механизмов является увеличение вероятности низкогопорогового оптического пробоя воздуха насыщенного микрочастицами металла вторым импульсом, следующим с небольшой задержкой после первого.

### Список литературы

1. V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov // Central European Journal of Physics. 2003. V.1. I.2. P. 334-354.
2. M. Aden [et. al.] // J. of Physics. D, Appl. Physics. 1992. Vol. 25, № 1. P. 57-65.

А.А. ЛИСКОВИЧ

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЕ

Представлен спектроскопический комплекс для исследования взаимодействия наносекундного импульсного лазерного излучения (в том числе двухимпульсного) с веществом и диагностики процессов происходящих в лазерно-эмиссионной абляционной плазме. Реализована функция исследования кинетических и временных характеристик лазерно-эмиссионной плазмы.

A. A. LISKOVICH

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

## SPECTROSCOPIC COMPLEX FOR DIAGNOSTICS OF PROCESSES IN LASER-EMISSION PLASMA

A spectroscopic complex is presented for studying the interaction of nanosecond pulsed laser radiation (including two-pulse) with matter and diagnosing processes occurring in laser-emission ablation plasma. The function of studying the kinetic and temporal characteristics of laser-emission plasma has been implemented.

Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с материалами исследуется практически с момента создания лазеров. Интерес к исследованиям такого рода обусловлен технологическими задачами. Это лазерная обработка материалов, лазерно-эмиссионный спектральный анализ, наноструктурирование вещества, нанесение тонкопленочных покрытий и т.д. [1–2]. В последнее время возрос интерес к воздействию сдвоенными импульсами и их цугами на вещество [3]. В результате такого воздействия проявляются новые эффекты. Все это делает задачу исследования взаимодействия импульсного лазерного излучения и диагностики лазерной плазмы актуальной.

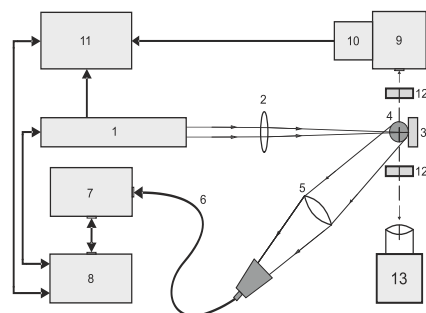


Рис. 1. Схема спектроскопического комплекса

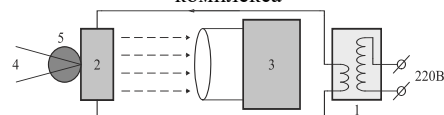


Рис. 2. Схема нагрева исследуемого объекта

Схема комплекса (рис.1) является развитием техники изучения лазерно-эмиссионной плазмы (ЛЭП) и создана на концептуальной основе установок [4–7]. Источником служил YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер на длине волны 1,06 мкм с длительностью импульсов ~15 нс. Он генерировал как одиночные, так и сдвоенные импульсы. Межимпульсный интервал регулировался в диапазоне 1 - 300 мкс, а энергия по каждому каналу 3 - 40 мДж. Излучение лазера 1 телескопом 2 направлялось на объект 3, расположенный в его фокусе. Происходила абляция вещества, формировалась ЛЭП 4, излучение которой собранное объективом 5, вводилось в оптоволокно 6 и направлялось в монохроматор MS 2004i 7. Регистрация спектра ЛЭП осуществлялась регистратором UC 16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек. Данные обрабатывались, усреднялись и отображались в виде спектра в программе Qsp Client. Управление осуществлялось с компьютера 8. Для исследования временных и кинетических характеристик ЛЭП часть ее излучения направлялось в монохроматор 9, на выходе которого располагался детектор 10, сигнал с которого подавался на осциллограф 11. Это позволяло исследовать временное поведение интенсивности спектральных линий. Фотоустановкой 13 фотографировалась ЛЭП. Фильтрами 12 выделялся спектральный диапазон исследуемого излучения.

Для исследования влияния температуры исследуемых объектов на ЛЭП предусмотрен их нагрев (рис.2). Нагрев осуществлялся за счет теплопередачи от электронагревательного элемента при непосредственном контакте исследуемого объекта с ним. Напряжение от автотрансформатора 1 подводилось к нагревательному элементу 2, на котором располагался исследуемый объект, на который фокусировалось лазерное излучение 4 и формировалась ЛЭП 5. Температура исследуемого объекта измерялась дистанционным измерителем температуры ИТ-3СМ 3.

### Список литературы

1. Kawahara N., Beduneau J.L., Nakayama T. // Appl. Phys. B. 2007. Vol. 86, No. 4. P. 605–614.
2. Попов А.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б. // Вестник МГУ. Серия 2. Химия. 2009. Т. 50, № 6. С. 453–467.
3. Tognoni E., Cristoforetti G. // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. Vol. 29, No. 8. P. 1318–1338.
4. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журнал прикладной спектроскоп. 2018. Т. 85, №2. С.285–292.
5. Anufrik S.S.; Kurian, N.N., Zhukova, I.I. and others // Journal of Applied Spectroscopy. 2016. Vol. 83, No 5. P. 764–770.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. фіз.. інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 2. С. 103-115.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. фіз.. інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94-106.

Д.В. ПОМИНОВА<sup>1,2</sup>, А.В. РЯБОВА<sup>1,2</sup>, А.С. СКОБЕЛЬЦИН<sup>1</sup>, И.В. МАРКОВА<sup>2</sup>, И.Д. РОМАНИШКИН<sup>1</sup>

1-Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

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

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОФИЗИЧЕСКИХ И ФОТОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО *in vitro* И *in vivo*

Метиленовый синий (МС) является перспективным фотосенсибилизатором для терапии патологических новообразований, поскольку обладает как фотодинамической активностью (при лазерном облучении), так и окислительно-восстановительными и каталитическими свойствами (в отсутствие света). В рамках данной работы при помощи спектроскопических методов было проанализировано влияние различных факторов (парциального давления кислорода, интенсивности лазерного воздействия, pH, концентрации коферментов) и их совокупности на фотофизические и фотохимические свойства МС, исследованы фотофизические и фотохимические свойства МС в клеточных культурах, проведены исследования на малых животных *in vivo*.

D.V. POMINOVA<sup>1,2</sup>, A.V. RYABOVA<sup>1,2</sup>, A.S. SKOBELTSIN<sup>1</sup>, I.V. MARKOVA<sup>2</sup>, I.D. ROMANISHKIN<sup>1</sup>

1-National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

2-Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## SPECTROSCOPIC STUDY OF PHOTOPHYSICAL AND PHOTOCHEMICAL PROPERTIES OF METHYLENE BLUE *in vitro* AND *in vivo*

Methylene blue (MB) is a promising photosensitizer for the treatment of pathological neoplasms, since it has both photodynamic activity (under laser irradiation) and redox and catalytic properties (in the absence of light). In the framework of this study, the influence of various factors (oxygen partial pressure, laser exposure intensity, pH, coenzyme concentrations) and their combination on the photophysical and photochemical properties of MB was analyzed, the photophysical and photochemical properties of MB in cell cultures were studied, studies on small animals *in vivo* were performed using spectroscopic methods.

Спектроскопическое исследование фотофизических свойств МС включало в себя измерение спектров поглощения и флуоресценции, а также регистрацию времени жизни флуоресценции. Регистрация спектров поглощения в диапазоне осуществлялась при помощи спектрофотометра Hitachi U3400 (Hitachi, Япония). Анализ спектров поглощения позволяет исследовать переход основной формы МС в его восстановленную форму (лейкометиленовый синий, ЛМС) под действием внешних факторов, а также судить о наличии агрегации. Различные формы препарата имеют различные пики поглощения: ЛМС преимущественно поглощает в УФ области (256 нм), в то время как МС имеет два пика поглощения в УФ и видимом диапазоне (294 и 665 нм соответственно).

Измерения спектров флуоресценции *in vitro* и *in vivo* проводили с использованием оптоволоконного спектрометра ЛЭСА-01-Биоспек (Биоспек, Россия). Проанализирована зависимость формы спектра и интенсивности флуоресценции МС от концентрации МС, концентрации коферментов (аскорбиновой кислоты), температуры окружающей среды, значения pH, длины волны (излучение в УФ и в красной части спектра) и характеристик лазерного воздействия (длина волны, интенсивность, импульсно-периодические характеристики). Согласно литературным данным, световое воздействие с разной длиной волны способно запускать различные фотофизические и фотохимические процессы. Исследование влияния интенсивности лазерного воздействия позволило изучить процессы фоторазгорания и/или фотообесцвечивания МС, превращения его в ЛМС.

Для исследования времени жизни флуоресценции МС была использована система из стрик-камеры и стрик-скопа Hamamatsu (C9300 и C10627-13), позволяющая проводить измерения с пикосекундным разрешением. Проанализировано влияние различных факторов на время жизни флуоресценции МС *in vitro* и *in vivo*.

Накопление МС в культурах раковых (HeLa, TRAMP-C2) и моноцитарных клеток (моноциты THP-1, поляризованные макрофаги M0, M1, M2) было исследовано с помощью лазерного сканирующего микроскопа Carl Zeiss LSM-710-NLO. Микроскоп оснащен гелий-неоновым и аргоновым лазерами, а также фемтосекундным перестраиваемым лазером Chameleon Ultra (680-1080 нм) для анализа внутриклеточного распределения флуорофоров. Исследованы интенсивность и время жизни флуоресценции, эффективность генерации синглетного кислорода МС в культурах клеток с параллельной оценкой клеточного метаболизма по времени жизни флуоресценции коферментов NADH и FAD.

Полученные данные о фотофизических и фотохимических свойствах МС и установленные закономерности взаимодействия МС с возбуждающим лазерным излучением, коферментами и биологическим микроокружением могут быть использованы для решения прикладных задач в аспекте повышения эффективности терапии патологических новообразований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 22-72-10117.



**ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК МОЩНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКРИВЛЕННЫХ МИКРО-ПРОВОЛОЧНЫХ МИШЕНЕЙ**

Предложена схема лазерного источника мощного терагерцового излучения на основе искривленных микро-проволочных мишеней. При помощи численных расчетов исследованы особенности вторичных электромагнитных полей, создаваемых при облучении мишеней с различной геометрией. Выполнены оценки мощности терагерцового излучения для различных значений пиковой интенсивности лазерного драйвера, продемонстрирована возможность достижения тераваттного уровня мощности при использовании современных петаваттных лазерных комплексов.

N.D. Bukharskii, Ph.A. Korneev

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia***HIGH-POWER LASER-DRIVEN TERAHERTZ SOURCE BASED ON CURVED MICRO-WIRE TARGETS**

A novel scheme of high-power laser-driven terahertz source based on curved micro-wire targets is proposed. Using numerical simulations, characteristics of the secondary electromagnetic fields emitted by irradiating targets of different geometries are studied. Estimates proving terahertz-scale emission power are given for different peak intensities of the laser driver, the possibility of reaching the terawatt level of output power with modern petawatt laser facilities is demonstrated.

В настоящее время источники мощного терагерцового (ТГц) излучения востребованы для широкого круга фундаментальных исследований и прикладных задач [1]. Для получения мощного ТГц излучения предпочтительными, как правило, являются схемы на основе лазерно-плазменного взаимодействия ввиду отсутствия в этом случае эффекта насыщения [2]. Однако в таких схемах усложняется управление некоторыми параметрами излучения, в частности, его пространственно-временным профилем и спектральным составом. Этот недостаток можно устранить при использовании предложенного в [3, 4] подхода, основанного на излучении мощного разрядного импульса, распространяющегося в сложной мишени. Такой разрядный импульс в случае пикосекундных лазерных импульсов был исследован в работах [5, 6]. Как указано в [3], в незамкнутой кольцевой мишени становится возможным получить ТГц излучение с максимумом плотности мощности в направлении оси мишени и достаточно узким спектром с пиком в заданном диапазоне длин волн, определяемым размером мишени. Существенным недостатком предложенной схемы является необходимость создания оптимальных условий для замыкания электрического тока в мишени с целью получения ТГц импульсов с длительностью свыше одного периода колебаний. Этой проблемы можно избежать при переходе к протяженным микро-проволочным мишеням с искривленной геометрией [4].

В рамках данной работы при помощи численных расчетов был исследован процесс генерации ТГц излучения протяженными микро-проволочными мишенями различной формы. Параметры создаваемого в мишенях разрядного импульса определялись на основе результатов двумерного кинетического моделирования кодом типа «частица в ячейке» Smilei [7]. Затем полученные профили разрядного тока использовались для расчета электромагнитных полей в волновой зоне с использованием встроенного в код Smilei решателя электромагнитного поля.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе осцилляций короткого разрядного импульса вдоль поверхности мишени происходит эффективная генерация вторичного излучения, которое отделяется от разрядного импульса и распространяется в свободном пространстве в виде электромагнитной волны ТГц диапазона. Пространственно-временной профиль и спектральный состав этой волны определяются формой и размером мишени, что позволяет обеспечить необходимые для конкретной задачи характеристики ТГц излучения. В то же время, в отличие от кольцевой мишени [5], для получения последовательности из нескольких ТГц импульсов в данной схеме не требуется выполнения каких-либо дополнительных условий, связанных с необходимостью замыкания электрического тока, так как генерация происходит непрерывно на протяжении всего процесса распространения разрядного импульса вдоль протяженной мишени. Согласно проведенным оценкам, при использовании лазерных установок петаваттного класса мощность ТГц излучения может достигать тераваттного уровня, что открывает возможность для проведения широкого круга фундаментальных и прикладных исследований.

*Список литературы*

1. Dhillon S.S., Vitiello M.S., Linfield E.H. and others // J. Phys. D. 2017. Vol. 50, № 4. 043001.
2. Liao G.-Q., Li Y.-T. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47, № 6. P. 3002-3008.
3. Bukharskii N., Kochetkov Iu, Korneev Ph. // Appl. Phys. Lett. 2022. Vol. 120, № 1. 014102.
4. Bukharskii N., and Korneev Ph. Intense widely-controlled terahertz radiation from laser-driven wires [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2022. Дата обновления: 27.10.2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2210.14166> (дата обращения: 27.02.2023).
5. Quinn K., Wilson P.A., Cecchetti C.A. and others // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102, № 19. 194801.
6. Ehret M., Bailly-Grandvaux M., Korneev Ph. and others // Phys. Plasmas. 2023. Vol. 30, № 1. 013105.
7. Derouillat J., Beck A., Perez F. and others // Comput. Phys. Commun. 2018. Vol. 222. P. 351-373.

## О КОРРЕКТНОСТИ УЧЕТА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОТКАНИ

В докладе анализируется учет влияния на процесс распространения лазерного излучения в биоткани его рассеяния. Показано, что при воздействии лазерного излучения в жидкой среде важную роль играют конвекция, кипение, а также эффекты, вызванные кипением.

V.P.MINAEV

"IRE-POLUS" LTD. Fryazino city, Moscow region, Russia

## ON THE CORRECTNESS OF ACCOUNTING FOR PHYSICAL PROCESSES WHEN MODELING THE EFFECTS OF LASER RADIATION ON BIOLOGICAL TISSUES

The report analyzes the consideration of the scattering influence on the process of propagation of laser radiation in the biological tissues. It has been shown that convection, boiling, as well as effects caused by boiling play an important role when exposed to laser radiation in a liquid medium.

Физическое и математическое моделирование играет важную роль в процессе понимания происходящих при воздействии на биоткани процессов, необходимого для выбора наилучшей стратегии лечения. При этом

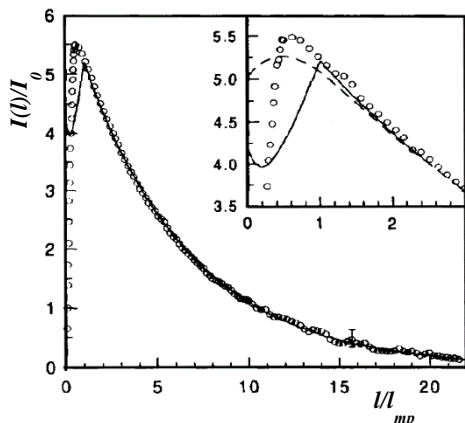


Рис.1. Распределение относительной интенсивности излучения в полубесконечной рассеивающей среде.  $l_{tr}$  - длина свободного пробега фотона

неправильно выбранная физическая модель, заложенная в основу математического моделирования может дать красивые результаты, не имеющие ничего общего в реально происходящими процессами.

При оценке процесса распространения излучения в биоткани необходимо не только учитывать влияния рассеяния на глубину воздействия, но и увеличения из-за рассеяния интенсивности излучения вблизи границы раздела, проиллюстрированное рис.1 из [1].

В процессе воздействия лазерного излучения при лечении варикозно расширенных вен методом эндовенозной лазерной коагуляции (ЭВЛК) важную роль играют процессы, происходящие в заполняющей вену крови. Использование для моделирования ЭВЛК печени, в которую вдавливался стеклянной пластинкой световод, исключал эти процессы, тем самым обесценивал сделанные в работе [2] выводы.

Проведенное в [3] математическое моделирование не учитывает процессов конвекции и кипения в крови, поэтому не может рассчитывать на адекватное описание процессов, происходящих при ЭВЛК.

И наоборот, использование для моделирования ЭВЛК плазмы крови [4], показало, что решающую роль при осуществлении ЭВЛК играют процессы конвекции и кипения. При этом интенсивное кипение приводит к процессу очищения места вывода излучения из световода от сгустка коагулята и его разогрева, что уменьшает вероятность ведущей к осложнениям перфорации стенки вены.

Учет при моделировании воздействия в среде физиологического раствора интенсивного кипения с образованием парагазового пузыря и образующейся на его дистальном конце двухфазной струи из пузырьков и нагретой жидкости, позволил предложить эффективный метод гидродинамического рассеяния мягких тканей в урологии [5]. Кроме этого было оценено безопасное расстояние до мягких тканей при осуществлении лазерной литотрипсии.

### Список литературы.

1. А.А.Карабутов, И.М.Пеливанов, Н.Б.Подымов и др. Письма ЖЭТФ, т.70, вып.3, 1999, с.187-192.
2. M.S.Whiteley, A.C.Cross, V.C.Whiteley, *Lasers Med Sci.* 2022;37(3):1899–1906. <https://doi.org/10.1007/s10103-021-03449-0>.
3. S. Artemov, A. Belyaev, O. Bushukina, et.al. 27<sup>th</sup> Int.conf. Advanced Laser Technologies ALT'19, 15-20 September 2019, Prague. Book of Abstracts B-O-10.
4. V.P.Minaev, N.V.Minaev, V.Yu.Bogachev, et.al. *Lasers in Medical Science* 2020, doi:10.1007/s10103-020-03184-y.
5. В.П.Минаев, Н.В.Минаев, В.И.Юсупов и др. *Квантовая электроника*, 49(4), 404-408.

Е.В. ГРЫЗЛОВА, М.М. ПОПОВА, С.Н. ЮДИН, М.Д. КИСЕЛЕВ, А.Н. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО  
НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## РABBITT-СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИ УЧАСТИИ ДИСКРЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ: ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ И УГЛОВЫЕ АРСПРЕДЕЛЕНИЯ

Рассмотрена фотоионизация валентной 2p-оболочки атома неона смесью затравочного ИК-поля с длиной волны 800 нм и его 13,15,17,19 гармоник. Изучены спектры и угловые распределения как функции сдвига фазы затравочной гармоники. Исследовано влияние переходов через состояния дискретного спектра, применимость теории возмущений и эффекты сильного поля.

E. V. GRYZLOVA, M. M. POPOVA, S. N. YUDIN, M. D. KISELEV, A. N. GRUM-GRZHIMAILO  
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia a

## RABBITT-SPECTROSCOPY INVOLVING DISCRETE STATES: PHOTOELECTRON SPECTRUM AND ANGULAR DISTRIBUTION

The photoionization of valence 2p-shell of Neon by a mixture of seeded IR-field with wavelength 800 nm and its 13,15,17,19 harmonics is considered. The photoelectron spectrum and angular distribution are studied as a function of phaseshift of the seeded harmonic. The influence of transition through discrete states, applicability of perturbation theory and strong field effects are analyzed.

RABBITT-спектроскопия (Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of Two-photon Transitions) основана на фотоионизации атомов или молекул комбинированным полем из затравочной гармоники  $\omega$  и ее кратных частот. При этом возникает интерференция переходов за счет поглощения n-ой гармоники  $+ \omega$  и поглощения n+2 с испусканием  $- \omega$ . Интерференция зависит от фаз всех гармоник и позволяет реконструировать фронт волны на аттосекундном масштабе. Обычно частоты гармоник соответствуют переходам в непрерывный спектр, однако в последнее время появился интерес к припороговой области, когда одна гармоника оказывается ниже порога ионизации атома [1].

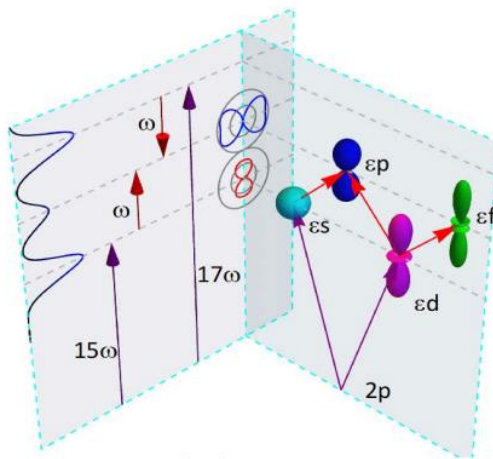


Рис. 1. Схема RABBITT-спектроскопии при ионизации 2p-оболочки атома неона, пример фотоэлектронного спектра и принцип формирования угловых распределений

Мы теоретически изучили ионизацию 2p-оболочки неона при длине волны затравочного поля 800 нм. Тогда 13я гармоника резонансно возбуждает 2p5 ( 2 P1/2)3d[3/2]1 состояние, с возможностью последующей ионизации ИКгармоникой. Получены спектры и угловые распределения фотоэлектронов, проанализирована роль дискретных состояний.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации грант № 075-15-2021-1353 и № 0818-2020-0005 с использованием вычислительных ресурсов ЦКП «Центр данных ДВО РАН».

### Список литературы

1. Paul P. M., Toma E. S., Breger P. and others// Science, 2001. Vol. 292, P. 1689-1692

## ДИНАМИКА КВАЗИНЕПРЕРЫВНОЙ ВОЛНЫ В АКТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ

Исследуется динамика распространения модулированной волны в активном световоде с профилем зависимости дисперсии специально подобранным для обеспечения максимальных степеней сжатия генерируемых последовательностей ультракоротких импульсов.

I. O. ZOLOTOVSKII<sup>1</sup>, V. A. LAPIN<sup>1</sup>, D. I. SEMENTSOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ulyanovsk State University, S.P. Kapitsa Research Institute of Technology, Ulyanovsk, Russia

## DYNAMICS OF A QUASI-CONTINUOUS WAVE IN AN ACTIVE INHOMOGENEOUS FIBER

The dynamics of propagation of a modulated wave in an active fiber with a dispersion dependence profile specially selected to provide the maximum compression ratios of the generated sequences of ultrashort pulses is studied.

В работе рассматривается методика усиления и временной компрессии частотно модулированных импульсов в активном световоде с профилем зависимости дисперсии от длины подобранным таким образом, что бы обеспечивать максимальные степени сжатия импульсов с заданным начальным chirпом при заданном усилении световода.

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

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

где  $\tau = t - z/v_g$  – время в бегущей системе координат,  $d_2 = \left(\frac{d^2\beta}{d\omega^2}\right)$  – параметр дисперсии групповых скоростей,  $R$  – параметр нелинейности,  $g$  – коэффициент усиления (потерь) в волокне.

В работе выбиралась зависимость дисперсии вида:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp \left[ -\frac{\alpha_0 |d_{20}|}{g_0} (\exp(2g_0 z) - 1) + 2g_0 z \right] \quad (2)$$

На рис. 1 приведены: динамика ДГС(1, а) и пиковой мощности(2, а), профили импульса на входе (1, b), в точке максимума модуля дисперсии (2, b), на выходе из световода (3, b) длиной  $L = 1.5z_0$ , где  $z_0$  – точка максимума модуля дисперсии. В работе рассматривалась модулированная волна вида:

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

Приведенные зависимости получены путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При следующих значениях параметров импульса: начальная длительность  $\tau_0 = 10^{-11}$  с, мощность  $P_0 = 0.01$  Вт; и световода: ДГС  $d_{20} = -10^{-27}$  с<sup>2</sup>/м, параметр нелинейности  $R = 10^{-3}$  (Вт·м)<sup>-1</sup>, в световоде, состоящем из сегментов  $l_1 = 28$  м и  $l_2 = 142$  м, обладающих усилением:  $g_1 = 0.1$  м<sup>-1</sup>,  $g_2 = 0.015$  м<sup>-1</sup>.

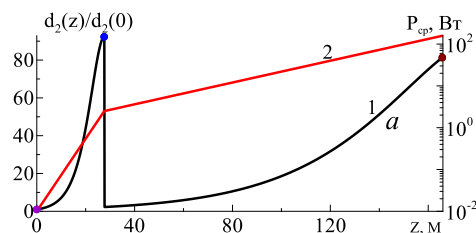


Рис. 1. Динамика ДГС(1) и средней мощности(2) в световоде, состоящем из двух сегментов с различным усилением и ДГС, определяющемся по формуле (2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-22-00412.

### Список литературы

1. I. O. Zolotovskii, V. A. Lapin, D. I. Sementsov, A. A. Fotiadi, S. V. Popov // Optics Communications. – 2018. – V. 426. – P. 333–340.
2. Abramov A.S., Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Mironov P.P., Yavtushenko M.S., Svetukhin V. V., Fotiadi A.A. Photonics 9 (3), 160 (2022).

А.В. РУДЫЙ, Я.В. УЛЬЯНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ КЕРАМИКИ КАК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛАЗЕРА

Рассмотрены преимущества керамики перед монокристаллом в качестве активного элемента лазера, а также перспективы развития отечественного производства лазерной керамики.

A.V. RUDIY, Y.V. ULYANOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## RELEVANCE AND PROSPECTS OF CERAMICS AS AN ACTIVE ELEMENT OF A LASER

The advantages of ceramics over a single crystal as an active element of a laser, as well as the prospects for the development of domestic production of laser ceramics, are considered.

На данный момент активным элементом в современных твердотельных лазерных системах в основном выступает монокристалл. Тенденции показывают, что есть перспективные альтернативы. Можно отметить, что лазерная керамика является более выгодным экономически материалом для производства активных элементов лазерных систем, чем монокристаллы. Технологический процесс производства керамики предлагает большую гибкость в конструировании на макро-, микро- и молекулярном уровнях. Это открывает новые возможности для создания лазерных систем с улучшенными характеристиками и формами, которые не могут быть реализованы на монокристаллах.

Керамика по оптическим свойствам не уступает монокристаллам. [1] Это означает, что с аналогичными оптическими характеристиками как у монокристаллических лазеров можно сделать лазер на керамике. Более того, керамика позволяет создавать композитные материалы, что в свою очередь даёт большую выходную мощность и качество излучения.

Выходит, что развитие керамической лазерной отрасли является перспективным, логичным и разумным решением, несмотря на недостатки, которые всё же имеются. Существует два явных аспекта, а именно: неравномерность по структуре, что может привести к появлению дефектов и низкой эффективности лазера и процесс изготовления может быть более сложным и требовательным, по отношению к монокристаллическим. Тем не менее, современные технологии позволяют снизить эти недостатки до минимума и получить керамические материалы высокого качества.

Таким образом, современные технологии позволяют максимально использовать преимущества керамики и минимизировать её недостатки, что позволяет нам получать более совершенные лазерные устройства. На ФКП «ГЛП «Радуга» при участии ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработана и введена в эксплуатацию технологическая линия по производству высокопрозрачной лазерной керамики, в том числе композитной. [2][3] Производство материалов содержит следующие технологические операции: синтез исходных порошков, придание исходному порошку требуемых формы и размеров, спекание или термическая обработка под давлением, механическая обработка заготовки для формирования оптической детали, нанесение защитных и просветляющих покрытий, контроль качества готового изделия.



Рис. 1. Образец высокопрозрачной лазерной нанокерамики (ВПЛК) производства ФКП «ГЛП «Радуга»

### Список литературы

1. Ikesue A. Synthesis and Performance of Advanced Ceramic Lasers / A. Ikesue, Y. L. Aung // Journal of the American Ceramic Society. – 2006. – Т. 89, № 6. – С. 1936-1944. – ISSN 1551-2916
2. Генерационные характеристики новых лазерных керамик отечественного производства / В. В. Безотосный, В. В. Балашов, В. Д. Булаев [и др.] // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 9. – С. 802-806. – ISSN 1468-4799.
3. Composite Ceramic Nd<sup>3+</sup>:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG Laser Elements / V. V. Balashov, V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev [и др.] // Journal of Russian Laser Research. – 2019. – Т. 40, № 3. – С. 237-242. – ISSN 1573-8760.

Е.Д. ТАРАКАНОВ, Я.В. УЛЬЯНОВ

Федеральное казённое предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Радужный, Россия

## **Nd<sup>3+</sup>:YAG-КЕРАМИКА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЕЁ СВОЙСТВ И КАЧЕСТВА**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований оптических потерь образцов активных элементов лазерной керамики алюмоиттриевого граната, легированного ионами неодима (Nd<sup>3+</sup>:YAG). Образцы были произведены на ФКП «ГЛП «Радуга» на собственной технологической установке. Исследовалось два типа образцов: с концентрацией содержания неодима 1 или 2%. Основной задачей стояло изучение показателя общих потерь, коэффициента пассивных потерь, коэффициенты пропускания в образцах активных элементов.

E.D. TARAKANOV, Y.V. ULYANOV

Federal state enterprise "State laser polygon "Raduga", Raduzhny, Russia

## **Nd<sup>3+</sup>:YAG CERAMICS: EXPERIMENTAL EVALUATION OF ITS PROPERTIES AND QUALITY**

The paper presents the results of experimental studies of optical losses of samples of active elements of laser ceramics of yttrium aluminum garnet doped with neodymium ions (Nd<sup>3+</sup>:YAG). The samples were produced at the FSE "SLP "Raduga" on its own process unit. Two types of samples were studied: with a concentration of neodymium content of 1 or 2%. The main task was to study the total loss index, passive loss coefficient, transmission coefficients in the samples of active elements.

Измерения проводились на волоконном лазере ЛК-100-ЛП-ОМ-В. Для определения полных потерь в активном элементе была измерена мощность излучения лазера до и после его прохождения через образец. Результаты эксперимента показали, что средние значения полных потерь для исследуемых образцов активных элементов, с учётом погрешности [1], принимают допустимые значения.

Определение качества нанесенных покрытий [2] производилось путем измерения мощности излучения лазера, которое падает на торец образца активного элемента, а затем мощности отраженного от торца активного элемента излучения. Средние значения коэффициентов отражения на длине волны 1,07 мкм на границах для образца активного элемента Nd<sup>3+</sup>:YAG с учётом погрешности также принимают допустимые значения.

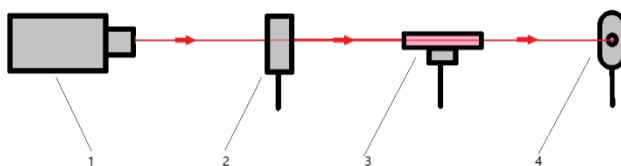


Рис. 1. Схема установки для измерения полных потерь:

1 – иттербиевый непрерывный волоконный лазер ЛК-100-ЛП-ОМ-В; 2 – диафрагма со светофильтрами; 3 – активный элемент; 4 – измерительная головка ОРНІR 3А КТ2017011-1-28.

Коэффициент пассивных потерь [3] был рассчитан путём определения коэффициента пропускания излучения на границе среды. Показатель общих потерь и коэффициент пассивных потерь более чем в три раза меньше в образцах керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG с концентрацией неодима в 2%, чем в образцах с содержанием неодима в 1%. Определение коэффициента пассивных потерь опиралось на работу [4].

Из результатов экспериментов можно сделать вывод, что образцы керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG с концентрацией неодима в 2% обладают лучшим качеством, имея меньшие значения оптических потерь. Коэффициент пропускания активного элемента с 2% неодима выше на 0,1, чем у образцов с 1% неодима. Показатель общих потерь и коэффициент пассивных потерь более чем в три раза меньше в образцах с концентрацией неодима в 2%.

Важно отметить, что данные результаты являются специфическими для использованных в экспериментах образцов керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG и не могут быть обобщены на другие материалы или концентрации. Кроме того, для получения более точных результатов необходимо провести дополнительные эксперименты с различными типами лазеров и образцов керамики.

В целом, наши исследования показали, что образцы керамики Nd<sup>3+</sup>:YAG, произведенные на ФКП «ГЛП «Радуга» [1], имеют высокое качество, а концентрация неодима влияет на показатели потерь и качество образцов. Это может быть полезной информацией для тех, кто занимается производством лазерного оборудования на основе этого материала.

### *Список литературы*

1. Генерационные характеристики новых лазерных керамик отечественного производства / В. В. Безотосный, В. В. Балашов, В. Д. Булаев [и др.] // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 9. – С. 802-806. – ISSN 1468-4799.
2. Al-Khursan A. H. Solid state laser / A. H. Al-Khursan. – Rijeka : InTech, 2012. – 252 с. – ISBN 978-953-51-0086-7.
3. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / Л. Л. Гольдин, Ф. Ф. Игошин, С. М. Козел [и др.]. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 704 с.
4. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – 4-ое издание. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 720 с. – ISBN 978-5-8114-0844-3



Е.И. ЛИПАТОВ<sup>1,2</sup>, Д.Е. ГЕНИН<sup>1,2</sup>, САВВИН А.Д.<sup>1,3</sup>, В.В. ЧАЩИН<sup>1,2</sup>, М.А. ШУЛЕПОВ<sup>1,2</sup>,  
Е.Н. ТЕЛЬМИНОВ<sup>1</sup>, А.П. ЕЛИСЕЕВ<sup>4</sup>, В.Г. ВИНС<sup>5</sup>, А.Е. ДОРМИДОНОВ<sup>3</sup>,  
Е.Ф. МАРТЫНОВИЧ<sup>6</sup>, В.П. МИРОНОВ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>ООО «Велман», Новосибирск, Россия

<sup>6</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, Иркутск, Россия

## ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ

Лазеры на центрах окраски потенциально применимы в условиях радиационных нагрузок, в приложениях интегральной фотоники и в квантовых технологиях. В работе сообщается о текущем состоянии дел в области генерации лазерного излучения на центрах окраски в алмазе с оптической накачкой (NV- и N<sub>2</sub>V-центры), а также о перспективах получения генерации на других центрах окраски и возможности электрической накачки алмазных лазеров.

E.I. LIPATOV<sup>1,2</sup>, D.E. GENIN<sup>1,2</sup>, SAVVIN A.D.<sup>1,3</sup>, V.V. CHASHCHIN<sup>1,2</sup>, M.A. SHULEPOV<sup>1,2</sup>,  
E.N. TELMINOV<sup>1</sup>, A.P. YELISSEYEV<sup>4</sup>, V.G. VINS<sup>5</sup>, A.E. DORMIDONOV<sup>3</sup>,  
E.F. MARTYNOVICH<sup>6</sup>, V.P. MIRONOV<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of Automation named after N.L. Dukhova, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup>Velman LLC, Novosibirsk, Russia

<sup>6</sup>Irkutsk branch of the Institute of Laser Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

## GENERATION OF LASER RADIATION ON COLOR CENTERS IN DIAMOND

Color center lasers are potentially applicable under ionizing radiation, in applications of integrated photonics, and in quantum technologies. The paper reports on the state-of-art of laser lasing at color centers in diamond with optical pumping (NV and N<sub>2</sub>V centers), as well as on the prospects for obtaining lasing at other color centers and the possibility of electrically pumping diamond lasers.

Активные среды на основе алмаза привлекают возможностью создания лазеров с высоким удельным энергопотреблением ввиду его высокой теплопроводности и низкого линейного коэффициента расширения. Радиационная стойкость алмаза позволяет рассчитывать на создание полупроводниковых лазеров на основе инжекционной электролюминесценции в алмазных структурах с центрами окраски способных работать в жестких условиях эксплуатации (космическое пространство, АЭС, источники ионизирующего излучения и пр.).

Попытки получить лазерную генерацию на центрах окраски в алмазе предпринимались, начиная с 70х годов прошлого века. О первой лазерной генерации на N<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>-центрах (N<sub>2</sub>V<sup>0</sup>/N<sub>2</sub>V<sup>-</sup>) в природных и синтетических образцах сообщалось в работах [1-3]. Однако продолжения данные работы не получили.

Первая генерация на NV-центрах в отрицательном зарядовом состоянии была получена в 2020 г. Данный результат был опубликован в [4]. Сообщалось о генерации на 720 нм с пикосекундной оптической накачкой на 532 нм, т.е. генерация наблюдалась на длинноволновом плече фонованного крыла люминесценции. Получены два патента на изобретение [5, 6].

В данной работе сообщается о текущем состоянии дел в области генерации лазерного излучения на центрах окраски в алмазе с оптической накачкой, а также о перспективах получения генерации на других центрах окраски и возможности электрической накачки алмазных лазеров.

Исследование было выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048

### Список литературы

1. Rand S.C., DeShazer L.G. Visible color-center laser in diamond // Optics letters. 10. №10. P. 481-483. 1985
2. Takeru N., Shuji S. Optical properties and laser action of N<sub>3</sub> center in synthetic diamond // Diamond optics III, 1325, International Society for Optics and Photonics, 1990
3. Takeru N., Satoh S., Tsuji K. Diamond laser crystal and method manufacturing the same // U.S. Patent No. 4,950,625. 21 Aug. 1990
4. Savvin A., Dormidonov A., Smetanina E., Mitrokhin V., Lipatov E., Genin D., Potanin S., Yelisseyev A., Vins V. NV-diamond laser // Nature communications. 12. 7118. 2021
5. Патент на изобретение № 2779410 «Фотовозбуждаемый алмазный NV-лазер», авторы: Бураченко А.Г., Дормидонов А.Е., Винс В.Г., Генин Д.Е., Елисеев А.П., Липатов Е.И., Потанин С.А., Рипенко В.С., Саввин А.Д., Тельминов Е.Н., Шулепов М.А., приоритет 08.09.2021
6. Патент на изобретение № 2781454 «Способ изготовления лазерного элемента из кристалла алмаза с NV<sup>-</sup> центрами окраски и лазерный элемент, полученный этим способом», авторы: Саввин А.Д., Липатов Е.И., Дормидонов А.Е., Елисеев А.П., Винс В.Г., приоритет 12.10.2021



А.И.МИСЬКЕВИЧ

*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия*

## **ОБРАЗОВАНИЕ И ТУШЕНИЕ ЭКСИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ ХеСl\* ПРИ НАКАЧКЕ ПЛОТНЫХ Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Рассматриваются особенности люминесценции эксимерных молекул ХеСl\* в плотных Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> газовых смесях, возбуждаемых гамма-нейтронным излучением импульсного ядерного реактора. Нестационарное поглощение, возникающее в активной среде эксимерного лазера при накачке, зависит от состава газовой смеси, концентрации свободных электронов плазмы и собственного фотопоглощения молекул ХеСl\* (В). При накачке гамма-нейтронным излучением ядерного реактора основной тушащий эффект создают вторичные электроны, образующиеся в активной среде лазера и стенках лазерной кюветы при комптоновском рассеянии и фотопоглощении гамма-квантов, которые разрушают молекулы ХеСl\* при диссоциативном прилипании электронов и при сверхупругих столкновениях.

A.I.MISKEVICH

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

## **FORMATION AND QUENCHING OF EXCIMER XeCl MOLECULES\* WHEN PUMPING DENSE AR-XE-CCl<sub>4</sub> GAS MIXTURES WITH NUCLEAR REACTOR RADIATION**

The features of luminescence of excimer XeCl\* molecules in dense Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> gas mixtures excited by gamma-neutron radiation of a pulsed nuclear reactor are considered. The unsteady absorption that occurs in the active medium of the laser during pumping depends on the composition of the gas mixture, the concentration of free plasma electrons and the intrinsic photoabsorption of the molecules of XeCl\*(B). When pumping the main extinguishing effect is created by secondary electrons formed in the active medium of the laser and the walls of the laser cuvette during Compton scattering and photoabsorption of gamma quanta of instantaneous gamma radiation, which destroy the molecules of XeCl\* during dissociative electron adhesion and during superelastic collisions.

Ядерно-возбуждаемая плазма, создаваемая ядерными частицами высокой энергии в плотных газовых средах, состоит из отдельных нестационарных областей (треков частиц), имеющих характерные размеры длина ~ нескольких см, диаметр 10<sup>-3</sup> -10<sup>-2</sup> см. Удельные характеристики трековой плазмы слабо зависят от уровня накачки и описываются формулой Плацмана [1]. В инертных газах атмосферного давления концентрации ионов и электронов в треке – 10<sup>12</sup>÷10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>. Образование эксимерных молекул ХеСl\* в смесях инертных газов происходит за счет ион-ионной рекомбинации положительных ионов Хе<sup>+</sup> с отрицательными ионами Сl<sup>-</sup>, которые образуются при прилипании трековых электронов к молекулам ССl<sub>4</sub> и их диссоциации. Концентрация галогеносодержащего донора (ССl<sub>4</sub>) в газовой смеси должна быть сравнима с концентрацией свободных электронов в треке ядерной частицы, поскольку его повышенная концентрация вызывает тушение молекул ХеСl\* и не приводит к увеличению числа отрицательных ионов из-за отсутствия свободных электронов в треке и не должна сильно превышать 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>, что соответствует парциальному давлению ССl<sub>4</sub> в смеси ~ 0.05÷0,1 Торг [2].

Нестационарное поглощение, возникающее в активной среде эксимерного лазера при накачке, зависит от концентрации свободных электронов плазмы и поглощения молекулами ХеСl\* собственного излучения [3,4]. Экспериментально обнаружено снижение коэффициента усиления активной среды эксимерного лазера с ядерной накачкой на В-Х и С-А переходах молекулы ХеСl\* (308 nm, 352 nm) при накачке Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> среды смешанным гамма-нейтронным излучением ядерного реактора. Эффект обусловлен тушащим действием вторичных электронов, образующихся в активной среде эксимерного лазера под действием мгновенного гамма-излучения. Эффект значительно усиливается при увеличении плотности потока гамма-излучения и может достигать значений коэффициента потерь ~ 10<sup>-2</sup> ÷ 2·10<sup>-2</sup> см<sup>-1</sup>

### *Список литературы*

- 1 R.L.Platzman.. Internat.J.Appl.Radiationand Isotopes.,**10** (2/3),116 1961)
- 2 А.И. Миськевич, Го Цзиньбо, Ю. А. Дюжов . Квантовая электроника., **43** (11),1003 (2013).
- 3 А.И. Миськевич, Ю.А.Дюжов, А.А.Суворов Оптика и спектроскопия,**121**,(2),179 (2016)
- 4 А.И.Миськевич Оптика и спектроскопия, в печати (2023)

А.А. ШЕКУРОВ<sup>1</sup>, И.Л. СЕТКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ Институт Прикладной Физики Российской Академии Наук, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Tm:YAP

Сконструирован и исследован лазер с линейной конфигурацией резонатора на основе кристалла Tm:YAP. Получена генерация в непрерывном режиме на длине волны 1940 нм с максимальной достигнутой мощностью излучения генерации 13,5 Вт при мощности падающего излучения накачки 38 Вт. Дифференциальная эффективность составила 56%.

A.A. SHEKUROV<sup>1</sup>, I.L. SNETKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

## CHARACTERISTICS RESEARCH OF A LASER BASED ON A Tm:YAP CRYSTAL

A laser with a linear resonator configuration based on a Tm:YAP crystal was designed. Generation in CW mode at a wavelength of 1940 nm was obtained. The maximum achieved radiation power of generation was 13.5 W with the incident pump radiation power of 38 W. The slope efficiency was 56%.

Мощные лазерные системы, работающие в спектральном диапазоне  $\sim 2$  мкм играют важную роль в различных сферах жизнедеятельности: промышленность (сварка и резка пластиков) [1], медицина (хирургия и урология) [2], наука (детекторы гравитационных волн, накачка для параметрических лазеров, спектрометрия) и др.

В данной работе было проведено исследование генерационных характеристик кристалла иттрий-алюминиевого перовскита YAlO<sub>3</sub>, легированного ионами тулия (Tm:YAP). Атомная концентрация ионов тулия составила 4%. В ходе работы был исследован спектр пропускания кристалла, на основе чего была подобрана оптимальная длина волны диодного лазера накачки. Реализован линейный резонатор с продольной накачкой активного элемента аналогично работе [3], исследованы зависимость мощности излучения генерации лазера на основе кристалла Tm:YAP, дифференциальная и оптическая эффективности лазера, а также спектр генерируемого излучения.

В ходе работы был измерен спектр пропускания кристалла Tm:YAP. Данный материал имеет полосу поглощения на длине волны 793 нм. Для эффективного создания инверсии населенности в кристалле, в качестве лазера накачки был использован лазерный диод с возможностью температурной перестройки длины волны в диапазоне 790-800 нм. На кристалл подавалось линейно-поляризованное излучение, максимальная мощность которого достигала 38 Вт. В ходе проведения эксперимента были получены зависимости генерируемой мощности излучения лазера на основе кристалла Tm:YAP от падающей на кристалл мощности излучения лазера накачки при использовании в качестве выходного зеркала резонатора трех зеркал с различными радиусами кривизны (500 мм, 1000 мм и плоского зеркала). Коэффициент пропускания на длине волны 1850-2150 нм для всех вышеуказанных зеркал составлял  $\sim 10\%$ . В качестве входного зеркала было использовано плоское зеркало с высоким коэффициентом пропускания в спектральном диапазоне 790-800 нм и высоким коэффициентом отражения в спектральном диапазоне 1850-2150 нм. Наибольшую дифференциальную эффективность удалось получить при использовании зеркала с радиусом кривизны 1000 мм. В результате эксперимента была достигнута мощность излучения генерации 13,5 Вт в непрерывном режиме с линейной поляризацией. Дифференциальная эффективность при этом составила 56%, оптическая эффективность составила 36%. Полученные значения для дифференциальной и оптической эффективности превосходят результаты множества работ, опубликованных ранее, например [3], [4], [5]. Также было проведено исследование спектральных характеристик генерируемого излучения при использовании зеркала с радиусом кривизны 1000 мм. Для данного зеркала длина волны генерируемого излучения составила 1940 нм и не зависела от мощности накачки в исследуемом диапазоне мощностей. Ширина спектральной линии составила 2 нм.

В дальнейшем в данную конфигурацию лазера планируется внести лазерный усилитель, в качестве которого будет выступать образец керамики Tm:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также реализовать Г-образную форму резонатора с двусторонней накачкой активного элемента [5], что позволит обеспечить более эффективную накачку активного элемента и, как следствие, значительно увеличить мощность генерации.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект №19-2911019

### Список литературы

1. I. Astrauskas, B. Povazay, A. Pugzlys *et al.*, // Lasers and Electro-Optics CLEO\_AT, 2020. P. AW4I.7.
2. H. A. Razvi, J. D. Denstedt, S. S. Chun *et al.*, // Journal of Urology, 1996. Vol. 156, №. 3. P. 912-914.
3. J. Sulc, H. Jelínková, K. Nejezchleb *et al.*, // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2009. Vol.7193.
4. Y. Mao, Y. Gao, L. Wang, // Journal of Russian Laser Research, 2020. Vol. 41, №. 6. P. 653-657.
5. Q. L. Long, Y. Gao, Y. F. Mao *et al.*, // Journal of Russian Laser Research, 2021. Vol. 42, №. 4. P. 468-472.

В.С. ВЯЗАНКИН

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **АКТИВНАЯ ОБЛАСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЕТКИ INGAAS/ALINAS**

В данной работе представлен подход к оптимизации параметров полупроводниковых сверхрешетки InGaAs/AlInAs, согласованной и рассогласованной по периоду кристаллической решетки с подложкой InP, и сделан анализ влияния параметров гетероструктуры на ряд основных критериев указанных модуляторов.

V.S. VYAZANKIN

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **METHODICAL ERRORS CAUSED BY SUPERPOSITION OF ELECTRICAL AND OPTICAL SIGNALS IN A HETERODYNE LASER INTERFEROMETER**

In this paper, systematic approach for optimizing the parameters of the InGaAs/AlInAs semiconductor superlattices using various material systems: both lattice matched and strained with InP substrate is presented.

Оптические модуляторы являются ключевыми элементами оптических информационных систем. Среди возможных типов данных изделий, полупроводниковые модуляторы на основе квантово-размерного эффекта Штарка вызывают большой интерес для многих практических приложений. Основой таких модуляторов является набор квантовых ям, параметры которых необходимо подбирать с учетом требуемых критериев в зависимости от области применений. В данной работе проведена расчетная оценка параметров полупроводниковых сверхрешетки InGaAs/AlInAs, согласованной и рассогласованной по периоду кристаллической решетки с подложкой InP, и сделан анализ влияния параметров гетероструктуры на ряд основных критериев указанных модуляторов.

Представлены результаты анализа значения коэффициента поглощения квантовых ям InGaAs/AlInAs в зависимости от различных параметров. При расчете варьировались ширина квантовой ямы, величина приложенного напряжения, составы барьеров и квантовых ям. Для анализа использовались два основных критерия –  $\Delta\alpha/\alpha_0$  и  $\Delta\alpha/F$ , где  $\Delta\alpha/\alpha_0$  – отношение разницы коэффициента поглощения при приложении и отсутствии приложенного напряжения к коэффициенту поглощения при отсутствии приложенного напряжения, а  $\Delta\alpha/F$  – отношение разницы коэффициента поглощения при приложении и отсутствии приложенного напряжения к напряженности электрического поля.

Первоначально исследовалась сверхрешетка GaInAs/AlInAs, согласованная с подложкой InP по периоду кристаллической решетки. Установлено, что по мере увеличения напряженности электрического поля значения критерия  $\Delta\alpha/\alpha_0$  увеличиваются, однако значения критерия  $\Delta\alpha/F$  при определенном значении достигают максимума, затем начинают уменьшаться. При этом, максимальные значения критериев  $\Delta\alpha/\alpha_0$  и  $\Delta\alpha/F$  достигаются при различных значениях ширины квантовой ямы. Другими словами, определенная геометрия сверхрешетки не позволяет одновременно достигать максимальных значений рассматриваемых параметров и необходим поиск рационального компромисса между критериями  $\Delta\alpha/\alpha_0$  и  $\Delta\alpha/F$  в зависимости от специфики области применения.

Проведены расчеты для сверхрешеток GaInAs/AlInAs с рассогласованными слоями. Рассматривались сверхрешетки с рассогласованными квантовыми ямами и согласованными барьерами, а также с согласованными квантовыми ямами и рассогласованными барьерами. Показано, что второй вариант оказывает большее влияние на значения рассматриваемых критериев. При приложении электрического напряжения в рассогласованных сверхрешетках наблюдаются те же тенденции, что и в сверхрешетках, согласованных с подложкой InP по периоду кристаллической решетки. По мере увеличения рассогласования в барьере наблюдается улучшение значений требуемых критериев и смещение их максимальных значений в область меньших значений ширины квантовой ямы. При этом, в случае использования сверхрешеток с рассогласованными слоями необходимо контролировать уровень возникающих упругих напряжений для предотвращения возможной генерации дислокаций несоответствия. При выборе геометрии гетероструктур InGaAs/AlInAs для приборных применений следует искать компромисс между значениями требуемых критериев.

А. А. ГАРМАТИНА<sup>1,2</sup>, Е. И. МАРРЕВ<sup>2,3</sup>, А.А. КОРШУНОВ<sup>2,4</sup>, М. Д. МОЖАЕВА<sup>2,4</sup>,  
Ю.С. КРИВОНОСОВ<sup>2</sup>, А.В. БУЗМАКОВ<sup>2</sup>, И.Г. ДЬЯЧКОВА<sup>2</sup>, В.Е. АСАДЧИКОВ<sup>2</sup>, Н.В.  
МИНАЕВ<sup>2</sup> В.М. ГОРДИЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия;

<sup>2</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия;

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия;

<sup>4</sup>Институт лазеро-плазменных технологий национальный исследовательский ядерный университет  
МИФИ, Москва, Россия.

## ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ И МОНИТОРИНГ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ МИКРОФОКУСНОГО ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА

Создан микрофокусный лазерно-плазменный источник характеристического рентгеновского излучения, функционирующий на базе низкоэнергетичного волоконного фемтосекундного лазера с выходом рентгеновского излучения  $10^9$  фот/с/2π. Предложена методика и впервые проведены измерения размера области горячей плазмы, ответственной за генерацию рентгеновского излучения по обратно-отраженному сигналу второй гармоники и кратерам абляции. Установлено, что размер рентгеновского источника, оказывается порядка 6 мкм при максимальной энергии 30 мкДж, что является минимальным среди известных рентгеновских лазерно-плазменных источников.

A.A. GARMATINA<sup>1,2</sup>, E. I. MARREV<sup>2,3</sup>, A.A. KORSHUNOV<sup>2,4</sup>, M.D. MOZHAJEVA<sup>2,4</sup>,  
Yu.S. KRIVONOSOV<sup>2</sup>, A.V. BUZMAKOV<sup>2</sup>, I.G. DYACHKOVA<sup>2</sup>, V.E. ASADCHIKOV<sup>2</sup>, N.V. MINAEV<sup>2</sup>, V.M.  
GORDIENKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia;

<sup>2</sup>FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia;

<sup>3</sup>Moscow State University M.V. Lomonosov, Faculty of Physics, Moscow, Russia;

<sup>4</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia.

## LASER-PLASMA SECOND HARMONIC GENERATION AND ON-LINE MONITORING OF IMAGE OF THE MICROFOCUS LASER-PLASMA X-RAY SOURCE

A microfocus laser-plasma source of characteristic X-ray based on a low-energy femtosecond fiber laser with an X-ray flux of  $10^9$  photons/2π has been created. A technique for estimating the size of the hot plasma region responsible for the generation of X-rays from the second harmonic signal and ablation craters was developed and the size of the hot plasma region has been measured for the first time. It has been established that the size of the X-ray source is about 6 μm at a maximum energy of 30 μJ, which is the minimum among known X-ray laser-plasma sources.

В задаче получения рентгеновского фазо-контрастного изображения востребован источник размером менее 10 мкм с числом фотонов более  $10^8$  фот/с. Нами создан микрофокусный лазерно-плазменный источник характеристического рентгеновского излучения (8кэВ), функционирующий на базе низкоэнергетичного волоконного фемтосекундного лазера, излучение которого нормально падает на медную мишень, с выходом рентгеновского излучения  $10^9$  фот/с/2π. Предложена методика и впервые проведены измерения размера области горячей плазмы, ответственной за генерацию рентгеновского излучения по обратно-отраженному сигналу второй гармоники (ОВГ). Измерения размера области горячей плазмы показывают, что размер рентгеновского источника оказывается порядка 6 мкм при энергии 30 мкДж. Оценки области генерации рентгеновских фотонов согласуются с измеренными размерами кратеров абляции, созданными на поверхности мишени.

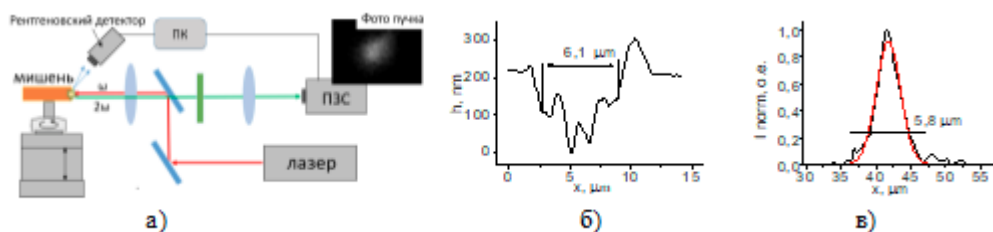


Рис.1 Экспериментальная установка (а), профиль кратера (б), профиль интенсивности ОВГ (в)

Работа выполнена в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры от 29 сентября 2021 г. № 2021-951-ФП5-3 и Соглашения Минобрнауки от 12.10.2021 № 075-15-2021-1362.

YUXIN LENG

*China-Russia Belt and Road Joint lab on Laser Science*

*The State Key Laboratory for High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), Chinese Academy of Sciences*

**ULTRA-INTENSE LASER SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS IN PLASMA PHYSICS  
AT SIOM**

Development of ultra-intense and ultrafast lasers have promised scientists with unprecedented extreme physical conditions and new experimental techniques. A series of ultra-intense and ultra-fast lasers (0.2PW, 1PW and 10PW lasers) have been developed in SIOM (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences), which have been in opening operation for the internal and international end users. Some laser driven particle acceleration experiments have been carried out based on these lasers recently. For example, the laser driven electron accelerator has been achieved with near GeV energy and <1% energy spread. Further, a free-electron lasing using a laser wakefield electron accelerator has been demonstrated.

Currently, a prototype with 250 TW/ 14fs has been demonstrated. By seeding a broadband pulse, we realized 210 nm broadband amplification at the central wavelength of 925 nm using three-stage LBO based OPCPA amplifiers. This laser is running at 0.1 Hz by employing a home-built rep-rate high energy pump laser, that will be installed as the frontend for SEL-100PW laser.

Finally, the development of China-Russia joint lab is presented, which will be an excellent collaboration platform for the laser and laser physics scientists in China and Russia.

К.А. ГАЛЮК<sup>1,2</sup>, Б.Д. ОВЧАРЕНКО<sup>1</sup>, В.В. БУКИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Разработана математическая модель квантрона с поперечной диодной накачкой, основанная на методе трассировки лучей, рассчитаны эффективность поглощения излучения накачки и распределение плотности запасенной энергии по поперечному сечению активного элемента. Проведена оптимизация конструкции модуля, направленная на увеличение эффективности поглощения излучения накачки в активном элементе. Проведены измерения зависимости коэффициента усиления слабого сигнала от времени для различных токовых импульсов накачки.

K.A. GALYUK<sup>1,2</sup>, B.D. OVCHARENKO<sup>1</sup>, V.V. BUKIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MODELING OF A TRANSVERSE DIODE PUMPED LASER MODULE

A mathematical model of quantron with transverse diode pumping based on the ray-tracing method is developed, the pumping radiation absorption efficiency and the stored energy density distribution along the cross-section of the active element are calculated. The optimization of the module design to increase the efficiency of pump radiation absorption in an active element has been performed. Time dependence of the weak signal amplification coefficient was measured for different pump current pulses.

Разработка математической модели лазерных модулей с поперечной диодной накачкой (квантронов) представляет интерес как для решения задач оптимизации конструкции таких изделий (повышение эффективности накачки, получение заданных распределений инверсии населенности) так и для использования динамической модели процесса накачки при создании лазерных систем со сложной циклограммой работы (многоимпульсная генерация, лазеры с электронной обратной связью, усиление импульсов со сложной зависимостью мощности от времени). В данной работе представлены результаты исследований, направленных на определение параметров излучения накачки лазерных диодных решеток и разработку модели оптической накачки активного элемента в составе квантрона. Целью данной работы является повышение эффективности квантрона и создание математической модели твердотельного лазерного модуля с оптической накачкой.

В качестве источника излучения накачки в квантронах, разрабатываемых в ИОФ РАН, применяются лазерные диодные решетки производства НПП "Инжект". Для выбора параметров модели данного источника были проведены эксперименты по измерению углового распределения плотности мощности излучения ЛДР. Методом численного моделирования (трассировка лучей) получены пространственные распределения плотности запасенной энергии по сечению активного элемента. Экспериментально измерена зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от времени для различных импульсов тока накачки.



Рис. 1. Математическая модель пятиматричной накачки АЭ

а) изображение 3D модели; б) распределение поглощенной мощности излучения накачки по сечению Nd:YAG (АЭ)

При моделировании процесса оптической накачки в качестве спектрального распределения плотности мощности излучения ЛДР использовалось измеренное распределение. При этом в модели возможно варьировать ширину спектра излучения, а также центральную длину волны, что необходимо для определения влияния разброса этих характеристик в пределах партии ЛДР и моделирования работы квантрона при различных температурах. Для задания характеристик поглощения активной среды используются табличные данные по спектру поглощения Nd:YAG с учётом концентрации ионов Nd<sup>3+</sup> в активном элементе.

Разработанная модель позволяет определять характеристики лазерного диодного модуля с поперечной накачкой. Проведена серия численных экспериментов, направленная на оптимизацию конструкции квантронов с целью повышения эффективности поглощения излучения накачки в активном элементе путем выбора расстояния между ЛДР и активным элементом, диаметра и толщины трубки протока охлаждающей жидкости, концентрации ионов Nd<sup>3+</sup> в активной среде и различных конфигураций отражателей излучения накачки, непоглощенного в активной среде.

## МОЩНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ЭКСИПЛЕКСНЫЙ ЛАЗЕР

Приведены результаты разработки и исследования мощного электроразрядного ХеСl лазера. Установлены зависимости его выходных характеристик от условий возбуждения, состава и давления активной среды. Получена максимальная энергия генерации в 3 Дж при длительности импульса ~120 нс.

S.S. ANUFRIK, A.P. VOLODENKOV, K.F. ZNOSKO  
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

## POWERFUL ELECTRIC DISCHARGE EXIPLEX LASER

The results of the development and research of a high-power electric-discharge XeCl laser are presented. The dependences of its output characteristics on the excitation conditions, composition and pressure of the active medium are established. The maximum generation energy of 3 J was obtained for a pulse duration of ~120 ns.

Электроразрядные эксиплексные лазеры остаются до настоящего времени одними из самых мощных источников когерентного ультрафиолетового излучения [1-2]. Благодаря ряду своих свойств, таких как высокая пиковая мощность, малая угловая расходимость, возможность получения узкой линии генерации они находят все большее применение. Их разработка и совершенствование открывает новые возможности в области фотолитографии, обработке материалов, разделению изотопов, наноструктурировании материалов, зондировании атмосферы [3-4].

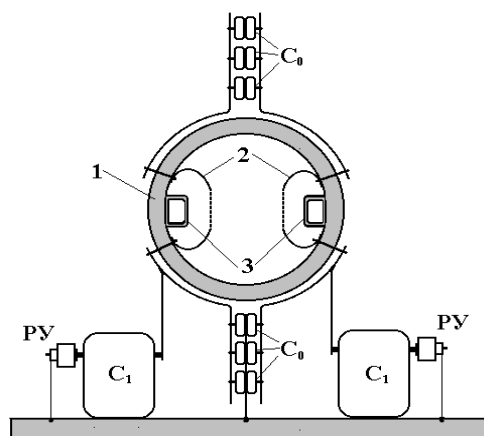


Рис. 1. Схема эксиплексного лазера.

Важнейшим звеном электроразрядных эксиплексных лазера является система возбуждения. В значительной степени именно она определяет энергию генерации, мощность, длительность, форму импульса генерации. Нами была применена оригинальная система возбуждения поперечного разряда, состоящая из трех параллельных секций встречноключенных LC-контуров, работающих на общую обострительную емкость  $C_0$ . Накопительные емкости  $C_1$  встречноключенных секций (конденсаторы КМЧ 50-0,1, емкостью 100 нФ, 50 кВ) заряжались напряжением противоположной полярности. Это позволило снизить рабочее напряжение в два раза. Обострительная емкость  $C_0$  (общей емкостью 30 нФ) набиралась последовательно-параллельным включение конденсаторов К15-10, номиналом 3,3 нФ, 30 кВ. В качестве коммутаторов в каждой секции использовались по два разрядника РУ-65. Срабатывание коммутаторов синхронизировалось с точностью  $\pm 5$  нс как в пределах одной секции, так и между ними.

Проведены исследования генерационных характеристик лазера в зависимости от состава и давления рабочей смеси, зарядного напряжения, параметров цепи возбуждения разряда. Максимальное значение выходной энергии составляло 3 Дж на смеси состава ХеСl : Хе : Не – 1 : 15 : 3000 при общем давлении 4 атмосферы и зарядном напряжении 36 кВ. Длительность импульса генерации составляла ~120 нс.

### Список литературы

1. Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. и другие // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 3. С. 237-240.
2. В. Ф. Лосев, Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф. и другие // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 1. С. 33-39.
3. Дударев В.В., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н. и другие // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 8. С. 687-691.
4. Delmdahl R., Patzel R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. No 3. P. 034004.
5. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Володенков А.П. // Журнал прикладной спектроскопии. 1999. Т. 66, №5. С.702-707.
6. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // **Journal of Optical Technology**. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
7. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // **Russian Physics Journal**. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.



Е.А. ЯРУНОВА, А.А. КРЕНЦ, Н.Е. МОЛЕВИЧ

Самарский университет, Самара, Россия

СФ ФИАН, Самара, Россия

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ VCSEL С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ

Рассматривается поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL). Исследуется эффективность метода внешнего оптического излучения для стабилизации пространственно-временной динамики. Известно, что в системе развивается модуляционная неустойчивость, которая приводит к нерегулярной динамике в поперечном сечении пучка. Учитывается, что профиль накачки имеет форму супер-Гауссова пучка. Метод слабой внешней оптической инжекции оказывается эффективным для подавления модуляционной неустойчивости.

E.A. YARUNOVA, A.A. KRENTS, N.E. MOLEVICH

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## STABILIZATION OF VCSEL RADIATION USING EXTERNAL OPTICAL INJECTION

A surface-emitting laser with a vertical resonator (VCSEL) is considered. The effectiveness of the method of external optical radiation for the stabilization of space-time dynamics is investigated. It is known that a modulation instability develops in the system, which leads to irregular dynamics in the beam cross-section. It is taken into account that the pump profile has the form of a super-Gaussian beam. The method of weak external optical injection is effective for suppressing modulation instability.

Поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором описывается системой, которая подробно представлена в работе [1], при этом в систему добавляется внешнее оптическое излучение амплитудой  $E_{inj}$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = -[1 + i\theta + 2C(i\alpha - 1)(N - 1)]E + i\Delta_{\perp}E + E_{inj}, \\ \frac{\partial N}{\partial t} = -\gamma[N - I_p + |E|^2(N - 1)] + \gamma d\Delta_{\perp}N, \end{cases}$$

Режим пространственно-однородной генерации оказывается неустойчивым по отношению к пространственно-временным возмущениям. В результате в системе развивается нерегулярная динамика, показанная на рисунке 1(а). В широкоапертурных лазерах накачка естественным образом обеспечивается на большой площади в поперечном сечении. Для этой цели широко используются профили, которые близки к однородным в центральной части и медленно уменьшаются к краям профиля. Профиль накачки в данной работе имеет вид  $I_p = I_0 \exp\left[-0.5\left(\frac{r}{w_0}\right)^n\right]$ , при этом  $r$  – радиус-вектор, описывающий координаты в плоскости поперечного сечения пучка,  $w_0$  – определяет величину спада амплитуды пучка на краях апертуры по сравнению со значением на оси, а  $n$  – число, характеризующее форму пучка. Результат стабилизации лазерного излучения показан на рисунке 1(б). Эффект стабилизации имеет пороговую природу, так как лазер проявляет некоторую нерегулярную поперечную модуляцию интенсивности, уменьшающуюся с увеличением силы инжекции и исчезающую при пороговом значении инжекции. Получено, что слабая инжекция, то есть менее 1% от интенсивности лазерной генерации, позволяет подавить пространственно-временную неустойчивость и получить равномерный профиль. Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

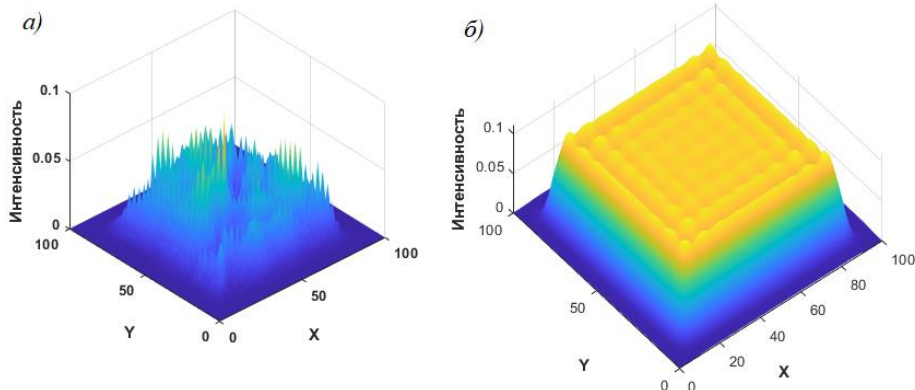


Рис. 1. Параметры системы  $\theta = -1.5, C = 0.6, I_0 = 1.9, d = 0.052, \alpha = 1.5, n = 10$  а)  $E_{inj} = 0$  б)  $E_{inj} = 0.03$

Список литературы

1. Ahmed W.W., Kumar S. and others // Physical review A 2015. Vol. 92, P. 043829-1-043829-8.

А.Ю.ДАНИЛОВ<sup>1</sup>, А.С.ЩЕКИН<sup>1</sup>, А.А.ГАВРИКОВ<sup>1</sup>, В.Н.ПЕТРОВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНОВОДА ИЗ ВОДЯНОЙ СТРУИ

Ламинарная водяная струя может служить волноводом для лазерного излучения при определенных параметрах. В данной работе было проведено исследование образования струи воды, вытекающей из отверстия в резервуаре. Была построена компьютерная модель этого процесса. С помощью компьютерной модели были исследованы турбулентные течения в нем с целью определения оптимальных параметров минимизирующих эти эффекты.

A.Y.DANILOV<sup>1</sup>, A.S.SHCHEKIN<sup>1</sup>, A.A.GAVRIKOV<sup>1</sup>, V.N.PETROVSKIY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## COMPUTER SIMULATION OF WAVEGUIDE FORMATION FROM A WATER JET

A laminar water jet can serve as a waveguide for laser radiation under certain parameters. In this paper, a study was conducted on the formation of a jet of water flowing out of a hole in the tank. A computer model of this process was built. With the help of a computer model, turbulent flows in it were investigated in order to determine the optimal parameters that minimize these effects

Вода – один из наиболее часто встречающихся оптически прозрачных материалов. Ламинарный водяной поток возможно использовать как волновод для лазерного излучения.[1]

Водяная струя в качестве волновода для лазерного излучения имеет ряд преимуществ, главными из которых являются возможность управления направлением излучения, а также крайне быстрое удаление побочных продуктов при лазерной обработке.

Моделирование формирования струи очень важно. Использовать все преимущества водяной струи в контексте данной работы возможно только при сохранении ламинарности потока. Наличие турбулентных явлений крайне негативно сказывается на свойствах водяной струи и способствует ее скорейшей дестабилизации, кроме того турбулентная водяная струя крайне неуправляема, что не позволяет использовать ее в качестве волновода для лазерного излучения.

В настоящей работе была построена компьютерная модель вытекания воды из емкости, а так же оценены турбулентные характеристики (Рисунок 1) для различных параметров. При использовании данной модели становится доступен компьютерный подбор оптимальных параметров для каждой конкретной задачи. Данный подход позволяет обеспечить наилучшее исполнение поставленных задач.

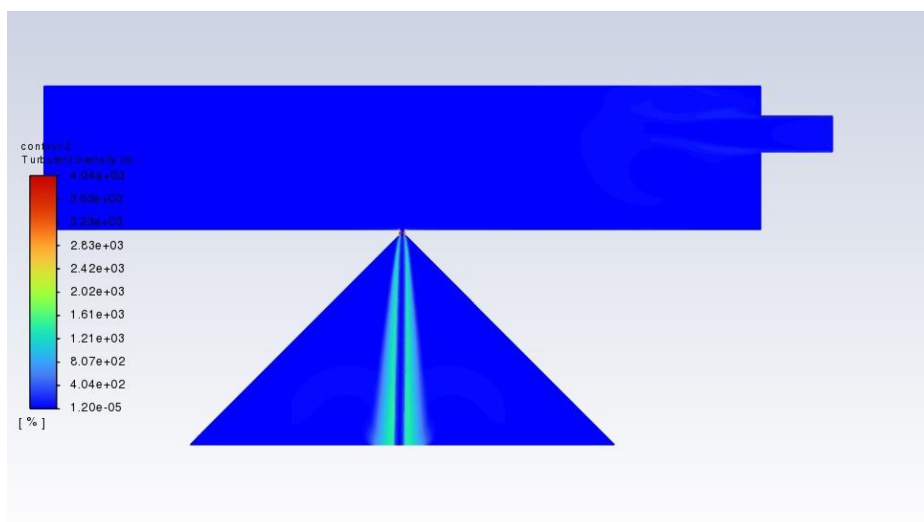


Рисунок 1 Наглядное изображение зон повышенной турбулентности

### Список литературы

1. Yan Liu a,d , Meirong Wei a , Tao Zhang a,d , , Hongchao Qiao b , , Hui Li c et al. Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology // Optics and Laser Technology. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 137, № August 2020. P. 106820.

<sup>1</sup>М.С. КОРНЕЕВ, <sup>2</sup>А.С. ТИЩЕНКО

[1] Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

[2] РФЯЦ ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Найдена и изучена методика определения концентрации  $Ti^{3+}$  в активных элементах (АЭ) из титан-сапфира. Измерена величина коэффициента отражения АЭ. На основе этих данных была посчитана концентрация  $Ti^{3+}$ . Результаты согласуются с паспортными данными с высокой точностью, что свидетельствует о возможности применения метода на практике.

<sup>1</sup>M.S. KORNEEV, <sup>2</sup>A.S. TISHCHENKO

[1] National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

[2] RFNC VNIITF, Snezhinsk, Russia

### DEFINING THE PARAMETERS OF THE ACTIVE ELEMENT.

A method for determining the concentration of  $Ti^{3+}$  in active elements (AE) from titanium sapphire has been found and studied. The value of the AE reflection coefficient was measured. Based on these data, the  $Ti^{3+}$  concentration was calculated. The results are consistent with the passport data with high accuracy, which indicates the possibility of applying the method in practice.

Определение концентрации  $Ti^{3+}$  в активном элементе (АЭ) из титан-сапфира является актуальной задачей, так как она представляет собой одну из ключевых характеристик для заказа АЭ у отечественного производителя. Одной из методик определения концентрации  $Ti^{3+}$  является ее расчёт на основе коэффициента поглощения образца. Эти две величины связаны между собой следующим образом [1]:

$$C_{Ti^{3+}} = 0.07 * k(l = 1\text{см})$$

(1)

$k(l = 1\text{см})$  – коэффициент поглощения с линейным размером (в направлении исследуемого излучения) в 1см.

Коэффициент поглощения на произвольной длине  $l^*$ . Для этого воспользуемся законом Бюргера-Ламберта:

$$\frac{I(l)}{I(0)} = \exp(-\alpha * l) = k(l) \quad (2)$$

$k(l)$  – коэффициент поглощения образца при прохождении излучения на глубину  $l$ ,  $I(0)$  и  $I(l)$  – интенсивности падающей и прошедшей волн соответственно.

#### Список литературы

1. Lingling Xuan. Thermodynamic and kinetic model of point defect distributions during Ti sapphire growth. Crystallography. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. English. (NNT : 2021GRALI083). (tel-03519171) NIST Chemistry WebBook, SRD 69. – URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>

М.В. РЕШЕТОВА<sup>1,2</sup>, Н.М. АШАРЧУК<sup>2</sup>, Е.О. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>, Е.А. МИГАЛЬ<sup>3</sup>, Ф.В. ПОТЕМКИН<sup>3</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>2</sup>

*1 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

*2 Институт фотонных технологий ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, Троицк, Москва, Россия*

*3 Физический факультет МГУ, Москва, Россия*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ**

Проведена модернизация и настройка установки для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки, (simultaneous spatiotemporal focusing SSTF). Оценена ее работоспособность после модернизации, напечатана матрица тестовых образцов при различных параметрах лазерных импульсов, получены данные, подтверждающие возможность управления размером вокселя.

M.V. RESHETOVA<sup>1,2</sup>, N.M. ASHARCHUK<sup>2</sup>, E.O. EPIFANOV<sup>2</sup>, E.A. MIGAL<sup>3</sup>, F.V. POTEMKIN<sup>3</sup>, N.V. MINAEV<sup>2</sup>

*1 National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

*2 Institute of Photonic Technologies, Crystallography and Photonics Federal Research Center RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

*3 Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

## **OPTIMIZATION OF THE APPARATUS FOR FORMING THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES BY THE MEANS OF TWO-PHOTON FEMTOSECOND POLYMERIZATION USING SIMULTANEOUS SPATIOTEMPORAL FOCUSING**

The apparatus for the formation of three-dimensional structures by means of two-photon femtosecond polymerization using simultaneous spatiotemporal focusing was modernized and configured. Its performance after modernization was evaluated; matrices of test samples were printed with various parameters of laser pulses; data confirming the possibility of controlling the voxel size were obtained.

Одним из примеров применения аддитивных технологий при создании микрообъектов является лазерная трехмерная печать, использующая технологию двухфотонной полимеризации [1]. В области перетяжки сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения формируются условия для нелинейного двухфотонного поглощения, что позволяет проводить отверждение материала в крайне компактной области субмикронного масштаба в случае использования объективов с высокой кратностью и большой числовой апертурой (100X, н.а. 1.3).

Однако, при создании структур с субмикронным разрешением возникают проблемы, связанные с большими временными затратами на формирование объектов. Так структуры с характерным размером несколько миллиметров с микронным и субмикронным разрешением могут изготавливаться часами и даже сутками. Одним из методов увеличения производительности является применение техники пространственно-временной фокусировки. Данный метод дает дополнительную (к регулировке мощностью излучения) возможность регулирования размера и формы «вокселя» - трехмерного пикселя, являющегося областью полимеризации при двухфотонном поглощении. Увеличивая непосредственно во время печати размер вокселя, можно быстро заполнять области, не требующие высокого разрешения, а, уменьшая воксель, печатать нужные части структуры с высоким разрешением. Кроме того, метод SSTF позволяет корректировать высокую эллиптичность вокселя, делать его более сферическим, что делает разрешение по оси Z близким к разрешению по осям X и Y, что упрощает программную реализацию процесса печати [2].

В представляемой работе техника SSTF реализована с использованием излучения второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста, Россия) ( $\lambda=525\text{нм}$ , длительность импульса  $\sim 200\text{фс}$ , частота повторения 70МГц,  $P_{\text{cp}} \leq 1,2\text{ Вт}$ ). В установке лазерный луч проходит через две оптические системы: временного растяжения (стретчер типа Мартинез) и сжатия (компрессор типа Трейси). В стретчере спектральные составляющие импульса разносятся по времени за счет внесения положительной дисперсии спектральных компонент. В компрессоре выполняется перекомпенсация дисперсии, которая позволяет скомпенсировать дисперсию, вносимую фокусирующим объективом, а также выполняется разнесение по пространству спектральных компонент. Варьирование положения уголкового отражателя на моторизированной подвижке позволяет проводить юстировку системы SSTF и оптимизировать дисперсию фокусирующей оптики, пространственное и временное распределение спектральных компонент фемтосекундного лазерного импульса в точке фокусировки. Модернизированная установка позволит в перспективе существенно повысить скорость печати изделий сантиметрового масштаба без потери возможности в плане формирования структур с субмикронной точностью.

### *Список литературы*

1. Schmidleithner C., Kalaskar D.M. // Stereolithography. Intechopen, July 2018. V. 32. P. 137.
2. Chu W. et al. Centimeter-Height 3D Printing with Femtosecond Laser Two-Photon Polymerization // Adv. Mater. Technol. Wiley-Blackwell, 2018. Vol. 3, № 5. P. 1700396

П.А. ЩЕГЛОВ, М.В. ЧАЩИН, А.А. ТАУСЕНЕВ, М.М. НАЗАРОВ  
*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## **ВЫХОД РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЭНЕРГИИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ МУЛЬТИТЕРАВАТТОВОГО ИМПУЛЬСА**

Исследован выход характеристического рентгеновского излучения от облучаемой твердотельной мишени лазерными импульсами в зависимости от энергии и длительности этих импульсов. Получен пучок ускоренных электронов с энергиями 0.5-5 МэВ.

P.A. SHCHEGLOV, M.V. CHASHCHIN, A.A. TAUSENEV, M.M. NAZAROV  
*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## **THE YIELD OF X-RAY RADIATION FROM A LASER-PLASMA TARGET WHEN THE ENERGY AND DURATION OF A MULTI-TERAWATT PULSE ARE VARIED**

The yield of characteristic X-ray radiation from a solid target irradiated by laser pulses is studied as a function of the energy and duration of these pulses. A beam of accelerated electrons with energies of 0.5-5 MeV has been obtained.

При воздействии сверхмощных лазерных импульсов на поверхность твердотельных мишеней образуется плотная приповерхностная плазма, которая служит источником не только электромагнитных импульсов в широких диапазонах частот, но и ускоренных заряженных частиц. Эффективность этих процессов и механизмы передачи энергии от лазерного излучения к плазме определяются интенсивностью  $I$ , энергией лазерных импульсов, а также их временным контрастом, что влияет на пространственный масштаб градиента электронной плотности образующейся плазмы. Меняя энергию и длительность импульса  $\tau$  возможно переключать механизмы передачи энергии плазме от обратно-тормозного поглощения, через резонансное поглощение до вакуумного нагрева. Изменение механизма передачи энергии приводит к изменению характера вторичных излучений. Целью работы являлась оптимизация выхода рентгеновского излучения и ускорение электронов при воздействии на поверхность твердотельных мишеней лазерных импульсов около-релятивистской интенсивности ( $I \sim 10^{17}-10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>).

Использовался лазерный комплекс «Pulsar-200 TW», с  $\lambda=800$  нм,  $\tau$  от 30 фс до 3 пс и энергией до 250 мДж. Контраст лазерного импульса составлял  $10^7$  на пикосекундном масштабе и  $10^5$  для фемтосекундного предимпульса с наносекундной отстройкой. Мишенью служила лента (медь, лавсан) толщиной 10-100 мкм, которая протягивалась с помощью лентопротяжного механизма, чтобы каждый лазерный импульс взаимодействовал с неповрежденной поверхностью мишени. В ходе взаимодействия генерировались вторичные излучения: яркое характеристическое и тормозное рентгеновские излучения, гармоники 3/2 и 2-я. Рентгеновское излучение регистрировалось ФЭУ, для разделения характеристических линий меди от тормозного излучения использовалась брегговская дифракция от кристалла кремния  $\langle 111 \rangle$ . Вторичное видимое излучение использовалось для дополнительной информации о плазменном источнике. Пучок ускоренных электронов измерялся как в направлении зеркального отражения, так и «на просвет».

Обнаружено, что выход вторичного излучения из фемтосекундной лазерной плазмы (рентгеновское, гармоники) определяется в первую очередь плотностью энергии, а не интенсивностью или длительностью импульса накачки. Отличия конверсии между разными режимами (резонансное поглощение, вакуумный нагрев) сводятся к изменению показателя степенной зависимости (выхода от плотности мощности) на  $\sim \pm 0.2$ . Наибольший выход характеристического рентгеновского излучения составил  $5 \cdot 10^8$  фотонов/(импульс  $\cdot 2\pi$ ). Получены ускоренные электроны в слаборасходящемся канале с энергиями 0.5-5 МэВ. Исследовано в каком диапазоне параметров можно получить пучок ускоренных электронов. При переходе к  $I \sim 10^{18}-10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>, предложенная схема будет полезна как эффективный источник рентгена и ускоренных электронов, что позволит использовать их для дальнейших исследований в схеме накачка-зонд.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.

П.И. ГОЛОВЧЕНКО, Д.С. КАЛАШНИК, М.А. ФОКИНА, М.П. ПАТАПОВИЧ  
УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь

## ПОСЛОЙНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ДЕКОРАТИВНОГО ГВОЗДЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Проведен послойный анализ металлов и сплавов, содержащих в своем составе железо, при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень в атмосфере воздуха. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1.

P.I. HALOUCHANKA, D.S. KALASHNIK, M.A. FOKINA, M.P. PATAPOVICH  
Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

## LAYER-BY-LAYER SPECTRAL ANALYSIS OF THE COMPONENTS OF A DECORATIVE NAIL WHEN ITS SURFACE IS EXPOSED TO DOUBLE LASER PULSES

A layer-by-layer analysis of metals and alloys containing iron in their composition has been carried out under the action of dual laser pulses on a target in an air atmosphere. The experiments were carried out using a laser two-pulse multichannel atomic emission spectrometer LSS-1.

В строительном производстве, а также при изготовлении мебели крепление некоторых материалов выполняют с помощью особого крепежа, называемого декоративными гвоздями. Данный крепеж должен обеспечивать не только достаточную прочность скрепления деталей, но и обладать высокими антикоррозионными свойствами и высокой эстетичностью. Эти требования и обуславливают конструкционные особенности декоративного гвоздя, который, подобно строительным аналогам, состоит из стержня с заостренным концом и головки. Тело такого объекта в основном имеет цилиндрическую форму, однако встречаются также конусовидные, параллелепипедные и пирамидальные экземпляры. Железо является одним из основных элементов, который широко применяется в производстве современных инструментов благодаря своей прочности, эластичности и устойчивости к деформации.

Для проведения послойного анализа такого крепежа как декоративный гвоздь в данной работе был использован лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»), где в качестве источника возбуждения плазмы выступает двухимпульсный неодимовый лазер с возможностью регулирования временного интервала между импульсами [1]. При проведении данного исследования энергия импульсов находилась в диапазоне от 20 до 60 мДж, а фокусное расстояние объектива равнялось 104 мм. В ходе проведенных предварительных исследований были выбраны оптимальные режимы работы и длина волны для аналитической линии железа: Fe (438,426 нм). В качестве примера, на рис. 1, приведена зависимость интенсивности линии данного химического элемента от числа сдвоенных лазерных импульсов. Энергия импульсов в среднем составляла 49 мДж и задержка между импульсами равнялась 10 мкс.

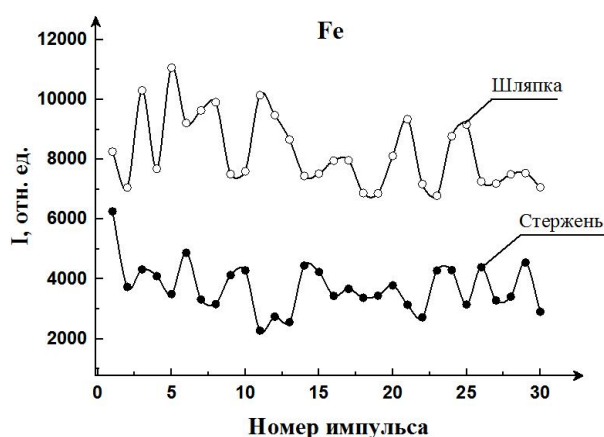


Рис. 1. Зависимость интенсивности линии железа от числа импульсов

Таким образом, проведенные исследования методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии позволяют проводить послойный анализ различных объектов и управлять характеристиками приповерхностной лазерной плазмы.

### Список литературы

1. A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki, M. Okuda. // Thin Solid Films. 2003. V.445. P. 263-267.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены численные исследования изменения траекторных характеристик движения космического мусора при воздействии импульсного лазерного излучения. Проведены оценки изменения траекторных параметров для фрагментов космического мусора с различными массами.

N.S. ZAKHAROV, A.G. SPITSYN  
FSKI «12 TsSRI» of the Russian Defense Ministry

## NUMERICAL SIMULATION OF CHANGES IN THE TRAJECTORY PARAMETERS OF SPACE DEBRIS UNDER THE INFLUENCE OF LASER RADIATION

Numerical studies in the trajectory characteristics of the motion of space debris under the influence of pulsed laser radiation are presented. Estimates of changes in trajectory parameters for fragments of space debris with different masses have been carried out.

Рассматривается задача численного моделирования изменения траекторных параметров фрагмента космического мусора (КМ) при сообщении ему импульсного ускорения. Придание возмущающего ускорения осуществляется путём воздействия на фрагмент импульсным лазерным излучением (ЛИ) с интенсивностью, обеспечивающей испарение материала КМ. Считается, что механический импульс сообщается центру масс фрагмента КМ мгновенно.

Для проведения численного исследования возмущённого движения центра масс фрагмента КМ используется метод оскулирующих элементов [1, 2]. Возмущённое движение КМ описывается следующей неоднородной системой дифференциальных уравнений:

$$\ddot{x} = -\frac{\mu x}{r^3} + j_{x\epsilon}(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t), \quad \ddot{y} = -\frac{\mu y}{r^3} + j_{y\epsilon}(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t), \quad \ddot{z} = -\frac{\mu z}{r^3} + j_{z\epsilon}(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t),$$

где  $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  – проекции ускорения,  $\mu$  – гравитационная постоянная,  $x, y, z$  – координаты,  $r$  – радиус,  $j_{x\epsilon}, j_{y\epsilon}, j_{z\epsilon}$  – проекции возмущающего ускорения. В методе оскулирующих элементов вместо произвольных постоянных интегрирования  $x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \tau$  применяются более удобные постоянные интегрирования, называемые кеплеровскими элементами орбиты  $\Omega, i, \omega, a, e, \tau$ , полностью определяющие движение центра масс фрагмента КМ [1]. Полагая, что движение КМ происходит в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат, начало которой размещено в центре масс Земли, вводя орбитальную систему координат, и считая, что направление импульса силы совпадает с направлением ЛИ, которое подходит к фрагменту КМ под углами  $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$  и  $\beta \in [0; 2\pi]$ , получим систему дифференциальных уравнений для определения совокупности искомого оскулирующих элементов [3]. При этом необходимо заменить оскулирующие элементы  $\omega$  и  $e$  на новые  $q$  и  $k$ , выраженные через проекции на вектор Лапласа, а вместо большой полуоси  $a$  использовать в качестве оскулирующего элемента фокальный параметр  $p=b^2/a$ . Таким образом, задача определения изменения траекторных параметров КМ сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений для элементов оскулирующей орбиты [3].

Для интегрирования полученной системы уравнений была составлена численная программа в пакете Mathcad. Расчёты проводились для воздействия ЛИ с плотностью энергии  $\sim 1$  кДж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса  $\sim 1$  мс. Исходная орбита КМ выбиралась околокруговой, высотой  $h = 550$  км, с параметрами, приведенными в работе [3]. Предполагалось, что углы ориентации реактивной силы и ЛИ составляют  $\alpha = 0$ ,  $\beta = \pi$ . Результаты проведённых оценок показывают, что при воздействии ЛИ с указанными параметрами достигаются существенные изменения формы и высоты перигея (или апогея) орбиты. При данных условиях изменение траекторных параметров при сообщении возмущающего ускорения центру масс фрагменту КМ приобретает смысл манёвра по изменению высоты апогея или перигея, что можно оценить по изменению величины фокального параметра. Для фрагмента КМ с характерным размером  $d = 1$  см после однократного воздействия ЛИ происходит такое изменение высоты перигея, при котором он спускается ниже высоты низкой опорной орбиты, вследствие чего КМ продолжит снижение до условной границы атмосферы, при входе в которую сгорит. Для  $d > 2$  см при однократном воздействии ЛИ параметры орбиты изменяются недостаточно для увода фрагмента КМ в плотные слои атмосферы. В этом случае необходимо многократное воздействие на фрагмент КМ в точке, принадлежащей исходной и измененной орбите.

### Список литературы

1. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. – М.: Наука, 1972. – 360 с.
2. Мирер С.А. Механика космического полёта. Орбитальное движение. – М.: Резолит, 2007. – 160 с.
3. Захаров Н.С., Спицын А.Г. Численное исследование изменения траекторных параметров фрагментов космического мусора при импульсном действии лазерного излучения. – Двойные технологии, № 2(99). – 2022. – С. 26-31.



## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЬНОГО ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ИМЕЮЩЕГО РАДИАЛЬНУЮ ПОЛЯРИЗАЦИЮ

Рассмотрен способ генерации профильного пучка лазерного излучения с радиальной поляризацией и устройство для его реализации. Предлагаемый способ позволяет упростить конструкцию оптического квантового генератора, а также повысить количество энергии, снимаемой с инвертированной области. Проведены сборка и юстировка данного устройства.

M.M.ZAKHARCHUK<sup>1,2</sup>, T.T.KONDRATENKO<sup>1</sup>, A.T.SAHAKYAN<sup>1</sup>, V.N.PUZYREV<sup>1</sup>, A.N.STARODUB<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peoples' Friendship University of Russia", Moscow, Russia

## FORMATION OF A PROFILE BEAM OF LASER RADIATION HAVING RADIAL POLARIZATION

The method of generating a profile beam of laser radiation with radial polarization and a device for its implementation. The proposed method allows to simplify the design of the optical quantum generator, as well as increase the amount of energy taken from the inverted area. The assembly and adjustment of this device have been carried out.

Одно из наиболее развиваемых направлений исследований в области лазерной техники – это разработка способов и устройств генерации профильных пучков лазерного излучения, имеющих радиальную поляризацию [1]. Одновременно предъявляются специальные требования к модовому составу пучков в зависимости от применения. В частности, для некоторых приложений пучок излучения должен иметь ограниченное количество продольных мод [2], а для других целей пучок должен иметь увеличенное количество мод [3].

В Лаборатории воздействия лазерного излучения (ЛВЛИ) ФИАН был предложен способ формирования трубчатого пучка лазерного излучения с радиальной поляризацией с ограниченным или увеличенным числом мод [4]. Предложенный способ позволяет повысить количество энергии, снимаемой с инвертированной области. Основой конструкции оптического квантового генератора является полый тонкостенный активный элемент (АЭ) особого вида из неодимового стекла. Он представляет собой полый цилиндр с торцами в виде усечённых конусов, составляющих угол Брюстера с плоскостью, которая образует угол  $90^\circ$  с его оптической осью.

Предложенный способ позволяет проводить селекцию генерируемых пространственных мод изменением формы 100%-го отражающего зеркала резонатора. При этом моды высоких порядков внутри резонатора отсутствуют, если в схеме применить сферическое отражающее зеркало. В случае, когда необходимо будет создать профильный пучок излучения лазера с радиальной поляризацией и увеличенным числом пространственных мод, то отражающее зеркало в представленной схеме будет плоским или будет иметь вид усечённого конуса. Упрощённая принципиальная схема такого лазера, представлена на рисунке 1.

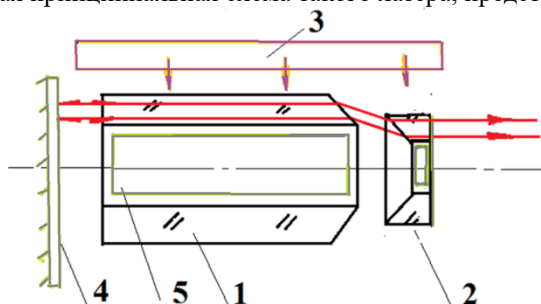


Рис. 1. Упрощённая схема для генерации увеличенного числа мод: 1) Активный элемент (АЭ) в виде полого кругового цилиндра с торцом в виде усечённого конуса под углом Брюстера относительно плоскости поперечной оптической оси; 2) Частично отражающее зеркало; 3) Система накачки; 4) Плоское 100% отражающее зеркало; 5) Внутренний отражатель.

### Список литературы

1. Патент РФ № 2156528, опубл. 20.09.2000
2. Н.В. Купреев, П.А. Михеев, А.А. Шепеленко. Генерация одномодового излучения в широкоапертурном неустойчивом резонаторе с полупрозрачным выходным зеркалом и внутрирезонаторным астигматизмом // Квантовая электроника, 23, № 4, (1996), стр. 356
3. Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V. and Starodub A.N. Laser for ICF with a controllable function of mutual coherence of radiation.// J. Russian Laser Research. – 2004. – V. 25. – P. 79
4. Патент РФ № 2774664, опубл. 24.06.2022

Я.В. УЛЬЯНОВ, Е.А. ЧЕШЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧИП-ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -КЕРАМИКИ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

Данная работа посвящена исследованию композитных микро-резонаторов на основе лазерной керамики  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ . Лазерные керамические элементы для микрорезонаторов были изготовлены методом реактивного спекания смеси порошков оксидов. В качестве исходных высокочистых материалов использовались оксид иттрия («Ланхит», Россия), оксид алюминия (Sumitomo Chem. Япония) и оксид неодима («Ланхит», Россия), нитраты кальция, магния и хрома (III). Суммарная концентрация двухвалентных примесей выбиралась равной концентрации ионов  $\text{Cr}^{3+}$  и составляла 0,1 атомных процента. Соотношение CaO к MgO сохранялось равным 1 к 4 для всех образцов.

Y.V. ULYANOV, E.A. CHESHEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **INVESTIGATION OF THE GENERATION CHARACTERISTICS OF CHIP ELEMENTS BASED ON $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ CERAMICS FOR COMPACT DIODE-PUMPED PULSE LASERS**

This work is devoted to the study of composite microcavities based on  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  laser ceramics. Laser ceramic elements for microresonators were fabricated by reactive sintering of a mixture of oxide powders. Yttrium oxide (Lanhit, Russia), aluminum oxide (Sumitomo Chem. Japan) and neodymium oxide (Lanhit, Russia), calcium, magnesium, and chromium (III) nitrates were used as initial high-purity materials. The total concentration of divalent impurities was chosen to be equal to the concentration of  $\text{Cr}^{3+}$  ions and was 0.1 atomic percent. The CaO to MgO ratio was maintained at 1 to 4 for all samples.

Разработка миниатюрных оптических схем лазеров является актуальным направлением в этой области. Одним из важных направлений миниатюризации лазеров является разработка малогабаритных резонаторов (микрорезонаторов). С развитием керамической технологии появилась возможность создавать оптические среды разных форм и размеров, а также с различной комбинацией слоев по составу, объединяя в себе активную среду, элемент пассивного затвора и резонатор. [1][2] Однако, необходимо убедиться, что такие керамические оптические элементы соответствуют генерационным характеристикам кристаллических оптических элементов. Целью эксперимента было исследование характеристик чип-элементов на основе отечественной композитной керамики  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой. В работе были решены следующие задачи: сборка экспериментального стенда, оптимизация оптической схемы микро-чип лазера, измерение генерационных характеристик лазеров  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  на основе композитной керамики, обработка и анализ полученных результатов измерений. Полученные композитные компакты прокаливались при  $900^\circ\text{C}$  в течение 5 часов для удаления остаточных органических веществ и спекались при  $1830^\circ\text{C}$  в течение 35 часов в вакуумной печи с вольфрамовым нагревателем при  $10^{-4}$  Па для получения полностью плотной керамики. После чего спеченные образцы отжигали при  $1400^\circ\text{C}$  в течение 30 часов на воздухе для удаления кислородных вакансий и превращения  $\text{Cr}^{3+}$  в  $\text{Cr}^{4+}$ . Затем излучение пошло на систему регистрации через дихроичное зеркало, излучающее в 50 процентном отношении, которое параллельно разводит для конкретной длины волны на две регистрирующие системы. Для исследования генерационных характеристик микрочип лазеров использовались два различных источника накачки. В первом случае был использован одиночный диод FocusLight на длину волны 808 нм, мощностью до 10 Вт. Накачка осуществлялась в квазинепрерывном режиме QCW со скважностью  $d=10$  ( $F=200$  Гц) с длительностью импульса накачки  $\tau_{\text{pulse}}=250$  мкс. Образцы, вырезанные из C2 демонстрируют одинаковые характеристики, это свидетельствует об однородности образцов, получаемых в таком технологическом процессе.

На рис. 1 приведены спектры пропускания элементов, при это для образца C2 спектр был прописан в центре и с краю образца, спектры совпали с высокой точностью, что говорит о хорошей однородности образца C2. Образец размером d209 (C2) был разрезан на 9 элементов, как показано на рис. 3. После обработки и полировки торцов элементов были получены следующие образцы: d37 – 4 штуки, d47 – 5 штук, d89 – 1 штука. Торцы всех образцов были плоскопараллельно отполированы с точностью  $\lambda/8$ , которые были отшлифованы и отполированы с каждой стороны с использованием алмазных суспензий. На торцы элементов были нанесены следующие покрытия: со стороны  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  глухое зеркало, со стороны  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  - зеркало с высокой рефлексивностью. Измерения генерации в микрочип лазерах производились с помощью оптического осциллографа, также были получены временные диаграммы генерации в импульсном режиме. По результатам эксперимента было выявлено, что характеристики чип-элементов, изготовленных на основе отечественной композитной керамики  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ , соответствуют аналогичным характеристикам кристаллических оптических элементов. Данные результаты могут быть использованы для создания компактных импульсных лазеров с диодной накачкой на основе керамических оптических элементов.

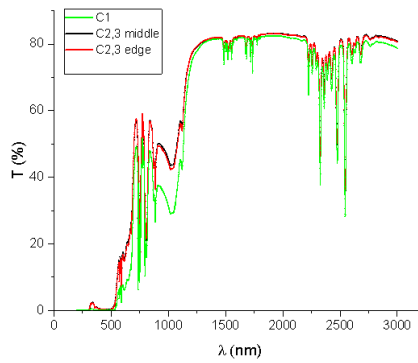


Рис. 1. Спектры пропускания образцов композитной керамики.

Исследованы генерационные характеристики двух образцов микро-чип лазеров на основе композитной керамики  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  и одного кристаллического образца, изготовленного методом диффузионной сварки. Показано, что генерационные характеристики керамических незначительно уступают кристаллическому. Вероятно, это обусловлено спецификой работы керамических затворов  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ .

Проведённое исследование свидетельствует о том, что относительная эффективность исследуемых керамических образцов микрочип лазеров сравнима с кристаллическими, и задача создания таких микрорезонаторов будет сведена к выбору оптимального дизайна.

#### Список литературы

1. Генерационные характеристики новых лазерных керамик отечественного производства / В. В. Безотосный, В. В. Балашов, В. Д. Булаев [и др.] // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 9. – С. 802-806. – ISSN 1468-4799.
2. Composite Ceramic  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  Laser Elements / V. V. Balashov, V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev [и др.] // Journal of Russian Laser Research. – 2019. – Т. 40, № 3. – С. 237-242. – ISSN 1573-8760.

Д.А. ДЕШИН, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Д. ВОРОНОВ, А.В. ОСИНЦЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ФАЗ ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе показан метод создания функционально-градиентных материалов на основе Fe-Cr-Ni путем создания локальных областей  $\gamma$ -фазы различной формы и объема в  $\alpha$ -фазе посредством лазерной термической обработки. Приведены результаты измерения прочностных и упругих свойств полученных материалов при проведении испытаний на разрыв совместно с измерением деформаций методом корреляции изображений. Показано влияние закона распределения фаз на механические характеристики ФГМ.

D.A. DESHIN, E.D. ISHKINYAEV, V.D. VORONOV, A.V. OSINTSEV, V.N. PETROVSKIY  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF FUNCTIONAL-GRADIENT MATERIALS WITH DIFFERENT PHASE CONTENT OBTAINED BY LASER PROCESSING

The paper shows a method for creating functionally graded materials based on Fe-Cr-Ni by creating local regions of the  $\gamma$ -phase of various shapes and volumes in the  $\alpha$ -phase by means of laser heat treatment. The results of measuring the strength and elastic properties of the obtained materials during tensile tests together with the measurement of deformations by the image correlation method are presented. The influence of the phase distribution law on the mechanical characteristics of FGM is shown.

В данной работе проводилось исследование напряженно-деформированного состояния функционально-градиентного материала на основе Fe-Cr-Ni, состоящего из чередующихся пара- ( $\gamma$ -фаза) и ферромагнитных ( $\alpha$ -фаза) областей. Образцы были получены в результате холодной пластической деформации с последующей лазерной термической обработкой локальных участков различной формы. Для преобразования фаз необходимо выполнение ряда условий обработки. В общем случае итоговая микроструктура металла после лазерного воздействия будет определяться степенью завершенности процесса аустенизации при нагреве и его распаде при охлаждении. На результат обработки влияет форма и распределение интенсивности в пятне лазерного источника, скорость обработки, начальные условия, наличие или отсутствие теплоотводящей среды и др.

Для данного сплава температура начала  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения лежит ниже  $0^\circ\text{C}$ . Это обеспечивает получение в сплаве после выплавки и горячей пластической деформации (ГПД) аустенитной структуры, соответствующей  $\gamma$ -фазе. После холодной пластической деформации (ХПД) с величиной обжатия не менее 70% обеспечивается образование не менее 97% мартенсита ( $\alpha$ -фазы). Обратный мартенситный переход в этом сплаве происходит в результате нагрева в интервале температур  $500\text{-}700^\circ\text{C}$ . Таким образом, для создания ФГМ необходимо было равномерно нагреть участок материала в данном диапазоне температур посредством локального лазерного воздействия.

Полученные образцы с различным объемом и формой областей  $\gamma$ -фазы в  $\alpha$ -фазе подвергались испытаниям на разрыв с совместным измерением деформаций методом корреляции изображений. Данный метод является одним из бесконтактных оптических способов измерения напряженно-деформированного состояния образца при проведении механических испытаний [1]. При совместном использовании электромеханических испытательных машин Instron, позволяющих получать информацию о сопротивлении материала деформированию, и системы Vic-3D, основанной на использовании метода цифровой корреляции изображений была построена карта деформаций при нагрузке и выполнено измерение упругих постоянных материала, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона [2].

Для каждого образца с различным паттерном фаз были построены диаграммы напряжения-деформации. По результатам исследования сделан вывод, что аустенитная структура, образованная после лазерной обработки, обладает значительно большей пластичностью (35%), чем исходная мартенситная, полученная после холодной прокатки (5%). При этом прочность образца со 100% содержанием  $\gamma$ -фазы в два раза ниже, чем исходного. Различные форма и объем участков  $\gamma$ -фазы позволяют получить промежуточные характеристики, позволяя контролировать уровень прочности и пластичности. Например, образец с аустенитной областью квадратной формы обладает большей прочностью, но меньшей пластичностью, по сравнению с формой параллелепипеда. Образец с круглыми областями аустенита обладает промежуточными свойствами.

### *Список литературы*

1. Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements / H. Schreier, J.-J. Orteu, M.A. Sutton. – Boston, MA: Springer US, 2009. – 322 p.
2. Degadnikova L.A. The mechanical testing of materials using the method of digital image correlation / L.A. Degadnikova, A. V. Osintsev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1129. – № 1.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Была построена компьютерная модель импульсного нагрева монокристаллического кремния с учетом гидродинамических эффектов, и проведена её экспериментальная проверка.

D.V. MARIN, A.S. SHCHEKIN, V.N. PETROVSKIY  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## COMPUTER MODELING OF THERMAL FIELDS IN SEMICONDUCTORS UNDER THE INFLUENCE OF NANOSECOND LASER PULSES, TAKING INTO ACCOUNT THE HYDRODYNAMIC EFFECTS

A computer model of pulse heating of monocrystalline silicon with consideration of hydrodynamic effects was built and experimentally verified

Моделирование процесса теплового нагрева от лазерного излучения отлично для различных длительностей импульса. Это связано с временем релаксации энергии, полученной от лазерного излучения, на кристаллической решетке, приводящей к росту температуры решетки. Различают два принципиально различных режима обработки.

Режим «коротких» импульсов (пико- и фемтосекунды) не рассматривается в данной работе, поскольку обработка наносекундными импульсами обладает рядом преимуществ в сравнении с обработкой ультракороткими импульсами: высокая производительность [1] и дешевизна.

В режиме «длинных» импульсов, когда длительность импульса много больше времени релаксации, происходит выравнивание температур электронного газа и решетки, поэтому лазерное излучение можно считать источником тепла, а соответствующая задача о нагреве может быть рассмотрена с точки зрения законов теплопроводности.

Также наличие жидкой фазы у материала приводит к появлению эффекта Марангони, т.е. из-за градиента поверхностного натяжения происходит вымывание жидкости из зоны термического влияния (Рисунок 1)), что оказывает существенное влияние на процесс обработки. Это все приводит к необходимости решать мультифизическую задачу неизотермических потоков.

В настоящей работе была построена компьютерная модель импульсного нагрева монокристаллического кремния с учётом гидродинамических эффектов и проведена её экспериментальная верификация. На основании чего были сделаны выводы о том, как необходимо корректировать модель и какие упрощения допустимы, а какие критичны.



Рисунок 2 Профиль поверхности, полученной после обработки

### Список литературы

1. Wang X. et al. Numerical simulation and experimental study on picosecond laser ablation of stainless steel // Optics and Laser Technology. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 127, № August 2019. P. 106150.

**Секция  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор  
Кудряшов Николай Алексеевич

Секретарь секции

– ассистент  
Кан Кристина

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

С.З. АДЖИЕВ<sup>1</sup>, И.В. МЕЛИХОВ<sup>1</sup>, В.В. ВЕДЕНЯПИН<sup>2</sup>,  
Н.Н. ФИМИН<sup>2</sup>, А.В. ГОПИН<sup>1</sup>, Я.Г. БАТИЩЕВА

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

**ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ВЫСОКОДЕТАЛИЗИРОВАННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В  
ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ  
МИНИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТАХ**

Рассматриваются уравнения физико-химической кинетики, описывающие гетерогенные среды и системы, а также обобщения и дискретизации этих уравнений. Изучаются их консервативные и диссипативные свойства: законы сохранения, различные дискретизации, континуализации и H-теорема.

S.Z. ADZHIEV<sup>1</sup>, I.V. MELIKHOV<sup>1</sup>, V.V. VEDENYAPIN<sup>2</sup>  
N.N. FIMIN<sup>2</sup>, A.V. GOPIN<sup>1</sup>, YA.G. BATISHCHEVA

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL METHODS FOR A  
HIGHLY DETAILED KINETIC DESCRIPTION OF PROCESSES IN DISPERSE SYSTEMS  
FOR THE SAKE OF THEIR CONTROL IN TECHNOLOGIES WITH MINIMAL ENERGY  
COSTS**

The equations of physicochemical kinetics, which describe heterogeneous media and systems, as well as generalizations and discretizations of these equations, are considered. Their conservative and dissipative properties are studied: the conservation laws, various discretizations, continualizations, and the H-theorem.

Актуальным является создание физически обоснованных математических моделей различных процессов. Модель должна наследовать свойства исходного описания. Поэтому для уравнений типа физико-химической кинетики [1]–[10] необходимым условием этого является требование свойства точной консервативности (т.е. чтобы в модели присутствовали те и только те законы сохранения, которые есть в исходном описании) и выполнение H-теоремы (Больцмана) [1], [3], [10]. В настоящей же работе появляются дискретизации уравнений физико-химической кинетики с выполненной H-теоремой [4]–[8] не только с неявной, но и с явной дискретизацией по времени, которые проще считать на компьютере. Также исследуются кинетические уравнения эволюции частиц, распределённых по массе и по массе и форме [8]. А классическим результатом предлагается считать исследование пространства линейных законов Лиувилля [3], [10]–[13] для круговой модели Марка Каца [10]–[13]. Наши результаты оказались связанными и с малой теоремой Ферма [12], и с облучением замкнутых цепеобразных структур различного масштаба: например, бензолных колец (см. рисунки в [12]).

*Список литературы*

1. Boltzmann L. // Wien: Akad. Sitzungsber, 1872. Bd. 66. S. 275–370. Перевод: Больцман Л. Избранные труды. М.: Наука, 1984. Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа. С. 125–189.
2. Вольперт А.И. Худяев С.И. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики // М.: Наука, 1975.
3. Vedenyapin V.V., Adzhiev S.Z., Kazantseva V.V. // Journal of Mathematical Sciences. 2022. Vol. 260, № 4. P. 434–455.
4. Аджиев С.З., Веденяпин В.В., Филиппов С.С. Об H-теореме для систем химической кинетики с непрерывным и дискретным временем и о системе уравнений нуклеосинтеза // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018. Том 58, № 9. С. 1515–1528.
5. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. The H-theorem for the physico-chemical kinetic equations with explicit time discretization // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. Vol. 481. P. 60–69.
6. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. The H-theorem for the physico-chemical kinetic equations with discrete time and for their generalizations // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. Vol. 480. P. 39–50.
7. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. On the H-theorem for the Becker–Döring system of equations for the cases of continuum approximation and discrete time // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2020. Vol. 553, № 124608. P. 1–13.
8. Adzhiev S.Z., Batishcheva Ya.G., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. Kinetic equations for particle clusters differing in shape and the H-theorem // Physics, MDPI. 2019. Vol. 1, № 2. P. 229–253.
9. Аджиев С.З., Веденяпин В.В. Временные средние и экстремали Больцмана для марковских цепей, дискретного уравнения Лиувилля и круговой модели Марка Каца // ЖВМ и МФ, 2011, Том 51, № 11, с. 2063–2074.
10. Веденяпин В.В., Аджиев С.З. Энтропия по Больцману и Пуанкаре // УМН 2014. Том 69. № 6 (420). С. 45–80.
11. Кац М. Несколько вероятностных задач физики и математики. М.: Наука, 1967.
12. Козлов В.В. Тепловое равновесие по Гиббсу и Пуанкаре. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.
13. Аджиев С.З., Веденяпин В.В. Временные средние и экстремали Больцмана для марковских цепей, дискретного уравнения Лиувилля и круговой модели Марка Каца // ЖВМ и МФ, 2011, Том 51, № 11, с. 2063–2074.



А.В. АКСЕНОВ<sup>1</sup>, А.Д. ПОЛЯНИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем механики им.А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

## НЕСКОЛЬКО МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Описано несколько простых методов построения точных решений нелинейных уравнений математической физики. Приведены примеры применения рассмотренных методов.

A.V. AKSENOV<sup>1</sup>, A.D. POLYANIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

## SEVERAL METHODS OF CONSTRUCTING EXACT SOLUTIONS OF MATHEMATICAL PHYSICS EQUATIONS

Several simple methods for constructing exact solutions of nonlinear equations of mathematical physics are described. Examples of the application of the considered methods are given.

Точные решения уравнений математической физики играют огромную роль в формировании правильного понимания качественных особенностей многих явлений и процессов в различных областях естествознания. Точные решения нелинейных уравнений наглядно демонстрируют и позволяют лучше понять механизмы таких сложных нелинейных эффектов, как пространственная локализация процессов переноса, множественность или отсутствие стационарных состояний при определенных условиях, существование режимов с обострением и др.

Рассмотрено несколько простых методов построения точных решений нелинейных уравнений математической физики. В частности, показано, как исходя из простых решений с помощью преобразований сдвига и масштабирования можно найти более сложные точные решения. Продемонстрировано, что в некоторых случаях можно получать достаточно сложные решения путем добавления слагаемых к более простым решениям. Описан метод поиска точных решений уравнений с несколькими пространственными переменными исходя из решений родственных уравнений с одной пространственной переменной. Установлено, что точные решения одних уравнений с частными производными могут служить основой для построения решений других классов уравнений, имеющих аналогичные нелинейные члены. Большинство предложенных методов приводят к небольшому объему промежуточных вычислений, их эффективность иллюстрируется на конкретных примерах. Рассматриваются нелинейные уравнения теплопроводности, реакционно-диффузионные уравнения, нелинейные волновые уравнения, уравнения гидродинамики и газовой динамики. Показано, что некоторые решения уравнений с частными производными можно использовать для построения точных решений более сложных уравнений с запаздыванием.

Описанные методы и иллюстративные примеры целесообразно включить в курсы лекций и семинары по уравнениям математической физики, уравнениям с частными производными и прикладной математики в профильных университетах и технических вузах.

### *Список литературы*

1. Aksenov A.V., Polyanin A.D. Methods for constructing complex solutions of nonlinear PDEs using simpler solutions // Mathematics. 2021, v. 9, № 4, 345.
2. Aksenov A.V., Polyanin A.D. Review of methods for constructing exact solutions of equations of mathematical physics based on simpler solutions // Theoretical and Mathematical Physics. 2022, v. 211, № 2, pp. 567-594.
3. Полянин А.Д., Сорокин В.Г., Журов А.И. Дифференциальные уравнения с запаздыванием: Свойства, методы, решения и модели. М.: Издательство «ИПМех РАН». 2022. 464 с.

М.В. АРТЕМЬЕВА, М.О. КОРПУСОВ

Московский государственный университет, физический факультет, Москва, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## О РАЗРУШЕНИИ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕКОЭРЦИТИВНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Рассматривается одна задача Коши для нелинейного дифференциального уравнения второго порядка с некоэрцитивным источником. Доказана локальная разрешимость и получены достаточные условия разрушения решения этой задачи Коши за конечное время.

M.V. ARTEMEVA, M.O. KORPUSOV

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ON THE BLOW UP OF SOLUTION OF THE SECOND ORDER CAUCHY PROBLEM WITH A NON-COERCIVE SOURCE

The Cauchy problem for nonlinear second order differential equation with a non-coercive source is considered. Local solvability is proved and sufficient conditions for the blow up of solution in finite time are obtained.

Процесс электрического пробоя в нелинейных электромагнитных средах описывается абстрактными дифференциальными уравнениями с нелинейными операторными коэффициентами и некоэрцитивными источниками [1-2]. При этом существенный интерес представляют вопросы разрушения указанных задач за конечное время.

Рассмотрим следующую задачу Коши для нелинейного уравнения соболевского типа [3]:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \Delta u - u - \sum_{j=1}^n |u|^{p_j-2} u \right) - u + \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_1} |u|^{1+q_0} - \frac{\partial}{\partial t} |u|^q u = 0,$$
$$u(0) = u_1 \in H_0^1(\Omega), u'(0) = u_2 \in H_0^1(\Omega), u(x, t)|_{\partial\Omega} = 0,$$

где  $p_j > 2, q_0 > 0, q > 0$ .

В настоящей работе продолжены исследования, начатые в работах [2-3]. Доказано существование непродолжаемого во времени классического решения задачи Коши. При помощи модифицированного энергетического метода Х.А. Левина, изложенного в работе [1], доказано разрушение решения задачи, а также получена оценка сверху на время разрушения [2-3].

### Список литературы

1. Al'shin A.B., Korpusov M.O., Svishnikov A.G. Blow-up in nonlinear Sobolev type equations // De Gruyter Ser. Nonlinear Anal. Appl. 2011. vol. 15. pp. 648.
2. Корпусов М. О., Разрушение и глобальная разрешимость в классическом смысле задачи Коши для формально гиперболического уравнения с некоэрцитивным источником // Известия РАН. Серия математическая. 2022. Т. 84, №5. С. 119-150.
3. Артемьева М. В., Корпусов М. О. Разрушение решений и локальная разрешимость абстрактной задачи Коши второго порядка с некоэрцитивным источником // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2023. Т. 63, № 4. С. 43–53.

## ТОЧНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЕМОЙ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЁДИНГЕРА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТРЕТЬЕЙ, ПЯТОЙ, СЕДЬМОЙ И ДЕВЯТОЙ СТЕПЕНЕЙ

Для модели, описываемой обобщенным нелинейным уравнением Шрёдингера четвертого порядка с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степеней, получены точные решения. С использованием Фурье-метода расщепления по физическим факторам (split-step Fourier method) проведено численное моделирование полученных точных решений. Проведен численный эксперимент по моделированию взаимодействия двух солитонных решений модели.

A.A. BAYRAMUKOV, N.A. KUDRYASHOV  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EXACT AND NUMERICAL SOLUTIONS OF THE MODEL DESCRIBED BY THE FOURTH ORDER GENERALIZED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH CUBIC-QUINTIC-SEPTIC-NONIC FORM OF NONLINEARITY

Exact solutions are obtained for the model described by the fourth order generalized nonlinear Schrödinger equation with cubic-quintic-septic-nonic form of nonlinearity. Using split-step Fourier method, numerical simulation of the obtained exact solutions was carried out. Numerical experiment on the interaction of two solitons was carried out.

Для описания распространения импульсов в нелинейных оптических средах предложено несколько моделей, использующих обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ). Поскольку задача Коши для большинства моделей нелинейной оптики не решается, особую актуальность обретает численное моделирование распространения импульсов. Точные решения, которые допускают модели нелинейной оптики, при этом используются для анализа и оценки погрешности численных методов.

В докладе рассмотрена модель, описываемая обобщенным НУШ четвертого порядка с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степеней:

$$i\partial_t q + (ia_1\partial_x + a_2\partial_x^2 + ia_3\partial_x^3 + a_4\partial_x^4)q = (b_1|q|^2 + b_2|q|^4 + b_3|q|^6 + b_4|q|^8)q, \quad (1)$$

где  $\partial_t, \partial_x$  — операторы дифференцирования по  $t$  и  $x$  соответственно,  $q(x, t)$  — комплекснозначная функция,  $a_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) — коэффициент дисперсии  $j$ -го порядка,  $b_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) — коэффициент нелинейности  $(2j + 1)$ -й степени,  $i$  — мнимая единица. Уравнение (1) представляет собой обобщение уравнения, предложенного в работе [1], на случай не нулевых коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$ .

Для данной модели с использованием метода простейших уравнений [2] найдены точные решения вида

$$q(x, t) = A \sqrt{R_1 - \frac{R_1 - R_2}{1 - C \operatorname{sn}^2(\sqrt{c^2}(x - vt - x_0), m)}} \exp i(kx - \omega t - \theta), \quad (2)$$

которые в частном случае сводятся к решениям в виде светлых и темных солитонов. Здесь постоянные  $A, k, R_1, R_2, C, c^2, m, v, \omega$  выражаются через коэффициенты модели,  $\operatorname{sn}$  — эллиптическая функция Якоби. Получены условия существования решений данного вида.

Для численного решения модели применялся Фурье-метод расщепления по физическим факторам (split-step Fourier method) [3]. Результаты численного моделирования найденных аналитически точных решений демонстрируют соответствие аналитическим результатам. Проведенный численный эксперимент по взаимодействию двух точных решений в виде светлых солитонов показал, что при определенных параметрах модели (1) солитонные решения устойчивы и не изменяются при прохождении друг через друга. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности использования солитонов для передачи информации в оптических средах, описываемых обобщенным НУШ четвертого порядка с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степеней.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141.

### Список литературы

1. Nikolai A. Kudryashov et al. "Cubic-quartic optical solitons and conservation laws having cubic-quantic-septic-nonic self-phase modulation". In: *Optik* 269 (Nov. 2022), p. 169834.
2. Nikolai A. Kudryashov. "Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations". In: *Chaos, Solitons Fractals* 24.5 (June 2005), pp. 1217–1231.
3. J. Weideman and B. Herbst. "Split-step methods for the solution of the nonlinear Schrödinger equation". In: *SIAM Journal on Numerical Analysis* 23.3 (1986).

С.П. БАУТИН<sup>1</sup>, О.А. КАРЕЛИНА<sup>1,2</sup>, А.Г. ОБУХОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Снежинский физико-технический институт

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», Снежинск

<sup>3</sup>Тюменский индустриальный университет

## ПРЯМОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА, БЛИЗКИХ К ТУРБУЛЕНТНЫМ

Решения нелинейной системы уравнений с частными производными смешанного типа, являющейся системой уравнений движения сжимаемого вязкого теплопроводного газа при постоянных значениях плотности и температуры, представляется в виде тригонометрических рядов. Коэффициенты рядов являются искомыми функциями, зависящими от времени. Для них выписана бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений. На основании свойств решений этой системы уравнений доказаны сходимости ряда и теорема о кратных частотах. Приведены примеры конкретных течений, построенных с использованием конечных отрезков тригонометрических рядов.

S.P. BAUTIN<sup>1</sup>, O.A. KARELINA<sup>1,2</sup>, A.G. OBUKHOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Snezhinsky Institute of Physics and Technology

<sup>2</sup>All-Russian Research Institute of Technical Physics

<sup>3</sup>Tyumen Industrial University

## DIRECT MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX GAS FLOWS CLOSE TO TURBULENT

Solutions of a nonlinear system of partial differential equations of mixed type, which is a system of equations of motion of a compressible viscous heat-conducting gas at constant values of density and temperature, are presented in the form of trigonometric series. The coefficients of the series are the desired time-dependent functions. An infinite system of ordinary differential equations is written out for them. Based on the properties of solutions of this system of equations, the convergence of the series and the multiple frequency theorem are proved. Examples of specific flows constructed using finite segments of trigonometric series are given.

После двухсотлетнего перерыва после работ Ж.Б.Ж. Фурье методика применения бесконечных тригонометрических рядов была применена для построения решений нелинейной системы уравнений с частными производными смешанного типа [1]. Однако доказать сходимости построенных тригонометрических рядов тогда не удавалось. Недавно удалось доказать сходимости тригонометрических рядов, решающих одно нелинейное уравнение с частными производными – уравнение Бюргерса [2]. В данной работе предложенная методика представлений решений нелинейных уравнений в виде бесконечных тригонометрических рядов применена для описания решений системы из двух нелинейных уравнений с двумя независимыми пространственными переменными – уравнений движения сплошной среды. После подстановки используемых представлений в исходную систему уравнений движения и последующего проецирования двух получившихся уравнений на тригонометрический базис получается бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений для искомым коэффициентов рядов, зависящих от времени. Система записана в нормальной форме и в правые части каждого уравнения из этой бесконечной системы входит бесконечное число искомым функций. Благодаря конкретным свойствам решений полученных бесконечных систем обыкновенных дифференциальных уравнений доказана теорема о сходимости бесконечных тригонометрических рядов в некоторой окрестности точки  $t=0$  и при всех значениях независимых переменных  $x, y$ . Также доказана теорема о кратных частотах: в решении при  $t>0$  появляются гармоники с новыми частотами, не совпадающими с частотами гармоник в начальных условиях. Доказанная теорема о кратных частотах установила по сравнению с одномерным случаем более сложную зависимость между частотами гармоник, присутствующих в начальных условиях, и частотами гармоник, входящих в решение при  $t>0$ . Из теоремы следует, что в данном случае частоты разделены как по независимым переменным, так и по направлениям распространения гармоник. Новая теорема о кратных частотах не отменяет, а только еще раз подтверждает наличие так называемого «немного аккорда», имеющего места в музыкальных произведениях. С использованием конечных отрезков тригонометрических рядов построены примеры конкретных сложных течений газа, близких к турбулентным.

### Список литературы

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. – Новосибирск: Наука, 2014.
2. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Сходимость бесконечных тригонометрических рядов, решающих уравнение Бюргерса. – Снежинск: СФТИ, 2022.

Ф.А. БЕЛОЛУЦКИЙ<sup>1</sup>, А.Р. КАСИМОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ КОЛЕБАНИЙ СЛАБО НЕЛИНЕЙНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН МЕТОДАМИ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Рассматриваются различные подходы к численному решению реактивного уравнения Бюргерса с целью получения высокоточных результатов для предсказания сложных динамических характеристик детонации при ее распространении в неоднородных средах

F.A. BELOLUTSKIY<sup>1</sup>, A.R. KASIMOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology

## NUMERICAL SIMULATION OF REGULARIZATION OF WEAKLY NONLINEAR ONE-DIMENSIONAL DETONATION WAVES USING HIGH-ORDER METHODS

Different methods of numerical solution of the reactive Burgers equation are considered with a view to get high-precision results for forecasting complex characteristics of the dynamics of detonations during their propagation in non-uniform media.

Существенно нелинейный характер детонационных явлений наводит на мысль о возможности регуляризации колебаний детонационных волн подобно регуляризации отклика других нелинейных динамических систем синхронизацией мод, а конкретно через периодическое изменение свойств среды перед детонационной волной. Основной вычислительной задачей в изучении подобных процессов является получение высокоточных разрывных решений на основе эффективных вычислительных алгоритмов. Высокая точность и эффективность алгоритмов необходимы для расчета достаточно тонких динамических эффектов, таких как всевозможные бифуркации, очень чувствительные к численным ошибкам, а также необходимостью проводить большое количество расчетов для параметрического анализа. С точки зрения физики процесса и практических приложений возможность управления детонацией представляет большой интерес. Гашение и усиление, а также регуляризация даже вполне хаотических режимов детонации имеет многие приложения, например, в конструировании детонационных двигателей (например, двигателей с вращающейся детонацией [1] со впрыскиванием смеси на равноудалённых интервалах в кольцевом канале). Возможность регуляризации детонации подтверждается предыдущими исследованиями — изучением структуры решений уравнений Эйлера с помощью методов SSP-ERK(3, 3) и FD-WENO5-M [2]. Для детального изучения детонационной структуры в слабо нелинейном пределе вместо системы уравнений Эйлера можно воспользоваться гораздо более простым реактивным уравнением Бюргерса [3], которое вполне отражает всё богатство нелинейной динамики детонации. Однако и изучение структуры решений этого уравнения даже для одномерного случая требует как больших вычислительных мощностей и параллельных вычислений, так и новых высокоточных численных методов. В данной работе рассматривается численное решение данного одномерного уравнения, моделирующего самоподдерживающуюся одномерную пульсирующую детонационную волну (в слабо нелинейном пределе, как уже было сказано), возмущённую несложным шумом, с учётом синусоидального периодического изменения среды перед волной через условия на разрыве с помощью современных методов более высокого порядка, а именно: SSP-TS-ERK(12, 8) [4] с FD-WENO5-FM [5] и FD-WENO7-S(M), FD-WENO7-S(M), FD-WENO9-S(M), FD-WENO11-S(M) для расщеплённого глобального потока Лакса-Фридрихса (LF). Таким образом, в этой модельной постановке исследуется влияние неоднородностей среды на динамику решений. Здесь под SM понимаются новые тригонометрические веса WENO-S из [6], к которым нами применено отображение из [5].

### Список литературы

1. Anand V. and Gutmark E. Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities // Prog. Energy Combust. Sci. 2019. Vol. 73. P. 182–234.
2. Goldin A., Kasimov A. Synchronization of detonations: Arnold tongues and devil's staircases // J. Fluid Mech. 2022. Vol. 946. P. R1.
3. Kasimov A.R., Gonchar A.R. Reactive Burgers model for detonation propagation in a non-uniform medium // Proc. Combust. Inst. 2021. Vol. 38., № 3. P. 3725–3732.
4. Ketcheson D.I., Gottlieb S., Macdonald C.B. Strong Stability Preserving Two-step Runge–Kutta Methods // SIAM J. Numer. Anal. 2011. Vol. 49. P. 2618–2639.
5. Hong Z., Ye Z., Ye K. An improved WENO-Z scheme with symmetry-preserving mapping // Adv. Aerodyn. 2020. Vol. 2, № 1. P. 18.
6. Wu C., Wu L., Li H., Zhang S. Very high order WENO schemes using efficient smoothness indicators // J. Comp. Phys. 2021. Vol. 432. P. 110158.

К.В. БРУШЛИНСКИЙ<sup>1,2</sup>, В.В. КРЮЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Е.В. СТЕПИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛОВУШКЕ «ГАЛАТЕЯ-ПОЯС»

Доклад посвящен численному исследованию устойчивости равновесных магнитоплазменных конфигураций в перспективных ловушках для магнитного удержания плазмы в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза «Галатhea-Пояс» с двумя токнесущими проводниками, погруженными в плазменный объем. Представлены результаты расчётов развития двумерных и трёхмерных возмущений основных параметров плазмы и магнитного поля, полученные с помощью численного решения соответствующих нестационарных задач с линеаризованными на состоянии покоя уравнениями магнитной газодинамики (МГД) для малых возмущений.

K.V. BRUSHLINSKII<sup>1,2</sup>, V.V. KRYUCHENKOV<sup>1</sup>, E.V. STEPIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

## NUMERICAL INVESTIGATIONS OF EQUILIBRIUM MAGNETOPLASMA CONFIGURATION STABILITY IN GALATHEA-BELT TRAP

The lecture is devoted to numerical investigations of equilibrium magnetoplasma configuration stability in the perspective traps for plasma magnetic confinement Galathea-Belt with two electric current conductors immersed into the plasma volume developed for the controlled thermonuclear fusion problem solution. The calculation results of development two-dimensional and three-dimensional perturbations of the plasma and magnetic field main parameters are presented. These results are obtained using numerical study of the corresponding non-stationary mathematical problems with the magnetic hydrodynamics (MHD) equations for the small perturbations linearized at the equilibrium.

Тематика доклада лежит в области вычислительной физики плазмы и посвящена математическому моделированию и численным исследованиям процессов в плазменной технике, разрабатываемой в связи с перспективой решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. В докладе рассматривается предложенный А.И. Морозовым [1] перспективный класс ловушек-галатей для магнитного удержания плазмы с проводниками с током, погружёнными в плазменный объём, но с ним не соприкасающимися. Целью работы является численное исследование устойчивости равновесных конфигураций плазмы и магнитного поля в ловушке «Галатhea-Пояс» с двумя токнесущими проводниками, создающими удерживающее магнитное поле. Расчёты ведутся в терминах нестационарной математической модели с уравнениями магнитной газодинамики (МГД) для малых возмущений основных параметров конфигураций, позволяющей проследить динамику их развития. Равновесные конфигурации получены в решении стационарных задач с плоской разновидностью уравнения Грэда-Шафранова, следующего из уравнений плазмостатики, а их расчёты выполнены для распрямлённой в цилиндр квадратного сечения тороидальной ловушке «Галатhea-Пояс».

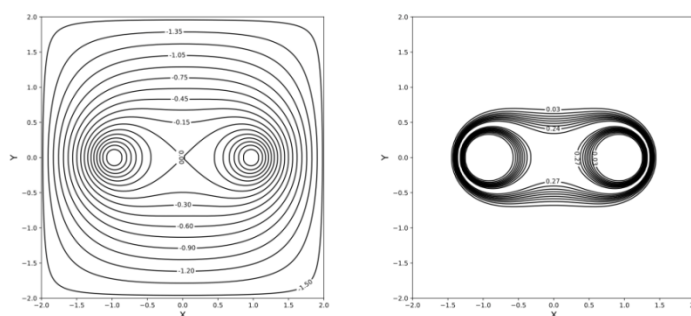


Рис. 1. Распределение магнитного поля (слева) и давления (справа) в цилиндрическом «Поясе».

Представлены результаты [2] численного исследования развития двумерных возмущений, зависящих только от пространственных координат в плоскости конфигурации, и трёхмерных возмущений, дополнительно учитывающих зависимость процесса от координаты, соответствующей оси цилиндра.

### Список литературы

1. Морозов А.И. О галатейх - плазменных ловушках с омываемыми плазмой проводниками // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 305 - 316.
2. Брушлинский К.В., Крюченков В.В., Степин Е.В. Математическая модель равновесных конфигураций плазмы в магнитных ловушках и исследование их устойчивости // Труды МИАН. 2023 (в печати)

В.В. ВЕДЕНЯПИН, Н.Н. ФИМИН, В.М. ЧЕЧЁТКИН  
ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## О ВЫВОДЕ ТЕНЗОРА ЭНЕРГИИ-ИМПУЛЬСА И УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ГРАВИТАЦИИ ИЗ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Рассмотрены вывод и свойства уравнений Власова-Эйнштейна.

V.V. VEDENYAPIN, N.N. FIMIN, CHECHETKIN V.M.  
Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## ON THE DERIVATION OF THE TENSOR OF ENERGY-PULSE AND THE EQUATIONS OF ELECTRODYNAMICS AND GRAVITY FROM THE PRINCIPLE OF LEAST ACTION AND DARK ENERGY.

We consider derivation and properties of Vlasov-Einstein equations.

В классических работах (см. [1–4]), уравнения для полей предлагаются без вывода правых частей. Здесь мы даем вывод правых частей уравнений Максвелла и Эйнштейна в рамках уравнений Власова–Максвелла–Эйнштейна из классического, но немного более общего принципа наименьшего действия [5–11]. Получающийся вывод уравнений типа Власова даёт уравнения Власова–Эйнштейна отличные от того, что предлагались ранее [12–15]. Предлагается способ перехода от кинетических уравнений к гидродинамическим следствиям [5–8], как это делалось раньше уже самим А.А. Власовым [4]. В случае гамильтоновой механики от гидродинамических следствий уравнения Лиувилля возможен переход к уравнению Гамильтона–Якоби, как это делалось уже в квантовой механике Е. Маделунгом [16], а в более общем виде В.В. Козловым [17–18]. Таким образом получаются в нерелятивистском случае решения Милна–Маккри, нерелятивистский аналог решений типа Фридмана нестационарной эволюции Вселенной. Это позволяет проанализировать Лямбду Эйнштейна и темную энергию.

### Список литературы

1. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: ЛКИ, 2007.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
3. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975, 696 стр.
4. Власов А.А. Статистические функции распределения. М.: Наука, 1966. 356 стр.
5. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и МГД. Тожество Лагранжа и форма Годунова // Теоретическая и математическая физика. ---2012. Т. 170. № 3. С. 468–480.
6. Веденяпин В.В., Негматов М.-Б. А., Фимин Н.Н. Уравнения типа Власова и Лиувилля, их микроскопические, энергетические и гидродинамические следствия. Изв. РАН. Сер.матем. 2017. Т. 81. № 3. С. 45–82.
7. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и магнитной гидродинамики. Тожество Лагранжа, форма Годунова и критическая масса. СМФН, 2013, том 47, С. 5–17.
8. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова. М.: Физматлит, 2001.
9. Веденяпин В.В. Уравнение Власова-Максвелла-Эйнштейна // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 188. 20 с.
10. Vedenyapin V.V., Fimin N.N., Chechetkin V.M. The system of Vlasov–Maxwell–Einstein-type equations and its nonrelativistic and weak relativistic limits // International Journal of Modern Physics D, 2020. V. 29. № 1.23 p.
11. Vedenyapin, V., Fimin, N., Chechetkin, V. The properties of Vlasov–Maxwell–Einstein equations and its applications to cosmological models // European Physical Journal Plus. 2020. № 400. 14 с.
12. Cercignani C., Kremer G.M. The relativistic Boltzmann Equation: theory and applications. Boston, Basel, Berlin: Birghause, 2002.
13. Choquet–Bruhat Y., Damour T. Introduction to general relativity, black holes and cosmology. New York: Oxford University Press. 2015.
14. Rein G., Rendall A.D. Global existence of solutions of the spherically symmetric Vlasov-Einstein system with small initial data, Commun. Math.Phys. 150, 561-583, (1992).
15. Kandrup H.E., Morrison P.J. Hamiltonian structure of the Vlasov–Einstein system and the problem of stability for spherical relativistic star clusters // Ann. Phys. 1993. V. 225. P. 114–166.
16. Madelung E. Quantentheorie in hydrodynamischer form (Quantum theory in hydrodynamic form), Z Phys, 40 (1926), 322–326.
17. Козлов В. В. Гидродинамика гамильтоновых систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1 Матем. Мех., 1983, № 6, 10–22;
18. Козлов В. В., Общая теория вихрей, Изд-во Удмуртского ун-та, Ижевск, 1998, 239с.



В.С. ДРЮМА

Государственный Университет Молдовы, Институт Математики и Информатики "В.А. Андрунакиевич", Кишинев, Молдова

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ КдВ

Методом параметрического представления функций и их частных производных получены примеры решений стандартного уравнения КдВ и его аналогов, описывающих распространение волн в цилиндрической и сферической геометриях.

V.S. DRYUMA

Moldova State University, Institute of Mathematics and Informatic "Vladimir Andrunachevichi", Kishinev, Moldova

## PARAMETRIC METHOD TO INTEGRATION OF THE KdV EQUATIONS

By parametric representation of the functions and their partial derivatives, the examples of solutions of standard KdV equation and its analogues, describing propagation of the waves in cylindrical and spherical geometries, are derived.

Изучение свойств распространения волн в сплошных средах под действием локализованных возмущений, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями в ч.пр. представляет значительный теоретический и прикладной интерес. В данном сообщении на примере стандартного уравнения Кортевега-де Фриза

$$1. \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial y} - 3 \left( \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^3 \varphi(x,y)}{\partial x^3} = 0,$$

его цилиндрической

$$2. \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial y} - 3 \left( \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^3 \varphi(x,y)}{\partial x^3} + \frac{\varphi(x,y)}{2y} = 0$$

и сферической

$$3. \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial y} - 3 \left( \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^3 \varphi(x,y)}{\partial x^3} + \frac{\varphi(x,y)}{2} = 0$$

версий параметрическим методом построены примеры их частных решений. Основу метода составляет преобразование изучаемого нелинейного уравнения в ч.пр.  $H(x, y, \varphi, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_{xx}, \varphi_{xy}, \varphi_{yy}, \varphi_{xxx}, \varphi_{xxy}, \varphi_{xyy}, \varphi_{yyy}, \dots) = 0$ , с помощью замены аргументов функции и ее производных согласно следующим правилам

$$\varphi(x, y) = u(x, \tau), y = v(x, \tau), \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial y} = \frac{\partial u(x,\tau)}{\partial \tau} / \frac{\partial v(x,\tau)}{\partial \tau}, \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} = \frac{\partial u(x,\tau)}{\partial x} - \frac{\partial v(x,\tau)}{\partial x} \frac{\partial u(x,\tau)}{\partial \tau} / \frac{\partial v(x,\tau)}{\partial \tau}, \dots$$

где  $\tau$  - параметр, а  $u(x, \tau), y = v(x, \tau)$  - новые вспомогательные функции. При этом исходное уравнение принимает вид неопределенного соотношения между функциями  $u(x, \tau), v(x, \tau)$ ,  $H(x, u, v, u_x, u_\tau, v_x, v_\tau, u_{xx}, u_{x\tau}, u_{\tau\tau}, v_{xx}, v_{x\tau}, v_{\tau\tau}, \dots) = 0$ , и с его помощью находятся решения исходного уравнения  $H=0$  в параметрическом или в явном виде после исключения параметра  $\tau$ .

Приведены примеры [1].

### Список литературы

1. Valery Dryuma //On integration of the KdF-equations in parametric form, МІТІ-2018,19-21 April, International Conference on Mathematica, Informatics and Information Technologies, dedicated to the illustrious scientist Valentin Belousov, Communications, P.1-2,

Т.Р. КАЛИМУЛЛИН<sup>1</sup>, Е.В. СТЕПИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСЗВУКОВЫХ СВЕРХАЛЬФВЕНОВСКИХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В ПРИСУТСТВИИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Рассмотрена и численно реализована модель трансзвуковых сверхальфвеновских МГД-течений в канале ускорителя в форме сопла из двух коаксиальных электродов в присутствии продольного магнитного поля в квазиодномерном приближении. Получены зависимости макроскопических параметров потока плазмы для различных физических и геометрических характеристик установок.

T.R. KALIMULLIN<sup>1</sup>, E.V. STEPIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences

## **NUMERICAL SIMULATION OF TRANSONIC SUPER-ALFVEN MHD-FLOWS IN THE PRESENCE OF A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD IN THE CHANNELS OF PLASMA ENGINES**

A model of transonic super-Alfven MHD-flows in an accelerator channel in the form of a nozzle with two coaxial electrodes in the presence of a longitudinal magnetic field in a quasi-one-dimensional approximation is considered and numerically implemented. The dependences of the macroscopic parameters of the plasma flow for various physical and geometric characteristics of the thrusters are obtained.

Более мощные разновидности плазменных двигателей, работающие на принципе ускорения плотной горячей плазмы в скрещенных электрических и магнитных полях, могут применяться для непосредственного передвижения в космическом пространстве. Примером таких устройств может служить квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ), предложенный А.И. Морозовым [1] и в настоящее время разрабатываемый в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

Объектом моделирования настоящей работы являются течения плазмы в канале ускорителя в форме сопла, образованного двумя коаксиальными электродами. Плазма рассматривается как сплошная электропроводящая среда, поведение которой описывается в терминах магнитной газодинамики (МГД) [2], при этом диссипативные эффекты (газовая и магнитная вязкости, теплопроводность) пренебрегаются.

Используется модель, рассмотренная в квазиодномерном приближении. Аппарат моделирования строится на основе численного решения начально-краевых задач с квазиодномерными нестационарными уравнениями МГД. В качестве метода расчета был выбран FCT с использованием коррекции потоков по Борису-Буку [3, 4] в три этапа: транспортно-диффузионный, анти-диффузионный и коррекционный.

В ходе исследования в терминах вычислительного эксперимента были получены зависимости макроскопических параметров ускоряемого плазменного потока для различных значений физических и геометрических характеристик задачи, включая продольное магнитное поле и параметр  $\beta$ , характеризующий отношение характерных газового и магнитного давлений задачи. Представлена их визуализация и дана прикладная интерпретация.

### *Список литературы*

1. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. // М.: Атомиздат, 1978.
2. Брушлинский К.В. Математические основы вычислительной механики жидкости, газа и плазмы. // Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2017.
3. Boris J.P., Book D.L. Flux-Corrected Transport I: SHASTA – a Fluid Transport Algorithm that works. // J. Comp. Phys., 1973.
4. Boris J.P., Book D.L. Flux-Corrected Transport II: Generalization of the Method. // J. Comp. Phys., 1975.

В.Л. КАМЫНИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ В МНОГОМЕРНОМ ВЫРОЖДАЮЩЕМСЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ

Доказаны теоремы существования и единственности решения обратной задачи определения зависящего от  $t$  неизвестного младшего коэффициента в вырождающемся параболическом уравнении со многими независимыми переменными. В качестве дополнительного условия задается условие интегрального наблюдения. Рассмотрены несколько вариантов функциональных пространств, где ищется неизвестный коэффициент. Приведен пример обратной задачи, для которой выполняются условия доказанных в работе теорем.

V.L. KAMYNIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INVERSE PROBLEM OF DETERMINING THE ABSORPTION COEFFICIENT IN A MULTIDIMENSIONAL DEGENERATE PARABOLIC EQUATION

We prove existence and uniqueness theorems for inverse problems of determining the time-dependent unknown lower coefficient in a degenerate parabolic equation with many independent variables. The additional condition is given in the form of integral observation. Several variants of function spaces are considered, where the unknown coefficient is sought. An example of an inverse problem is given for which the conditions of the theorems proved in the paper are satisfied.

Изучается существование и единственность обобщенного решения  $\{u(t, x), \gamma(t)\}$  обратной задачи для параболического уравнения

$$u_t - a(t, x)\Delta u + (\bar{b}(x), u_x) + c(t, x)u + \gamma(t)u = f(t, x), \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(0, x) = u_0(x), x \in \Omega, (t, x) \in [0, T] \times \partial\Omega, \quad (2)$$

и дополнительным условием интегрального наблюдения

$$\int_{\Omega} u(t, x)\omega(x)dt = \varphi(t). \quad (3)$$

Здесь  $(t, x) \in Q = [0, T] \times \Omega$ ,  $\Omega$  - ограниченная область в  $n$ -мерном пространстве с гладкой границей  $\partial\Omega$ .

Особенностью постановки обратных задач является предположение о том, что уравнение (1) не является равномерно параболическим, а именно, для него выполнено условие

$$0 \leq a(t, x) \leq a_1, \frac{1}{a(t, x)} \in L_q(Q), q > 1.$$

Установлены достаточные условия, при которых решения обратной задачи (1)-(3) существуют и единственны. Приведены примеры, показывающие, что такие условия выполняются, если  $T$  достаточно велико (при фиксированном объеме области  $\Omega$ ), либо если объем области  $\Omega$  достаточно мал (при фиксированном  $T$ ).

Отметим, что ранее аналогичные результаты для обратной задачи восстановления младшего коэффициента уравнения (1) при дополнительном условии (3) были установлены для случая одной пространственной переменной в [1,2].

### Список литературы

1. Kamynin V.L. // Jour. Math. Sciences. 2020. Vol. 250, N 2, P. 322-336.
2. Камынин В.Л. // ЖВМ и МФ. 2021. Т. 61, № 3, P. 413-427.

К.В. КАН, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ, ОПИСЫВАЕМОЙ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЕДИНГЕРА С ВОЗМУЩЕНИЕМ В НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрено обобщенное нелинейное уравнение Шредингера с произвольной степенью нелинейности. Проведено численное моделирование краевой задачи для изучаемого уравнения с учетом периодических граничных условий и с учетом введения возмущения в начальные условия.

K.V. KAN, N.A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM, DESCRIBED BY GENERALIZED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH PERTURBED INITIAL CONDITIONS

In this work a generalized nonlinear Schrödinger equation with arbitrary degree of nonlinearity is considered. Numerical modelling of the problem of studying equation is provided taking into account periodic boundary conditions and perturbed initial conditions.

Математическая модель, рассматриваемая в работе, имеет вид:

$$iu_t + \alpha u_{xx} + (a|u|^n + b|u|^{2n})u = 0, \quad x \in \left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right], \quad t > 0, \quad (1)$$

с учетом

$$u(x, 0) = \left[ \frac{4E \cdot \exp\{(x - 2akt - z_0)n\sqrt{E}\}}{2AE \cdot \exp\{(x - 2akt - z_0)n\sqrt{E}\} + (A^2 + 4BE) \cdot \exp\{2(x - 2akt - z_0)n\sqrt{E}\} + 1} \right]^{1/n} + u_1(x, t),$$

$$u\left(x - \frac{L}{2}, t\right) = u\left(x + \frac{L}{2}, t\right), \quad u_x\left(x - \frac{L}{2}, t\right) = u_x\left(x + \frac{L}{2}, t\right),$$

где  $L$  – размер расчетной области;  $u_1(x, t)$  – возмущение, имеющее аналогичную с первым слагаемым в начальном условии форму при других значениях параметров;  $x, t$  – независимые пространственная и временная переменные соответственно.

Численное решение построено при различных степенях нелинейности  $n$  с помощью псевдоспектрального метода, описанного в [1]. В качестве начальных условий взята сумма двух уединенных волн, удаленных друг от друга в начальный момент времени, одна из которых является точным решением уравнения (1).

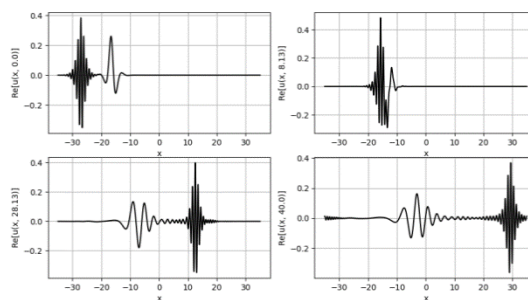


Рис. 1. Графики численного решения задачи (1)-(2) с учетом возмущения в начальных условиях при  $n = 2$ ,  $h = 0.05$ ,

$$\alpha_1 = 0.11, \alpha_2 = 0.01, \tau = 1.25 \cdot 10^{-3}$$

Из графиков видно, что после взаимодействия с волной, определяющей возмущение начальных условий, уединенная волна, соответствующая точному решению уравнения (1), остается без изменений, что согласуется с теоретическими сведениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141.

### Список литературы

1. Weideman, J. A. C., and B. M. Herbst. Split-step methods for the solution of the nonlinear Schrödinger equation. SIAM Journal on Numerical Analysis 23.3: 485-507, 1986.

О.В. КАПЦОВ

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия*

## СТАЦИОНАРНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ И ПЛАЗМЫ

Рассматривается система уравнений Эйлера, описывающая двумерные стационарные течения идеальной жидкости и плазмы. Эта система сводится к нелинейному уравнению для функции тока. Найденные решения описывают источники в завихренной жидкости, струйные течения, цепочки источников и стоков, вихревые структуры. Предложен простой метод построения решений в виде рациональных выражений от эллиптических функций. Показано, что расход жидкости по замкнутой кривой квантуется в случае эллиптического уравнения Син-Гордона.

O.V. KAPTSOV

*Institute of Computational Modelling, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

## STATIONARY SOLUTIONS OF IDEAL FLUIDS AND PLASMA EQUATIONS

The Euler equations describing two-dimensional steady flows of an in viscid fluid are studied. These equations are reduced to a nonlinear equation for the stream function. The solutions found are interpreted as sources in a rotating fluid, jets, chains of sources and sinks, vortex structures. We propose a new simple method for constructing solutions in the form of rational expressions of elliptic functions. It is shown that the flux of fluid across a closed curve is quantized in the case of the elliptic Sin-Gordon equation.

Рассматриваются двумерные стационарные уравнения идеальной жидкости и плазмы

$$uu_x + vu_y + p_x = 0, \quad uv_x + vv_y + p_y = 0, \quad u_x + v_y = 0,$$

где  $u, v$  - компоненты вектора скорости,  $p$  - давление. Плотность жидкости считается постоянной и равной единице. Хорошо известно, что эта система сводится к одному уравнению

$$\psi_{xx} + \psi_{yy} = F(\psi)$$

на функцию тока  $\psi$ . Последнее уравнение также возникает в различных приложениях таких как физика плазмы, теория твердого тела. Получены точные решения эллиптических уравнений Син-Гордон, Синх-Гордон, Цицейки, выражающиеся через элементарные функции. Показано, что расход жидкости по замкнутой кривой в случае эллиптического уравнения Син-Гордона является целым числом, т.е. квантуется.

Найденные решения определяют течения, состоящие из отдельных источников и стоков, струйные течения, периодические цепочки из источников-стоков, вихри и их комбинации. Предложен новый способ построения периодических решений уравнений Син-Гордона, Синх-Гордона и Цицейки. Данные классы решений представляются в виде рациональных выражений от эллиптических функций.

*Список литературы.*

1. Kaptsov O.V. Solutions of the Euler equations and stationary structures in an inviscid fluid// [arXiv:2202.06294](https://arxiv.org/abs/2202.06294), p.1-13.

## КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ АНОМАЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПЛАЗМЫ КАТОДНОГО ФАКЕЛА

Спозиций фундаментальной кинетической теории бесстолкновительной плазмы показано, что расширение плазмы катодного факела в вакуумных диода имеет электродинамическую природу. Результаты получены путём численного решения набора уравнений Власова для компонентов катодной плазмы совместно с уравнением Пуассона для планарной и осесимметричной конфигураций вакуумных диодов.

V.YU. KOZHEVNIKOV, N.S. SEMENIUK, A.O. KOKOVIN, A.V. KOZYREV

*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia*

## KINETIC THEORY OF THE CATHODE PLASMA TORCH ANOMALOUS EXPANSION

From the standpoint of the fundamental kinetic theory of a collisionless plasma, it was shown that the expansion of the cathode plasma torch in vacuum diodes is of a purely electrodynamic nature. The results are obtained by means of a numerical solution of a Vlasov equations set for cathode plasma components along with the Poisson's equation in planar and axisymmetric configurations of vacuum diodes.

Явление вакуумного пробоя широко исследуется на протяжении последних десятилетий [1]. Возбуждение вакуумного пробоя плазмой происходит за счёт взрывов микроскопических неровностей катода, после чего плазма катодного факела расширяется в межэлектродный промежуток. Обширная экспериментальная база указывает на то, что движение плазмы происходит со скоростями, значительно превышающими тепловые значения взрывоэмиссионной плазмы. Основное внимание вызывает вопрос о том, что заставляет ионы двигаться в сторону увеличения электрического потенциала (от катода к аноду). Такое явление получило название «аномального ускорения ионов» [1]. Также отмечалось, что типичные средние скорости движения ионов соответствуют кинетическим энергиям в десятки и даже сотни электронвольт, в то время как характерные тепловые энергии не превышают единиц электронвольт. Кинетические энергии ионов (свыше 100 эВ) многократно превосходят напряжение горения дугового разряда (до 70 В), поэтому в некоторых литературных источниках такие ионы принято называть «ионами с аномально высокими энергиями» [1, 2].

В данной работе представлено теоретическое объяснение причин возникновения в вакуумных диодах явления аномального ускорения ионов. Объяснение даётся на основании уравнений бесстолкновительной физической кинетики. Предложенная теоретическая трактовка убедительно доказывает, что основным механизмом аномального ускорения ионов катодной плазмы является бесстолкновительное движение ионов в самосогласованном электрическом поле. Возникающую нетривиальную конфигурацию поля (область нестационарного виртуального катода) на начальном этапе развития процесса создаёт опережающее движение электронов, сходная с аналогичной в диодах с преимущественной электронной эмиссией. Моделирование также указывает на различия движения одно- и многозарядных ионов по мере расширения катодной плазмы и их результирующие вклады в начальный этап развития вакуумного пробоя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00239)

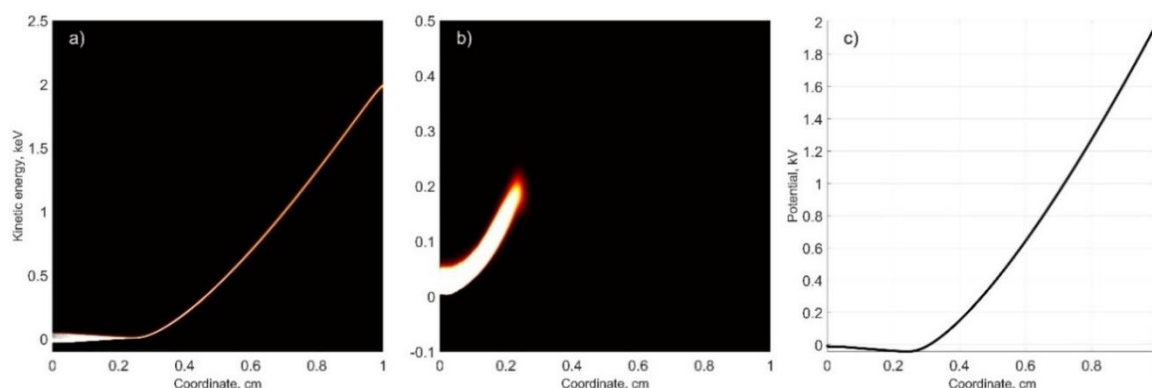


Рис. 1. Характерные фазовые портреты функций распределения компонентов плазмы катодного факела (электроны (а), ионы (б)) и электрического потенциала (с) в планарном вакуумном диоде

### Список литературы

1. Месяц, Г.А. Взрывная электронная эмиссия. // М.: Физматлит. – 2011. – С. 280
2. Плютто, А.А. Ускорение положительных ионов в расширяющейся плазме вакуумных искр. // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 39. – вып. 6. – С. 1589-1592.

V.V. БОЧКАРЕВ<sup>1,2</sup>, Б.Д. БРИЛЛИАНТОВ<sup>1,2</sup>, С.Г. КЛИМАНОВ<sup>1</sup>, А.В. КРЯНЕВ<sup>1</sup>,  
Д.С. СМIRНОВ<sup>1</sup>, С.А. СМIRНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности, Москва, Россия

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены постановки и решения задач выбора оптимальных вариантов вывода из эксплуатации (ВЭ) ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО), включая выбор технологических операций, применяемых при ВЭ. Учитываются экономические факторы (стоимость и длительность ВЭ), а также показатели радиационного облучения персонала, реализующего ВЭ, и окружающей среды. Предполагается неопределенность исходных данных, что порождает необходимость постановки и решения оптимизационных задач в условиях неопределенности.

V.V. BOCHKAREV<sup>1,2</sup>, B.D. BRILLIANTOV<sup>1,2</sup>, S.G. KLIMANOV<sup>1</sup>, A.V.  
KRYANEV<sup>1</sup>,  
D.S. SMIRNOV<sup>1</sup>, S.A. SMIRNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Scientific and Engineering Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

## MATHEMATICAL MODELING OF OPTIMIZATION PROBLEMS DURING THE DECOMMISSIONING OF NUCLEAR AND RADIATION HAZARDOUS OBJECTS

Statements and solutions of the problems of choosing the optimal options for decommissioning (DE) of nuclear and radiation hazardous facilities (NRHF), including the choice of technological operations used in the decommissioning, are considered. Economic factors are taken into account (the cost and duration of the DE), as well as indicators of radiation exposure of the personnel implementing the DE and the environment. Uncertainty of the initial data is assumed, which gives rise to the need to set and solve optimization problems under conditions of uncertainty proposed.

Спецификой исходных данных, на основе которых реализуется процесс ВЭ, является их неопределенность, порождаемая неопределенностью исходных данных в расчетных моделях, на основе которых рассчитываются числовые значения показателей ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ) состояния ЯРОО, и экспертными оценками тех показателей, значения которых не могут быть рассчитаны, а оцениваются экспертами [1-5]. В работе представлены математические модели, вычислительные схемы и основанные на них алгоритмы оценки вариантов ВЭ ЯРОО с учетом неопределенности в значениях входных данных, использующий как аппарат теории вероятностей, когда входные данные получены расчетным путем, так и аппарат нечетких множеств, когда входные данные получены путем экспертных оценок. Уровень надежности может задаваться качественно (высоко надежная, надежная, умеренно надежная, слабо надежная, опасная). Для реализации программы сравнения вариантов ВЭ ОИАЭ предполагается, что предварительно для рассчитываемых вариантов сравнения выбраны допустимые наборы технологических операций дезактивации, демонтажа, упаковки, транспортировки, захоронения, конкретные для каждого варианта ВЭ. В математических моделях используются следующие показатели, характеризующие сравниваемые варианты ВЭ: 1) Показатель обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды; 2) Финансово-экономический показатель (стоимость ВЭ); 3) Длительность ВЭ; 4) Обеспеченность технологическим оборудованием и персоналом для ВЭ. Для построения математических моделей оптимизации используются многофакторный и метрический анализы.

### Список литературы

1. А.А. Абрамовидр. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации. Под общей редакцией академика РАН Л.А. Большова, Н.П. Лаверова, чл.-кор. РАН И.И. Линге. М.: 2015, 316 с.
2. Michele Laraia. Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning. Woodhead Publishing, 2017.
3. РБ-153-18 «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии». Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 декабря 2018 г. № 666, 22 с.
4. Kryanev A.V. et al. Analysis of the Stability of Choosing the Decommissioning Option for Objects of Atomic Energy Use // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 70-74.
5. Batsulin A.A. et al. The structure of the support system for making optimal decisions during the decommissioning of nuclear facilities. International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology, v, 5, no.1, 2021.



С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, Д.С. СМIRНОВ, С.А. СМIRНОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ ПАЦИЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ**

Рассмотрены постановки задач выбора в динамическом режиме оптимальных значений параметров вентиляционного потока аппарата искусственной вентиляции легких пациента, в зависимости от текущего состояния пациента. В постановке рассматриваемых задач учитывается неопределенность исходных данных, характеризующих текущее состояние пациента. В качестве математического аппарата, реализуемого при постановке рассматриваемых оптимизационных задач, используются методы многофакторного анализа, метрический анализ, методы нечеткой логики и нечетких множеств.

S.G. KLIMANOV, A.V. KRYANEV, D.S. SMIRNOV, S.A. SMIRNOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **MATHEMATICAL FORMULATION OF PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL LUNG VENTILATION OF A PATIENT DEPENDING ON ITS CURRENT STATE**

The formulations of the problems of choosing in a dynamic mode the optimal values of the parameters of the ventilation flow of the patient's artificial lung ventilation apparatus, depending on the current state of the patient, are considered. In setting problems under consideration, the uncertainty of the initial data characterizing the current state of the patient is taken into account. The methods of multivariate analysis, metric analysis, methods of fuzzy logic and fuzzy sets are used as the mathematical apparatus used in setting the optimization problems under consideration.

Важной задачей длительной искусственной вентиляции легких (ИВЛ) является постоянное поддержание оптимальных режимов вентиляции, несмотря на прогрессирование патологического процесса в легких, либо при присоединении других заболеваний. Еще одной проблемой длительной аппаратной ИВЛ является необходимость постоянного подбора и изменения различных вариантов режимов вентиляции легких, значений параметров и качественного состава газовой смеси при проведении ИВЛ. Математические модели оптимизации ИВЛ должны в динамике выбирать оптимальные режимы и параметры вентиляции легких пациента с соблюдением всех медицинских нормативов и ограничений, обеспечивающих безопасность пациента в течение всего лечебного процесса. Математические модели оптимизации ИВЛ строятся на методах и основанных на них вычислительных схемах и алгоритмах нечеткой логики и нечетких множеств, многофакторного и метрического анализов с учетом неопределенности исходных данных состояния пациента [1-3]. Системы на основе нечеткой логики позволяют начать строить модели, используя экспертные знания медицинских специалистов и небольшой набор данных и, параллельно, собирать и накапливать необходимые данные, которые позволят уточнить и дополнить первоначально построенные системы. Нейронные сети могут быть использованы для оптимизации режимов вентиляции легких двух типов: основанных на данных и основанных на моделях. Нейронные сети можно использовать в качестве инструментов анализа данных и для прогнозирования на основе исторических данных состояния пациента. Математическое представление нейрона такой нейронной сети, изображенного выше, описывается с помощью функциональной зависимости  $Y = F\left(\sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i\right) + W_0$ , где  $X_1, X_2, \dots, X_n$  представляют входной вектор показателей текущего состояния пациента,  $W_1, W_2, \dots, W_n$  представляют веса взаимосвязей, смещение  $W_0$  выполняет аффинное преобразование линейно комбинированных входных сигналов, а функция активации  $F$  применяется для получения конечного вывода  $Y$  от нейрона. Методы метрического анализа позволяют восстанавливать многомерную функциональную зависимость с максимально возможной точностью на основе даже небольшого набора статистических данных, в том числе с учетом дополнительных данных, полученных в процессе лечения конкретного пациента, что позволяет реализовать работу алгоритма выбора оптимальных значений параметров вентиляционного потока для конкретного пациента в адаптационном режиме.

### *Список литературы*

1. Yusuf AlperKilic and IlkeKilic. 2010. A Novel Fuzzy Logic Inference System for Decision Support in Weaning from Mechanical Ventilation. J. Med. Syst. 34, 6, 2010, pp. 1089–1095.
2. Bialais E. et al. Closed-loop ventilation mode (IntelliVent®-ASV) in intensive care unit: a randomized trial. Minerva Anesthesiol, 2016, 82(6), pp. 657-668.
3. Kryanev A.V. et al. Reconstruction of Multivariable Functions Under Uncertainty by Means of the Scheme of Metric Analysis // SpringerProceedings in Mathematics and Statistics, 2021 Vol. 371, pp. 269-279.

А.Е. КУВШИННИКОВ

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия

## МОДИФИКАЦИЯ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ЧАСТИЦ И ЗАДАЧА О КОСОМ СКАЧКЕ УПЛОТНЕНИЯ

Разрывной метод частиц использован для численного решения задачи обтекания клина сверхзвуковым потоком невязкого газа, в результате чего образуется косой скачок уплотнения. Для этого введён инвариант, который можно интерпретировать как след сохранения массы в пространстве между двумя наиболее интенсивно взаимодействующими частицами, сводя этап корректора к локально одномерному распространению возмущения. Произведено сравнение численных решений методом частиц и численных решений, полученных с помощью открытого программного комплекса OpenFOAM, с аналитическим решением в норме  $L_2$ . Представленная визуализация результатов даёт ясную картину особенностей метода частиц для двумерных задач газовой динамики. Модификация позволила в двумерном случае достичь высокой точности решения, а именно, размывания разрыва на одну ячейку

А.Е. KUVSHINNIKOV

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

## MODIFICATION OF THE DISCONTINUOUS PARTICLE METHOD AND THE OBLIQUE SHOCK PROBLEM

The discontinuous particle method is used to numerically solve the problem of streamlining a wedge by a supersonic flow of non-viscous gas, resulting in an oblique compaction jump. For this purpose an invariant is introduced, which can be interpreted as a trace of mass conservation in the space between two most intensively interacting particles, reducing the corrector stage to a locally one-dimensional perturbation propagation. Numerical solutions of the particle method and numerical solutions obtained using the open source OpenFOAM software package are compared with the analytical solution in the  $L_2$  norm. The presented visualization of the results gives a clear picture of the peculiarities of the particle method for two-dimensional problems of gas dynamics. The modification made it possible to achieve high accuracy of the solution in the two-dimensional case, namely, the smearing of the discontinuity on one cell.

Методы частиц активно используются для моделирования задач газовой динамики [1]. Модель непрерывной среды заменяется дискретной моделью — совокупностью частиц. Каждая частица имеет набор атрибутов, таких как масса, скорость, положение в пространстве.

В разрывном методе частиц [2] выбираются пары взаимодействующих частиц. Масса, находящаяся между координатами частиц, равна полусумме масс частиц, и, в отсутствие диффузии, она также должна оставаться постоянной. Расстояния между частиц изменяются после сдвига, что приводит к изменению площадей трапеции. Поэтому на этапе корректора нужно изменять высоты частиц так, чтобы масса между частицами оставалась постоянной (рис. 1). Следующим этапом алгоритма является учет сил давления. Разница давлений слева и справа от частицы приводит к изменению импульса и энергии частицы, то есть, к увеличению объёма соответствующих частиц.

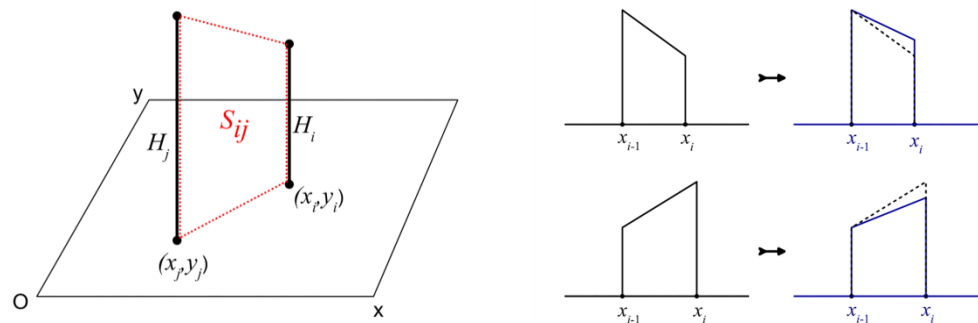


Рис. 1. Коррекция высоты частицы с сохранением массы

Будем сравнивать разрывной метод частиц с солверами открытого программного пакета OpenFOAM [3]: rhoCentralFoam, pisoCentralFoam, QGDFoam. Для этого всеми методами будем решать двумерную невязкую задачу моделирования косого скачка уплотнения. Все расчеты проведены при задании следующих параметров: угол наклона потока  $\beta$  равен  $6^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ , число Маха  $M_\infty$  изменяется от 2 до 3 с шагом 0.5. Для оценки отклонения полученных численных результатов от известного точного решения во всей расчетной области используем аналог нормы  $L_2$ . В половине случаев метод частиц оказывался точнее других разностных методов.

### Список литературы

1. Богомолов С.В. Метод частиц. Несжимаемая жидкость // Матем. моделирование. 2003. Т.15, №1, С. 46–58.
2. Bogomolov S.V., Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Comparative verification of numerical methods involving the discontinuous shapeless particle method // Scientific Visualization. 2022. v. 13, № 4, pp. 97–109.
3. The OpenFOAM Foundation [Электронный ресурс] — URL: <http://www.openfoam.org> (дата обращения 01.03.2023).

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА, ВЫРАЖЕННОЕ ЧЕРЕЗ ФУНКЦИЮ ЛАМБЕРТА

Рассмотрена редукция обобщённого нелинейного уравнения Шрёдингера с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степени в переменных бегущей волны. Получено решение, выраженное через функцию Ламберта.

A.A. KUTUKOV, N.A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ANALYTICAL SOLUTION OF THE GENERALIZED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION EXPRESSED VIA LAMBERT FUNCTION

The traveling wave reduction of the generalized nonlinear Schrödinger equation with nonlinearities of the third, fifth, seventh and ninth degree is considered. The solution expressed in terms of the Lambert function is obtained.

Для моделирования распространения импульсов в нелинейных оптических средах используют обобщённые нелинейные уравнения Шрёдингера [1-3]. Задача Коши для них не решается методом обратной задачи рассеяния. Аналитические решения для неинтегрируемых обобщённых нелинейных уравнений Шрёдингера можно искать специальными методами с использованием переменных бегущей волны [3].

Рассматривается обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степени для описания импульсов в оптическом волокне [3]

$$iq_t + q_{xx} + a(|q|^2)q + b(|q|^4)q + c(|q|^6)q + d(|q|^8)q = 0. \quad (1)$$

После перехода к переменным бегущей волны

$$q(x, t) = y(z)e^{i(kz - \omega t)}, \quad z = x - C_0 t, \quad (2)$$

в уравнении (1) и преобразования  $y(z) = \sqrt{V(z)}$ , а также ряда других преобразований с учётом ограничения на параметры  $C_0 = 2k$  получается обыкновенное дифференциальное уравнение вида [3]

$$V_z^2 + \frac{4}{5}dV^6 + cV^5 + \frac{4}{3}bV^4 + 2aV^3 + (4k^2 + 4\omega)V^2 + 8CV = 0, \quad (3)$$

где  $C$  произвольная постоянная. При ограничениях на параметры

$$a = 2A^3, \quad b = -\frac{9}{2}A^2, \quad c = 4A, \quad d = -\frac{5}{4}, \quad \omega = -\frac{A^4}{4} - k^2, \quad C = 0, \quad (4)$$

где  $A$  некоторая константа, уравнение (3) представляется в виде

$$V_z^2 = V^2(V - A)^4. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) выражается следующим образом

$$V(z) = \frac{AW(e^{A^2(z+z_0)})}{1+W(e^{A^2(z+z_0)})}, \quad (6)$$

где  $W(x)$  функция Ламберта, удовлетворяющая уравнению  $x = W(x)e^{W(x)}$ .

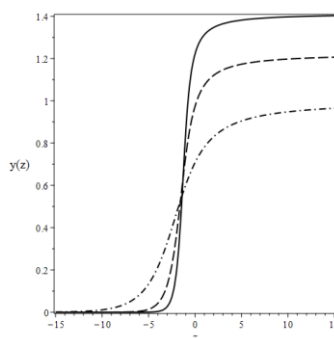


Рис. 1. График зависимости  $y(z)$  при ограничениях на параметры (4) и при  $A = 1, z_0 = 1$  (сплошная линия),  $A = 1,5, z_0 = 1$  (пунктирная линия),  $A = 2, z_0 = 1$  (штрих-пунктирная линия).

На рисунке 1 представлен график зависимости  $y(z)$  при ограничениях на параметры (4). Из рисунка видно, что полученное решение представляет собой уединенную волну.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141.

### Список литературы

1. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. // Optical Solitons: From Fiber to Photonic Crystals. Elsevier, 2003. P. 1–540.
2. Malomed B. A. // Soliton Management in Periodic Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006.
3. Kudryashov N.A. // Optik. 2022. Vol. 261. P. 169163.

С.Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЛЬНИКОВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБОБЩЕННОГО КОМПЛЕКСНОГО УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ ПРИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Рассмотрено периодически возмущенное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, полученное путем перехода к переменным бегущей волны в комплексном обобщенном уравнении Гинзбурга–Ландау. Найдены явные выражения гомоклинических и гетероклинических орбит системы для двух частных случаев значений параметров. Устойчивость этих орбит исследована при помощи построения вдоль них функций Мельникова. Путем анализа нулей функции Мельникова найдены области значений управляющих параметров системы, при которых эти орбиты неустойчивы по отношению к малым возмущениям.

S.F. LAVROVA, N.A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MELNIKOV METHOD APPLIED TO THE STUDY OF DYNAMICS OF THE GENERALIZED COMPLEX GINZBURG-LANDAU EQUATION UNDER SMALL PERTURBATIONS

A periodically perturbed second-order ordinary differential equation obtained by passing to traveling wave variables in the complex generalized Ginzburg–Landau equation is considered. Explicit expressions for the homoclinic and heteroclinic orbits of the system are found for two special cases of parameter values. The stability of these orbits is investigated by constructing the Melnikov function along them. By analyzing the zeros of the Melnikov function, the ranges of values of the control parameters of the system are found for which these orbits are unstable with respect to small perturbations.

Оптические солитоны имеют хороший потенциал стать основными носителями информации в телекоммуникациях благодаря их способности создавать большие расстояния без ослабления и изменения своей формы. Динамика солитонов в нелинейной оптике наиболее часто моделируется при помощи нелинейного уравнения Шрёдингера, однако множество других моделей может служить ему альтернативой. Это множество включает в себя комплексное уравнение Гинзбурга-Ландау, которое также описывает ряд нелинейных процессов, включающий в себя фазовые переходы второго рода, сверхпроводимость, бимолекулярную динамику, конденсацию Бозе-Эйнштейна, оптические волноводы и волокна, сверхтекучесть и другие явления [1].

Возмущенное обобщенное комплексное уравнение Гинзбурга-Ландау в безразмерной форме имеет следующий вид

$$iq_t + aq_{xx} + f(|q|^2)q = \frac{1}{|q|^2 q^*} [\alpha |q|^2 (|q|^2)_{xx} - \beta \{(|q|^2)_x\}^2] + \gamma q \quad (1)$$
$$+ i\epsilon(\delta q_x + \lambda(|q|^{2m}q)_x + \theta(|q|^{2m})_x q + \mu|q|^{2m}q_x) + \epsilon F \cos \Omega(x - C_0 t),$$

где  $q(x,t)$  – комплекснозначная функция, описывающая интенсивность оптического импульса,  $x$  – безразмерное расстояние вдоль оптического волокна,  $t$  – безразмерное время,  $a, b, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \theta, \mu$  – вещественные параметры математической модели,  $0 < \epsilon \ll 1$  – параметр возмущения,  $F$  – амплитуда стороннего возмущения,  $\Omega$  – его частота.

При помощи перехода к переменным бегущей волны уравнение (1) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению для описания огибающей волнового пакета. Уединенные волны невозмущенной системы на фазовой плоскости имеют вид гомоклинических орбит. При некоторых значениях управляющих параметров полученное уравнение имеет вид возмущенной гамильтониановой системы, устойчивость гомоклинических орбит которой можно исследовать при помощи метода Мельникова. Функция Мельникова редукции уравнения (1) вдоль гомоклинической орбиты невозмущенного уравнения всегда имеет простые нули, что говорит о выполнении необходимого условия реализации хаоса Мельникова. Обнаруженный хаос можно контролировать путем добавления в (1) контроллера вида  $\epsilon k q_x$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141.

### Список литературы

1. A. Biswas, R.T. Alqahtani // Optical soliton perturbation with complex Ginzburg-Landau equation by semi-inverse variational principle. Optik, 147 2017. 77-81.

И.Н. ЛЕВЧЕНКО<sup>1</sup>, Г.К. ВЛАДИМИРОВ<sup>2</sup>, И.В. ВОЛОДЯЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский Национальный Исследовательский Медицинский Университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, Институт регенеративной медицины, Москва, Россия, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский Государственный Университет, Биологический факультет, Москва, Россия, Москва, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧЕК ПЕРОКСИДАЗНОЙ АКТИВНОСТИ АКТИВИРОВАННОЙ КУМАРИНОМ С-314 ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСА ЦИТОХРОМА СС КАРДИОЛИПИНОМ.**

Наша работа посвящена моделированию точек пероксидазной активности и сопровождающей его хемилюминесценции (ХЛ), запускаемых комплексом CytC-CL в мембране. Формирование модели этого процесса позволяет использовать ХЛ, как способ нахождения количества и значений точек пероксидазной активности CytC-CL.

I.N. LEVCHENKO<sup>1</sup>, G.K. VLADIMIROV<sup>2</sup>, I.V. VOLODYAEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

<sup>2</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Institute of Regenerative Medicine, Moscow, Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow, Russia, Moscow, Russia

## **MODELING OF POINTS OF PEROXIDASE ACTIVITY OF CHEMILUMINESCENCE ACTIVATED BY COUMARIN C-314 UNDER THE ACTION OF CYTOCHROME C COMPLEX WITH CARDIOLIPIN.**

Our work is devoted to modeling the points of peroxidase activity and its accompanying chemiluminescence (CL) triggered by the CytC-CL complex in the membrane. The formation of a true model of this process makes it possible to use C methods as a way to adjust the number and values of CytC-CL peroxidase activity points, that is, to investigate the process under various conditions.

Хемилюминесценция (ХЛ) сопровождает реакции рекомбинации перекисных радикалов и другие процессы с их участием.

Применение кумаринов способствует усилению интенсивности свечения на 2–3 порядка не влияя на химические процессы проходящие в процессе. Например, кумарин С-314 перехватывает возбуждение у триплетно-возбужденных кетонов, образующихся при рекомбинации перекисных радикалов по механизму Рассела и, при этом, при нахождении значений и количества точек пероксидазной активности интенсивность ХЛ на 3–4 порядка выше, чем сами возбужденные кетоны[1]. Таким образом, ХЛ, активированная кумарином С-314 имеет интенсивность в ~1500 раз выше, чем спонтанная ХЛ липидов, но при этом не отличается от нее по параметрам кинетических кривых и, соответственно, может быть использована для решения задачи моделирования значений и количества точек пероксидазной активности. Точность определялась присутствием кардиолипина для стабилизации рН, тушением Fe<sup>2+</sup> и наличием кумарина С-314. Среди факторов, которые могут искажать значение точек пероксидазной активности, можно выделить недостаточное добавление пероксида водорода, избыточное количество азота (II), метанола, денатурацию белка, изменение конформации CytC в комплексе CytC-CL.

В поисках оптимальных условий возбуждения были проанализированы системы липопероксидазной и квази-липоксигеназной реакций, активированные кумарином С-314.

На основании анализа параметров комплекса CytC-CL, кумарина С-314, пероксидазы хрена и люминола, проведены исследования сенсibiliзирующей способности кумарина С-314, как физического активатора с целью уточнения значений и количества точек пероксидазной активности.

Комплекс CytC-CL отличается от нативного CytC по следующим свойствам: (1) обладает флуоресценцией тирозиновых и триптофановых остатков; (2) теряет поглощение в полосе Core(405–410 нм), отражающей существование связи  $Fe(heme) \cdots S(Met80)$ ; (3) обладает пероксидазной активностью и катализирует образование липидных радикалов в мембране, которые запускают цепной процесс перекисного окисления липидов. Данный процесс можно наблюдать по хемилюминесценции, как нативной, так и активированной, также определять количество и значение точек пероксидазной активности.

Для того чтобы сделать моделирование значений и количества точек пероксидазой активности, нужно учесть следующее: (а) пероксидазная активность зависит как от концентрации CytC, так и от соотношения, определяющего процент абсолютного количества денатурированной формы; (б) значение точек пероксидазной активности наблюдалось при усилении ХЛ и было достигнуто с кумарином С-314 при интенсивности ХЛ в ~1500 выше, чем спонтанная ХЛ; (с) механизм усиления ХЛ – перенос энергии от молекулы кетона в электронно-возбужденном состоянии на флуоресцентный уровень кумарина С-314.

А.М. МАЛАФЕЕВ<sup>1</sup>, А.А. КРЕНЦ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН-УБИЙЦ В ДИНАМИКЕ ЛАЗЕРА С ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В работе теоретически исследована динамика лазера с запаздывающей оптоэлектронной обратной связью, управляющей потерями резонатора. Показано, что динамическая система переходит в хаотический режим при увеличении времени задержки через последовательность бифуркаций удвоения периода. Показано, что при дальнейшем увеличении времени задержки наблюдается появление всплесков экстремально большой амплитуды, связанное с кризисом хаотического аттрактора.

А.М. MALAFEEV<sup>1</sup>, А.А. KRENTS<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, Samara, Russia

## INVESTIGATION OF ROGUE WAVES IN A LASER WITH OPTO-ELECTRONIC FEEDBACK

In the article, the dynamics of the laser with delayed opto-electronic feedback controlling losses of the laser is theoretically investigated. It is shown that the dynamic system goes into a chaotic mode with increasing delay time through a sequence of period doubling bifurcations. It is shown that further increasing of the delay time leads to bursts of extremely large amplitude associated with the crisis of the chaotic attractor.

Исследование волн-убийц в оптических системах началось с пионерской работы [1]. Позднее было показано, что лазерные системы являются удобным лабораторным инструментом для исследования статистики волн-убийц и механизмов их появления [2].

В работе исследуется модель лазера с запаздывающей оптоэлектронной обратной связью [3]. Математическая модель представляет собой систему ОДУ с запаздывающим аргументом, которая решается численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка:  $dI/dt = GI(N - I - \varepsilon I(t - \tau))$ ,  $dN/dt = A - N(I + 1)$ , где  $I$  и  $N$  – безразмерные интенсивность и инверсия населенности, соответственно;  $G$  – отношение скорости затухания поля в резонаторе и скорости релаксации инверсии населенности;  $A$  – безразмерный параметр накачки;  $\varepsilon \ll 1$  – сила оптоэлектронной обратной связи;  $t$  и  $\tau$  – время и время задержки, соответственно.

Моделирование динамики лазера проводилось при параметрах, соответствующих твердотельному Nd:YAG лазеру:  $G = 5000$  и  $A = 1.2$ . Сила обратной связи была выбрана  $\varepsilon = 0.01$ . Меняя время задержки  $\tau$ , можно показать качественные изменения в динамике лазера. При увеличении времени задержки происходит последовательность бифуркаций удвоения периода, приводящая динамическую систему к режиму хаоса (рис. 1а). Начиная с  $\tau = 0.513$ , на фоне хаотических колебаний малой амплитуды возникают редкие всплески экстремально большой амплитуды (рис. 1б), что связано с кризисом хаотического аттрактора. При дальнейшем увеличении времени задержки  $\tau$  вероятность появления всплесков экстремально большой амплитуды возрастает.

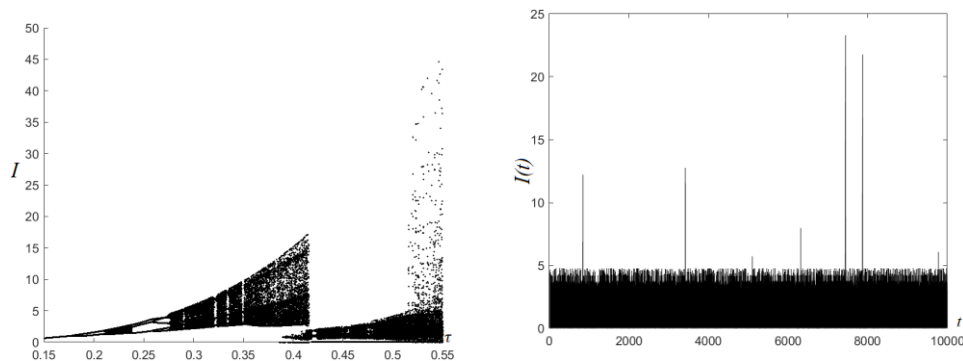


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма (а) и динамика лазера при  $\tau = 0.513$  (б)

В работе показано, что в модели лазера с запаздывающей оптоэлектронной обратной связью возможно возникновение волн-убийц. Существует критическое значение параметра задержки  $\tau$ , при котором появляется возможность перехода фазовой траектории между аттракторами малой и большой амплитуд. В результате таких редких переходов и появляются всплески интенсивности большой амплитуды.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты № FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

### Список литературы

1. Solli D.R., Ropers C., Koonath P., Jalali B. // Nature 2007. Vol. 450, P. 1054–1057.
2. Akhmediev N., Dudley J.M., Solli D.R., Turitsyn S.K. // Journal of optics. 2013. Vol. 15, P. 060201.
3. Grigorieva E.V., Kashchenko S.A., Loiko N.A., Samson A.M. // Physica D (Nonlinear Phenomena) 1992. Vol. 59, № 4. P. 275-437.

А.К. МАТВЕЕВА<sup>1,2</sup>, М.О. КОРПУСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## О КРИТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ДЛЯ ОДНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ВОЛН В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В работе рассматривается задача Коши для некоторого модельного уравнения в частных производных третьего порядка и со степенной нелинейностью. Для линейной части нелинейного уравнения построено фундаментальное решение, с помощью которого сначала в ограниченной области, а затем в неограниченных областях построены формулы, аналогичные третьим формулам Грина для эллиптических операторов. Далее для классических решений рассматриваемой задачи Коши получено интегральное уравнение. Рассматривая отдельно это интегральное уравнение, доказано, что оно имеет единственное непродолжаемое во времени решение в весовых пространствах ограниченных и непрерывных функций. Используя метод нелинейной емкости С.И. Похожаева, исследовано, при каких критических показателях существует слабое локальное во времени решение, и при каких оно не существует.

А.К. MATVEEVA<sup>1,2</sup>, М.О. KORPUSOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ON CRITICAL EXPONENTS FOR ONE NONLINEAR SEMICONDUCTOR WAVE EQUATIONS

We consider the Cauchy problem for a model partial differential equation of third order with non-linearity. We construct a fundamental solution for the linear part of the equation and use it to obtain analogues of Green's third formula for elliptic operators, first in a bounded domain and then in unbounded domains. We derive an integral equation for classical solutions of the Cauchy problem. A separate study of this equation yields that it has a unique inextendible-in-time solution in weighted spaces of bounded and continuous functions. We prove that every solution of the integral equation is a local-in-time weak solution of the Cauchy problem provided that . We use Pokhozhaev's non-linear capacity method to investigate existence of solution at different critical exponents.

В данной работе исследуется задача Коши для некоторого модельного уравнения в частных производных третьего порядка и со степенной нелинейностью:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta_x u + \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta_x u = |u|^q, \quad x = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$$
$$u(x, 0) = u_0(x)$$

где функция  $u = u(x, t)$  - это потенциал электрического поля. Данное уравнение относится к классу нелинейных уравнений типа С. Л. Соболева. В настоящей работе мы получили результат о существовании двух критических показателей  $q = 3$  и  $q = 4$  таких, что в широких классах начальных функций  $u_0(x)$  при  $1 < q \leq 3$  отсутствует даже локальные во времени слабые решения задачи Коши, а при  $3 < q$  локальные во времени слабые решения уже существуют, однако, при  $3 < q \leq 4$  глобальных во времени слабых решений нет — все слабые решения разрушаются за конечное время.

В плане перспективы, это позволяет в дальнейшем изучить нелинейные уравнения с другим типом нелинейности, в случаях различной размерности. Настоящая работа продолжает исследования, начатые нами в работах [1] – [3].

### Список литературы

1. М. О. Корпусов, “Критические показатели мгновенного разрушения или локальной разрешимости нелинейных уравнений соболевского типа”, *Изв. РАН. Сер. матем.*, 79:5 (2015), 103–162.
2. А. А. Панин, “О локальной разрешимости и разрушении решения абстрактного нелинейного интегрального уравнения Вольтерра”, *Матем. заметки*, 97:6 (2015), 884–903.
3. М. О. Korpusov, A. V. Ovchinnikov, A. A. Panin, “Instantaneous blow-up versus local solvability of solutions to the Cauchy problem for the equation of a semiconductor in a magnetic field”, *Math. Methods Appl. Sci.*, 41:17 (2018), 8070–8099.
4. Э. Митидиери, С. И. Похожаев, “Априорные оценки и отсутствие решений нелинейных уравнений и неравенств в частных производных”, Тр. МИАН, 234, Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», М., 2001, 3–383.
5. А. Г. Багдоев, В. И. Ерофеев, А. В. Шекоян, *Линейные и нелинейные волны в диспергирующих сплошных средах*, Физматлит, М., 2009, 320 с..
6. В. С. Владимиров, *Уравнения математической физики*, 5-е изд., Наука, М., 1988, 512 с.
7. Д. Гилбарг, Н. Трудингер, *Эллиптические дифференциальные уравнения с частными производными второго порядка*, Наука, М., 1989, 464 с..

В.А. МЕДВЕДЕВ, Н.А. КУДРЯШОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛИТОННЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА С ТРОЙНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Рассмотрена задача распространения оптического солитона, описываемого уравнением Шрёдингера с тремя нелинейностями. Численно исследована устойчивость аналитических солитонов. Проведено моделирование взаимодействия оптического солитона с возмущением начальных данных. Рассмотрено влияние высших степеней нелинейности на распространение солитона. Построены диаграммы устойчивых параметров модели. Продемонстрированы варианты стабилизации решений. Сформулировано утверждение об устойчивости решений в зависимости от степеней нелинейности в исследуемом уравнении.

V. A. MEDVEDEV, N. A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL STUDY OF SOLITON SOLUTIONS OF THE NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH TRIPLE NONLINEARITY

The problem of propagation of an optical soliton described by the Schrodinger equation with three nonlinearities is considered. The stability of analytical solitons is numerically investigated. The interaction of an optical soliton with a perturbation in the initial data is modeled. The influence of higher degrees of nonlinearity in the equation is considered. Diagrams of stable parameters of the model are constructed. Variants of stabilization of solutions are demonstrated. The statement about the stability of solutions depending on the degrees of nonlinearity in the original equation is formulated.

В современной нелинейной оптике предложен ряд моделей, описывающих процессы распространения импульсов в оптической среде [1-2]. Обычно данные модели основываются на различных обобщениях уравнения Шрёдингера. В связи с этим возникает проблема исследования свойств, которыми предложенные модели и допускаемые ими решения обладают. В работе исследовано уравнение Шрёдингера с тройной нелинейностью  $iu_t + au_{xx} + b_1|u|^2u + b_2|u|^4u + b_3|u|^6u = 0$ [3]. Аналитические решения для данного уравнения в виде бегущей волны найдены в работе [4], однако факт их устойчивости и свойства требовали дополнительного исследования. Рассмотрению этого вопроса посвящена данная работа.

Для проведения математического моделирования разработан программный код на основе псевдоспектрального метода Фурье[5], позволяющий решить начально-краевую задачу с исходным уравнением, периодическими граничными и произвольными начальными условиями.

Обнаружено, что оптические солитоны исходного уравнения в общем случае неустойчивы, однако существует область параметров модели, при которых оптические солитоны являются условно устойчивы, позволяя в теории использовать последние для передачи сигналов на ограниченные расстояния. Также обнаружено что устойчивость оптического солитона для исходного уравнения связана с его интенсивностью. При взаимодействии с возмущением в начальных данных солитоны из области устойчивых параметров не распадаются. Высшие степени нелинейности в уравнении приводят к разрушению более интенсивных импульсов.

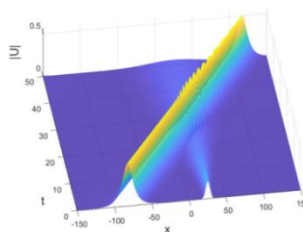


Рис. 1. Моделирование взаимодействия оптического солитона с возмущением в начальных данных  
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-41-00070.

### Список литературы

1. Медведев, В & Кудряшов, Н & Лаврова, С. (2021). Применение метода Мельникова для анализа уравнения Бисваса-Аршеда. // Вестник НИЯУ МИФИ. 10. 516-522.
2. Kudryashov, Nikolay. (2019). General solution of the traveling wave reduction for the perturbed Chen-Lee-Liu equation. // Optik. 186. 10.1016/j.ijleo.2019.04.127.
3. Kudryashov N.A. Method for finding optical solitons of generalized nonlinear Schrodinger equations //Optik - International Journal for Light and Electron Optics Vol. 261., July 2022, 169163.
4. Kudryashov N.A. Highly dispersive solitary wave solutions of perturbed nonlinear Schrodinger equations // Applied Mathematics and Computation Vol. 371., April 2020, 1249721.
5. Weideman J. A. C., Herbst B. M. Split-step methods for the solution of the nonlinear Schrodinger equation // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1986. – Vol. 23. – №. 3. – P. 485-507.



С.Ю. МИСЮРИН<sup>1,2</sup>, Н.Ю. НОСОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

## ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ЛАГРАНЖА II РОДА

В работе проводится расчёт и частотный анализ механизма с тремя степенями свободы на основе уравнений Лагранжа II рода. По кинематической связи каждого компонента строится динамическое уравнение параллельного механизма с получением собственных частот параллельного механизма в рабочем пространстве.

S.YU. Misyurin<sup>1,2</sup>, N.YU. NOSOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## FREQUENCY ANALYSIS OF A MECHANISM WITH THREE DEGREES OF FREEDOM BASED ON THE LAGRANGE EQUATIONS OF THE II KIND

The paper presents a calculation and frequency analysis of a mechanism with three degrees of freedom based on the Lagrange equations of the second kind. According to the kinematic connection of each component, a dynamic equation of the parallel mechanism is constructed with obtaining the natural frequencies of the parallel mechanism in the working space.

Анализ динамических свойств механизмов параллельной структуры относительно мало изучен, и ограничивается в основном решением обратных задач динамики, когда по требуемому закону движения выходного звена определяются усилия в приводах [1, 2]. В широком смысле к динамическому анализу можно отнести исследование поведения системы (механизма) в поле действия приложенной к нему силы (нагрузки).

В условиях высокой скорости и большой нагрузки упругая деформация каждого компонента будет оказывать определенное влияние на точность движения подвижной платформы и точность позиционирования груза в рабочем пространстве механизма. Поэтому для уменьшения влияния упругой деформации на подвижную платформу и повышения точности ее вывода совершенно необходимы исследования по моделированию упругой деформации и динамических характеристик механизма.

Теоретической основой большей части исследований колебаний голономных (консервативных) систем с конечным числом степеней свободы служат уравнения Лагранжа II рода в обобщенных координатах.

Изучение колебаний сплошных упругих систем, как систем с бесконечным числом степеней свободы, связано с большими затруднениями. Поэтому с технической точки зрения целесообразно построение упрощенных схем устройств (механизмов) путем замены сложной конструкции механизма более простой, для которых необходимо выполнить вибрационные расчёты. Для проведения расчётов по определению собственных частот механизма был использован приведенный (эквивалентный приведенной) схеме механизм «пирамида» с тремя степенями свободы (рисунок 1(а)).



Рис. 1. а) механизм поступательной структуры с тремя степенями свободы; б) расчётная схема механизма с тремя степенями свободы.

Анализ собственной частоты механизма позволяет не только избежать явления резонанса платформы, когда платформа приводится в движение на высокой частоте, но и исследовать взаимосвязь между структурными параметрами и собственной частотой платформы для определения оптимальной конструкции.

### Список литературы

1. Glazunov V.A., Nosova N.Yu., Kheylo S.V., Tsar'kov A.V. // Mech. Mach. Science. 2018. Vol. 56. P. 125–170.
2. Misyurin S.Y., Kreinin G.V., Markov A.A., Sharpanova, N.S. // J. Mach. Manufacture and Reliability. 2016. Vol. 45, №5. P. 403–411.

С.С. МУРАВЬЕВ-СМИРНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ЭКРАНИРОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ СЛОЕВ**

В докладе обсуждается модель экранирования постоянных магнитных полей цилиндрическим пленочным экраном (оболочкой) из магнитного материала. Цель исследования состоит в вычислении величин, характеризующих ослабление первичного внешнего поля при прохождении через стенки внутрь оболочки. При выборе материала оболочки учитывается нелинейность магнитной проницаемости в объёме оболочки. Данная краевая задача магнитостатики сводится к нелинейному обыкновенному дифференциальному уравнению. Приведены примеры решений нелинейного уравнения для некоторых исходных данных.

S.S. MURAVEV-SMIRNOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **PERMANENT MAGNETIC FIELD SHIELDING BY A CYLINDRICAL SCREENS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR PROPERTIES OF THE LAYERS**

A model of shielding of permanent magnetic fields by a cylindrical film screen (shell) made of magnetic material is discussed in the report. The purpose of the study is to calculate the values characterizing the attenuation of the primary external field as it passes through the walls inside the shell. The nonlinearity of the magnetic permeability in the volume of the shell is taken into account when selecting the material of the shell. This boundary value problem of magnetostatics is reduced to a nonlinear ordinary differential equation. Examples of solutions to a nonlinear equation for some initial data are given.

### *Список литературы*

1. Ерофеев В. Т., Громыко Г. Ф., Заяц Г. М. Краевые задачи экранирования магнитных полей многослойными пленочными цилиндрическими экранами с нелинейными свойствами слоёв // Дифференциальные уравнения. 2019. Т. 55. № 7. С. 996-1008.
2. Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 124–133.
2. Грабчиков, С.С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63. №1. С. 7–14.
3. Dmitrenko V. et al. Characteristics of magnetic shields for protection PMT in the LHCb hadron calorimeter. Journal of Physics: Conference Series. 798. 012139.(2017).

## ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ОСНОВЕ СКВАЖИННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЛЕДНИКОВ

На основе метода реконструкции прошлых температур поверхности для горных пород, проведено обобщение на случай ледников, обладающих свойством адвекции. В качестве дополнительной информации, наряду с измеренными температурными профилями, используются изотопные данные ледяных кернов.

O.V. NAGORNOV, S.A. TYUFLIN, T.I. BUKHAROVA  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## GENERALIZATION OF THE PALEOCLIMATE RECONSTRUCTION METHOD FOR GLACIERS BASED ON THE BOREHOLE TEMPERATURE MEASUREMENTS

We generalize the method of reconstruction of the past surface temperature developed for rock on glaciers subjected to the advection of ice. As additional information we use the isotope ice core data together with measured temperature-depth profiles.

Для восстановления прошлых температур поверхности ледников используются данные по измерениям температурных профилей в скважинах. Математическая постановка обратной задачи включает в себя уравнение теплопроводности, начальное и граничное условия и условие переопределения [1]. Граничными условиями являются стационарный геотермический тепловой поток у основания ледника и изменения температуры на поверхности ледника. Условием переопределения является измеренный температурный профиль в скважине  $\chi(z)$ ,  $z$  - вертикальная координата. Тогда нахождение температуры на поверхности в прошлом является решением одномерной обратной задачи для уравнения теплопроводности для скважины глубины  $H$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(z)C(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right] - \rho(z)C(z)w(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z}, 0 < t < t_f, 0 < z < H, \\ T(0, t) = U_s + \mu(t), 0 < t \leq t_f, \\ \frac{\partial T}{\partial z}(H, t) = -\frac{q}{k(H)}, 0 < t \leq t_f, \\ T(z, 0) = U(z), 0 \leq z \leq H, \\ T(z, t_f) = \chi(z), 0 \leq z \leq H, \end{array} \right.$$

где  $\rho(z)$ ,  $C(z)$ , и  $k(z)$  – плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности ледника,  $w(z)$  – скорость вертикальной адвекции годовых слоев в леднике,  $q$  – геотермический тепловой поток у основания ледника,  $U(z)$  – стационарный профиль температуры, связанный с этим потоком.  $U_s$  – начальная температура на поверхности ледника, которая характеризует среднюю температуру, которая была на поверхности в прошлом.  $\mu(t)$  – изменения температуры на поверхности ледника относительно ее начального значения  $U_s$  в момент времени  $t=0$  ( $\mu(0)=0$ ).

Наиболее часто используемыми методами восстановления прошлых температур являются: метод контроля [2], метод Монте-Карло [3] и метод регуляризации Тихонова [1]. Тестовые задачи показывают, что эти методы не всегда позволяют получить достоверную информацию об изменениях температуры на поверхности. В частности, показано, что для существенно отличающихся тестовых изменений температуры на поверхности, возможно получить схожие реконструкции. Таким образом, используя существующие методы, не представляется возможным установить глобальные климатические изменения без привлечения дополнительной информации.

Для решения этой проблемы, предлагается модифицировать существующие методы введением дополнительной информации об изменениях климата в прошлом. Такой подход ранее применялся для реконструкции прошлых температур по измерениям температуры в скважинах горных пород [4]. Здесь мы распространяем метод на ледники, обладающие свойством адвекции.

### Список литературы

1. Тюфлин и др. // Лёдиснег 2020. Т. 60. С. 485.
2. MacAyeal D.R. et al. // *J. of Glaciology* 1991. V. 37. P. 326.
3. Dahl-Jensen D. et al. // *Science* 1998. V. 282. P. 268.
4. Nagornov et al. // *AIP Conference Proceedings* 2022. V. 2425. P. 340011.

В.В. НАЗАРОВ

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

## **ЧТО НОВОГО В ОБЛАСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Представлен выборочный обзор по малоизвестным результатам экспериментальных исследований. За последние 15 лет появились работы с дополнительными экспериментальными данными. Зависимости между основными механическими характеристиками дополнены экспериментальными диаграммами механического состояния при высокой температуре, а также фотоснимками текущего состояния структуры материала. Появились работы, в которых ползучесть впервые рассмотрена для магниево-литиевого сплава (самая низкая удельная плотность у материала) и титановых сплавов (до этого, рассматривались сталь, медь, алюминиевые и никелевые сплавы). Обнаружено относительное различие времен в момент разрушения при одноосном и равном двухосном растяжениях стальных прямоугольных пластин. Для математического моделирования процессов ползучести и разрушения в условиях равного многоосного растяжения впервые предложены сложные эквивалентные напряжения с возможностью описания длительной прочности при равном двухосном и равном трехосном растяжениях.

V.V. NAZAROV

*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## **WHAT IS NEW IN THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF CREEP PROPERTIES AND LONG-TERM STRENGTH OF METALLIC MATERIALS**

A selective review of the little-known results of experimental studies is presented. Over the past 15 years, work has been carried out with additional experimental data. The dependences between the main mechanical characteristics are supplemented by experimental diagrams of the mechanical state at high temperature, as well as photographs of the current state of the material structure. There were works in which creep was first considered for a magnesium-lithium alloy (the lowest specific density of the material) and titanium alloys (before that, steel, copper, aluminum and nickel alloys were considered). The relative difference of the rupture times at the moment under uniaxial and equal biaxial tension of rectangular steel plates was found. For mathematical modeling of creep and fracture processes under conditions of equal multiaxial tension, complex equivalent stresses with the possibility of describing long-term strength under equal biaxial and equal triaxial tension are proposed for the first time.

Несмотря на то, что о свойстве ползучести стало известно еще в первой половине XIX столетия, его систематическое исследование началось только с середины XX столетия. Различают опыты на одноосное растяжение и сложное напряженное состояние, где первые проводят с целью измерения термомеханических характеристик материала, вторые – для исследования конструктивной прочности. До XXI столетия результаты экспериментальных исследований получены для меди, алюминиевого сплава, нержавеющей стали и жаропрочного никелевого сплава, при этом в большинстве случаев результаты относятся к длительной прочности, при которой измерение деформаций от времени не проводится. За последние полтора десятка лет появились работы, в которых приведены кривые ползучести для других классов металлических материалов [1-2]. Кривые ползучести дополняются экспериментальными зависимостями напряжение – деформация при разных значениях высокой температуры [3]. Кроме этого, в некоторых работах приведены фотоснимки со структурными исследованиями, на которых сопоставлены различные состояния микроструктуры [4].

Ранее обнаруженный эффект длительной прочности из механических испытаний прямоугольных пластин из алюминиевого сплава, наблюдается в образцах из нержавеющей стали [5], где равное двухосное растяжение приводит к увеличению времени в момент разрушения. В другой работе того же коллектива ученых для другой стали обнаружено, что равное двухосное растяжение, напротив, приводит к уменьшению времени в момент разрушения.

### *Список литературы*

1. Ильин С.И., Корягин Ю.Д., Лапина И.В. Ползучесть ультралегких магниевых сплавов при низких температурах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. 2012. № 15. С. 105–107.
2. Назаров В.В. Кратковременная ползучесть титановых сплавов ВТ5 и ВТ6 при высокой температуре // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 6. С. 57–60.
3. Mohta K., Gupta S.K., Cathirvolu S., Jaganathan S., Chattopadhyaya J. High temperature deformation behavior of Indian PHWR Calandria material SS 304L // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 368. P. 110801.
4. Xie Z.G., He Y.M., Yang J.G., Gao Z.L. Microstructural evolution of nuclear power steel A508-III in the creep process at 800°C // Applied Mechanics and Materials. 2017. Vol. 853. P. 153–157.
5. Kobayashi H., Ohki R., Itoh T., Sakane M. Multiaxial creep damage and lifetime evaluation under biaxial and triaxial stresses for type 304 stainless steel // Engineering Fracture Mechanics. 2017. Vol. 174. P. 30–43.

В.В. НАЗАРОВ

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**ГИПОТЕЗЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПО МОДЕЛИ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ОПИСАТЬ  
РАЗВИТИЕ ПОРИСТОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ,  
РАЗДУВАЕМОЙ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ УСКОРЯЮЩЕЙСЯ  
ПОЛЗУЧЕСТИ**

Рассмотрены два деформированных состояния цилиндрической трубы, раздуваемой внутренним давлением газа при отсутствии осевой деформации. Из данного рассмотрения установлены зависимости для перемещений от радиуса для несжимаемого материала (при установившейся ползучести) и материала с эволюцией пористости (при ускоряющейся ползучести).

V.V. NAZAROV

*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**HYPOTHESES AND CONSTRAINTS ON THE MODEL,  
ALLOWING TO DESCRIBE THE DEVELOPMENT OF POROSITY IN A CYLINDRICAL  
TUBE INFLATED BY INTERNAL PRESSURE AT ACCELERATING CREEP**

Two deformed states of a cylindrical tube inflated by internal gas pressure in the absence of axial deformation have been considered. From this consideration, the dependences for displacements on the radius have been established for an incompressible material (at secondary creep) and a material with porosity evolution (at tertiary creep).

Со второй половины XX столетия предложены различные модели описания напряженно-деформируемого состояния, реализуемого в цилиндрической трубе, раздуваемой под воздействием внутреннего давления газа. Как правило, в этих моделях рассматривают установившуюся ползучесть (при которой скорости деформаций не меняются от времени), и материал считают несжимаемым [1–2]. По завершении установившейся ползучести зависимости деформаций от времени перестают быть линейными и кривые ползучести возрастают от времени. Фотоснимки структурных состояний стали [3] показали, что с началом ускоряющейся ползучести активизируется процесс образования и роста микропор и материал уже нельзя считать несжимаемым. Для описания процесса накопления повреждений и микропор используют формальную характеристику материала с порами – поврежденность [4], которая зависит от времени и принимает только формальные значения. Использование поврежденности позволяет описать только главный (ползучесть, длительная прочность) процесс без возможности сделать количественную оценку сопутствующим процессам (накопление тех же самых рассеянных повреждений, водородная коррозия стали при высокой температуре). В данной работе, вместо формальной характеристики материала с микропорами – пористости, рассмотрена пористость [5], которая определяется как относительное приращение объема в деформируемом твердом теле. Для описания деформаций и напряжений, возникающих в цилиндрической трубе при ускоряющейся ползучести, предложена модель, в которой рассмотрены два деформированных состояния (начальное при отсутствии деформаций и конечное с накопленными деформациями). При отсутствии осевой деформации рассматривается кинематика только поперечного сечения, где все величины зависят от радиуса и не зависят от осевой координаты.

Чтобы определить зависимость пористости от радиуса, рассмотрена разница между перемещениями в пористом и несжимаемом материалах при одном и том же значении радиуса, где в конечном деформированном состоянии граничные радиусы заданы и совпадают для обоих типов материала. Начальные граничные радиусы выражаются через соответствующие перемещения, при этом используется ограничение по модели, при котором перемещение на внешнем граничном радиусе задано и совпадает для двух типов материала.

Приняты следующие гипотезы: 1) объемная деформация отсутствует, и увеличение площади поперечного сечения происходит только за счет образования и роста микропор; 2) пористость возрастает от внутреннего до внешнего граничных радиусов; 3) произведение пористости и тангенциальной деформации равняется произведению их интегральных характеристик, где в качестве таковых рассмотрены относительное приращение всей площади поперечного сечения и относительное изменение интегрально-среднего радиуса.

*Список литературы*

1. Кац Ш.Н. Ползучесть и разрушение труб под действием внутреннего давления // Известия АН СССР. ОТН. 1957. № 10. С. 86–89.
2. Bhatnagar N.S., Gupta S.K. Analysis of thick-walled orthotropic cylinder in the theory of creep // Journal of the Physical Society of Japan. 1969. Vol. 27. No 6. P. 1655–1661.
3. Xie Z.G., He Y.M., Yang J.G., Gao Z.L. Microstructural evolution of nuclear power steel A508–III in the creep process at 800°C // Applied Mechanics and Materials. 2017. Vol. 853. P. 153–157.
4. Leckie F.A., Hayhurst D.R. Constitutive equations for creep rupture // Acta Metallurgica. 1977. Vol. 25. No 9. P. 1059–1070.
5. Назаров В.В. Деформации цилиндрической трубы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 8. С. 56–58.

## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ В ВИДЕ ПОЛИНОМА

Рассматриваются законы сохранения для уравнений математической модели с неограниченной дисперсией и полиномиальной нелинейностью. Математическая модель описывается обобщенным уравнением Шрёдингера неограниченного порядка. Уравнения семейства не интегрируются обратным преобразованием рассеяния, но все уравнения имеют решения в виде оптических солитонов. Показано, что все уравнения семейства имеют три закона сохранения. Законы сохранения вычисляются прямыми расчетами без дифференциального оператора. Вычислены сохраняющиеся величины для соответствующих решений.

D.R.NIFONTOV, N.A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CONSERVATION LAWS OF THE MATHEMATICAL MODEL WITH UNRESTRICTED DISPERSION AND POLYNOMIAL NONLINEARITY

Conservation laws of equations of the mathematical model with unrestricted dispersion and polynomial nonlinearity are considered. The mathematical model is described by the generalized Schrödinger equation of unrestricted order. Equations of the family are not integrable by the inverse scattering transform but all equations have solutions in the form of the optical solitons. It is shown that all equations of the family have three conservation laws. The conservation laws are found taking into account the direct calculations without the differential operator. Conservative quantities corresponding to both solutions are calculated.

Законы сохранения являются одной из важнейших характеристик нелинейных эволюционных уравнений. Они позволяют оценить сохраняющиеся значения некоторых характеристик математических моделей. Известно, что законы сохранения также отражают свойство интегрируемости нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В 1918 году Эмми Нётер доказала, что законы сохранения связаны с симметрией математических моделей.

В последние десятилетия в связи с необходимостью решения задач нелинейной оптики, в том числе задач передачи информации на большие расстояния, появился большой интерес к исследованию математических моделей распространения импульсов в нелинейно-оптических средах [1–3]. Используемые при описании нелинейные уравнения в частных производных обычно не относятся к классу уравнений, интегрируемых обратным преобразованием рассеяния, и, как правило, имеют три закона сохранения.

В данной работе рассматриваются законы сохранения, соответствующие семейству обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера:  $iq_t + i \sum_{j=1}^{2n} a_{2j-1} q_{2j-1,x} + \sum_{j=1}^{2n} a_{2j} q_{2j,x} = \sum_{j=1}^m b_j |q|^{2j} q$ ,  $q_{l,x} = \frac{\partial^l q}{\partial x^l}$ ,  $n, m, l \in \mathbb{N}$ ,  $m \leq n$ ,  $b_m \neq 0$ . В работе [4] было показано, что существует две формы оптических солитонов для всех уравнений данного семейства.

Как правило, законы сохранения, соответствующие нелинейным эволюционным уравнениям, находятся с помощью оператора Эйлера и минимизации Лагранжиана [5]. В данной работе для вычисления законов сохранения используются прямые вычисления. Метод, использованный в данной работе, имеет ряд преимуществ для определенного класса нелинейных эволюционных уравнений, к которым принадлежит рассматриваемое семейство.

В работе найдены сохраняющиеся величины для уравнений семейства с 4 порядком, с 8 порядком и для произвольного порядка. Для того, чтобы найти сохраняющиеся величины уравнение приводилось к виду  $\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial x} = 0$ ,  $T = T(q, q^*, q_x, q_x^*, q_{xx}, q_{xx}^*, \dots)$ ,  $X = X(q, q^*, q_x, q_x^*, q_{xx}, q_{xx}^*, \dots)$ . Тогда сохраняющиеся величины находятся интегрированием плотности  $T: \int_{-\infty}^{+\infty} T dx$ . В работе показано, что все уравнения семейства имеют три закона сохранения. Найдены все три плотности для произвольного порядка уравнения. По найденным  $T$  вычислены сохраняющиеся величины для двух имеющихся решений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141.

### Список литературы

1. Kivshar Y. S., Agrawal G. P., Optical Solitons. From Fibers to Photonic Crystals, Academic Press, 2003
2. Kivshar Yu. S. and Malomed B. A., Dynamics of solitons in nearly integrable systems, Rev. Mod. Phys. (1989) 63, 763 – 915.
3. Kivshar Yu. S. and Pelinovsky D. E., Self - focusing and transverse instabilities of solitary waves, Phys. Reports (2000) 331(4), 117-195.
4. Kudryashov N. A., Mathematical model with unrestricted dispersion and polynomial nonlinearity, Appl. Math. Lett., 138 (2023) 108519.
5. Olver P. J., Applications of Lie groups to differential equations, Springer-Verlag, New York inc, 1986.

Е.А. ОВСЯННИКОВ<sup>1,2</sup>, М.О. КОРПУСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ФОРМУЛЫ ГРИНА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ИОННО-ЗВУКОВЫХ И ДРЕЙФОВЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ

Рассмотрены три нелинейных уравнения из теории ионно-звуковых и дрейфовых волн в плазме, объединённые общей линейной частью. Для данной общей линейной части строится фундаментальное решение и изучаются свойства его гладкости. После этого строится вторая формула Грина в ограниченной области, из которой получается третья формула Грина в ограниченной области. Наконец, в определённом классе функций строятся два варианта третьих формул Грина во всём пространстве.

Е.А. OVSYANNIKOV<sup>1,2</sup>, М.О. KORPUSOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## GREEN FORMULAS FOR NONLINEAR EQUATIONS OF ION ACOUSTIC AND DRIFT WAVES IN A PLASMA.

Three nonlinear equations for ion acoustic and drift waves in a plasma are considered. They are united by a common linear part. The fundamental solution of the common linear part is constructed, and its smoothness properties are studied. Next, the second Green formula in a bounded domain is constructed, which is then used to derive the third Green formula in a bounded domain. Finally, two variants of the third Green formula in the entire space are constructed in a certain class of functions.

Данная работа является частью исследования задач Коши для следующих нелинейных уравнений, полученных в [1]:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta u(x, t) - u(x, t)) + \sum_{j=1}^3 \omega_j^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x_j^2} + \frac{\partial u^2(x, t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta u(x, t) - u(x, t)) + \sum_{j=1}^3 \omega_j^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x_j^2} + \frac{\partial |D_x u|^2(x, t)}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta u(x, t) - u(x, t)) + \sum_{j=1}^3 \omega_j^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u^2(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

причем

$$\sum_{j=1}^3 \omega_j^2 > 0,$$

и мы имеем дело с уравнениями из теории ионно-звуковых волн в плазме, когда  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 > 0$ , и с уравнениями из теории дрейфовых волн в плазме, когда  $\omega_1 = \omega_2 = 0$ ,  $\omega_3 > 0$ . Отметим, что уравнения (1) – (3) относятся к нелинейным уравнениям соболевского типа. В работе рассматриваются классические решения задач Коши для соответствующих уравнений. Для них выводятся вторая и третья формулы Грина. В плане перспективы, это позволяет в дальнейшем изучить вопросы разрешимости и разрушения решения («blow-up») данных задач. Настоящая работа продолжает исследования, начатые в работах [2] – [5].

### Список литературы

1. Корпусов М.О., Овсянников Е.А. Локальная разрешимость, разрушение и гёльдеровская регулярность решений некоторых задач Коши для нелинейных уравнений теории волн в плазме. I. Формулы Грина // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2022. Т. 62. №10. С. 1639–1661.
2. Габов С.А., Оразов Б.Б. Об уравнении  $\frac{\partial^2}{\partial t^2}(u_{xx} - u) + u_{xx} = 0$  и некоторых связанных с ним задачах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1986. Т. 26. № 1. С. 92–102.
3. Korpusov M.O., Lukyanenko D.V., Panin A.A., Yushkov E.V. Blow-up for one Sobolev problem: theoretical approach and numerical analysis // J. Math. Anal. Appl. 2016. V. 442. № 2. P. 451–468.
4. Корпусов М.О., Лукьяненко Д.В., Панин А.А., Юшков Е.В. О разрушении решений одного полного нелинейного уравнения ионно-звуковых волн в плазме с некоррелятивными нелинейностями // Изв. РАН. Сер. матем. 2018. Т. 82. № 2. С. 43–78.
5. Korpusov M.O., Lukyanenko D.V., Panin A.A., Shlyapugin G.I. On the blow-up phenomena for a one-dimensional equation of ion-sound waves in a plasma: analytical and numerical investigation // MNAS. 2018. V. 41. № 8. P. 2906–2929.

У. РАМАЗАНОВА<sup>1,2</sup>, Ш. МАТНАЗАРОВА<sup>1,2</sup>, С. МИРЗАЕВ<sup>2</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>2</sup>, М. ЮСУПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова, АН РУз, Ташкент, Узбекистан

## ПОНИМАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОКИСЛЕНИЯ ОЛИГОСАХАРИДОВ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ НА АТОМНОМ УРОВНЕ

Выполнены компьютерные моделирования для исследования механизмов на атомном уровне окисления олигосахаридов, индуцированного холодной атмосферной плазмой (ХАП). В частности, представлены результаты моделирования молекулярной динамики (МД) для понимания механизмов взаимодействия реактивных форм кислорода, генерируемых ХАП, с целлотриозой, модельной системой для олигосахаридов.

U. RAMAZANOVA<sup>1,2</sup>, Sh. MATNAZAROVA<sup>1,2</sup>, S. MIRZAEV<sup>2</sup>, U. KHALILOV<sup>2</sup>, M. YUSUPOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, AS Uz, Tashkent, Uzbekistan

## UNDERSTANDING THE ATOMIC LEVEL MECHANISMS OF OLIGOSACCHARIDE OXIDATION BY COLD ATMOSPHERIC PLASMA

Computer simulations are carried out to investigate the atomic level mechanisms of oligosaccharide oxidation induced by cold atmospheric plasma (CAP). In particular, the results of molecular dynamics (MD) simulations are presented to understand the interaction mechanisms of reactive oxygen species generated by CAP with cellotriase, a model system for oligosaccharides.

Холодная атмосферная плазма (ХАП) в последние годы привлекает все больше внимания для нескольких медицинских применений, включая удаление биопленок с поверхностей. Однако эффективное использование ХАП в значительной степени зависит от понимания лежащих в их основе процессов. Для точного управления этими процессами необходимо глубоко исследовать точные механизмы взаимодействия плазмообразующих частиц с биохимически значимыми структурами. Это до сих пор остается серьезной проблемой.

Компьютерное моделирование может дать фундаментальное представление о процессах, происходящих на поверхности живых клеток, на атомном уровне, которое трудно получить с помощью экспериментов. Таким образом, в этом исследовании мы использовали моделирование реактивной молекулярной динамики (МД), основанное на потенциале DFTB (density functional-tightbinding) [1], для изучения механизмов взаимодействия активных форм кислорода (АФК) с целлотриозой (простая модельная система для олигосахаридов, см. Рис. 1). В частности, мы изучили непоследовательное (или однократное) воздействие АФК на интактную (неповрежденную) целлотриозу, применяя реактивное моделирование DFTB-MD. Нами установлено, что окисление целлотриозы АФК (особенно атомами О) может приводить к образованию гидроксильных групп, раскрытию кольца в мономерах глюкозы, а также разрыву гликозидных связей между ними, что впоследствии приводит к разрушению молекулы олигосахаридов. Результаты нашего моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования, в котором диссоциация гликозидных связей в олигосахариде целлотриозы наблюдалась при окислении холодной плазмой.

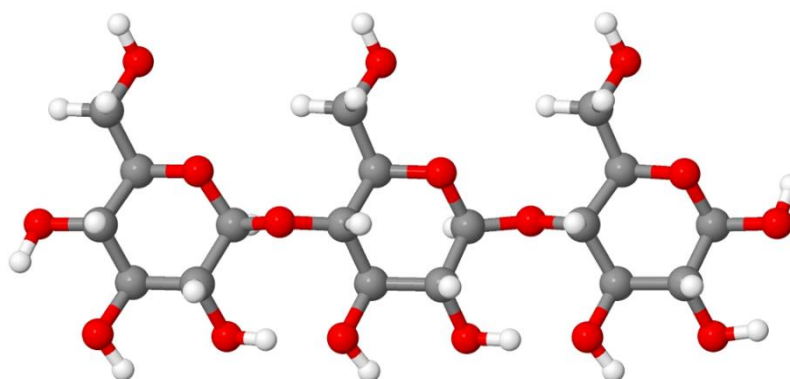


Рис. 1. Схематическое изображение молекулы целлотриозы, состоящей из трех мономеров глюкозы. Атомы углерода, кислорода и водорода представлены соответственно в сером, красном и белом цветах.

Эти результаты помогают лучше понять основные механизмы удаления биопленки с помощью холодной плазмы, поскольку олигосахариды являются одним из основных компонентов биопленки.

### Список литературы

1. Yusupov M., Dewaele D., Attri P. and others // Plasma Process. Polym. 2023 Vol. 20, № 2. P. 2200137.



## ИЗУЧЕНИЕ ТАНДЕМНЫХ ПОВТОРОВ В ХРОМОСОМАХ *C.ANNUUM*

Темой исследования явились тандемные повторы в геноме перца (*C.Annuum*). Поиск повторов проводился методом RPWM, который позволяет обнаруживать сильнодивергентные повторы. Было обнаружено, что повторы составляют ~29% генома перца. Наиболее часто встречаемые повторы имеют длину консенсуса 2,3,21 п.н. Проводилась иерархическая кластеризация профилей повторов с длиной консенсуса 2 п.н.

V.M.RUDENKO, E.V.KOROTKOV  
Research Center of Biotechnology of RAS, Moscow, Russia

## STUDY OF TANDEM REPEATS IN *C.ANNUUM* CHROMOSOMES

The topic of the research was the study of tandem repeats in the pepper (*C.Annuum*) genome. The search for repeats was carried out using the RPWM method, which makes it possible to detect strongly divergent repeats. Repeats make up ~29% of the pepper genome. The most frequent repeats have a consensus length of 2,3,21 bp. Hierarchical clustering of repeat profiles with a consensus length of 2 was done.

Для эукариотических геномов характерна избыточность, связанная с наличием в них повторяющихся последовательностей. Особенно много повторов содержится в геномах растений. Большая часть повторов – это тандемные повторы (ТП). Они представляют собой структуру из повторяющихся непосредственно друг за другом элементов. Чаше ТП приходятся на некодирующие участки ДНК, вследствие чего они способны накапливать большое число мутаций и влиять на эволюционный процесс и степень экспрессии генов [1]. ТП важны также для компактизации ДНК внутри хроматина. До конца роль ТП не изучена, поэтому исследования, посвященные их строению и локализации представляют интерес для научного сообщества.

В данной работе в качестве объекта исследования были взяты последовательности 12 хромосом *C.Annuum*. Последовательности ДНК были просканированы разработанной нами ранее программой поиска ТП, реализующей алгоритм RPWM [2]. Рассматривались длины консенсуса ТП от 2 до 200 п.н. Всего было обнаружено 908072 ТП, причем количество ТП пропорционально длине хромосомы. Наиболее частые длины консенсусов ТП: 3, 2,21, 15, 4 п.н.

Присутствие в геноме тандемных повторов длины 3 п.н. связано с триплетной периодичностью в кодирующих областях. Мы нашли пересечения ТП с генами и выяснили, что 20739 из 31600 генов содержат ТП, причем из них 80% имеют ТП с длиной консенсуса кратной 3. Длина консенсуса 2 п.н. доминирует в некодирующих областях, что согласуется с данными других исследователей [3].

Мы определили понятие профиля ТП как позиционно-весовой матрицы  $M(n \times 16)$ , которая рассчитывается на основании частот динуклеотидов в различных позициях консенсуса.  $n$  – длина консенсуса. Для того, чтобы оценить имеются насколько похожи профили ТП в геноме *C.Annuum* была введена мера расстояния между

двумя различными профилями:  $Dist = \min_t \left\{ \sqrt{\sum_i \sum_j (m_{\max}^1(i, j) - m_{\max}^2((i+t)\%n, j))^2} \right\}, t=0, \dots, n-1$

Здесь % - операция получения остатка от деления. Была осуществлена иерархическая группировка профилей ТП с длиной консенсуса 2 п.н., используя алгоритм Complete Linkage. Поскольку исходное множество всех ТП слишком велико, из него были выбраны 2000 случайных профилей. Результат кластеризации можно видеть на рис.1. На уровне группировки равном 17 выделено 6 групп, для которых вычислены усредненные профили.

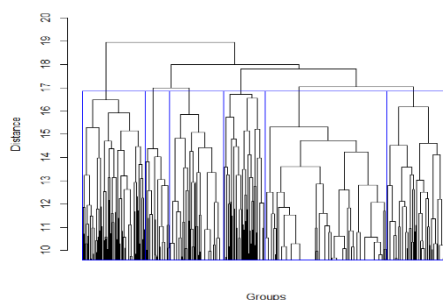


Рис. 1. Результат иерархической кластеризации 2000 ТП с длиной консенсуса 2 п.н.

### Список литературы

1. Sonay T.B., Carvalho T. et al. // Genome Res. 2015. 25:1591
2. Korotkov E.V., Kamionskya A.M., Korotkova M.A. // Genes (Basel). 2021.12(4):473
3. Zhao J., Wang J., Jiang H. // J.Comp.Biol. 2018.25(9):963–975

М.С. СКОРОХОДОВ, А.Г. СБОЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## АНАЛИЗ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Проведено исследование нейросетевых решений со сверточной архитектурой для распознавания объектов. В ходе работы был подготовлен и размечен корпус данных, содержащий изображения и выделенные области объектов. Полученный набор данных был использован для обучения и оценки современных сверточных моделей.

M.S. SKOROKHODOV, A.G. SBOEV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## ANALYSIS OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR OBJECT RECOGNITION TASK IN REAL TIME

The research of neural network solutions based on convolutional topology was carried out for object recognition task. Data corpus was prepared and marked. It contains images, regions and classes of objects. Obtained dataset was used for training and evaluating state-of-the art convolutional neural network models.

Распознавание объектов на изображении является актуальной задачей для проектирования систем управления робототехническими устройствами. Для получения информации с изображений в настоящее время применяются подходы с использованием сверточных нейронных сетей. В данной работе сравниваются результаты предварительно обученных моделей SSD [1] и YOLO [2] со сверточной архитектурой после их точной настройки на наборе данных, собранных в результате экспериментов на симуляторе [3, 4] с использованием камеры модели робототехнического устройства. Сравнение проводится по метрике mAP (meanAveragePrecision), представленной в работе [5]. Для каждого класса распознанного объекта рассчитывается IoU (IntersectionoverUnion) по формуле:  $IoU = Area(B_p \cap B_g) / Area(B_p \cup B_g)$ , где  $B_p$  - предсказанный моделью регион объекта,  $B_g$  - истинный регион объекта,  $B_p \cap B_g$  и  $B_p \cup B_g$  обозначают пересечение и объединение предсказанного и истинного региона объекта на изображении. Значение  $IoU \geq 50\%$ , означает, что предсказанный объект распознан корректно. После этого, на основе значений IoU для каждого класса объектов рассчитываются precision, recall и f1.

Для обучения и оценки моделей SSD и YOLO был собран и размечен набор данных, состоящий из изображений, полученных с камеры модели робототехнического устройства в симуляторе, и регионов расположенных на изображении объектов. Информация о собранных данных представлена в Таблице 1.

Таблица 1. Информация о собранных данных для обучения сверточных сетей.

Количество изображений	Количество классов объектов	Количество размеченных объектов
2287	7, 11	23215

Было проведено по 2 эксперимента: предсказание 7 классов объектов и предсказание 11 классов объектов (некоторые объекты были объединены в 1 класс). Результаты экспериментов модели SSD, предварительно обученной на наборе данных VOC, и экспериментов модели YOLO, предварительно обученной на наборе данных COCO, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценки по метрике mAP для моделей SSD и YOLO.

Количество классов объектов	SSD, mAP	YOLO, mAP
7	21.60 %	80.55 %
11	31.53 %	81.11 %

Таким образом было показано, что модель SSD дает неудовлетворительную точность по метрике mAP по сравнению с моделью YOLO, демонстрирующую хорошую точность на изображениях, полученных с камеры модели робототехнического устройства. Причем, в ходе исследования было выявлено, что количество распознаваемых классов объектов при использовании модели YOLO не влияет на точность их распознавания.

### Список литературы

1. SSD: Single Shot MultiBox Detector / Liu W. [идр.] // arXiv preprint arXiv: 1512.02325. 2015.
2. Bochkovskiy A., Wang C-Y., Liao H-Y. M., YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection // arXiv preprint arXiv: 2004.10934. 2020.
3. Neural Network Method for Determining the Direction of a Person's Gaze based on a Web Camera Image Analysis / Skorokhodov M. S. [и др.] // Procedia Computer Science, BICA-2022, Guadalajara, Mexico. 2022. Т. 213. С. 203-208.
4. Нейросетевой интерфейс конвертации сложных русскоязычных текстовых команд в формализованный графовый вид для управления робототехническими устройствами / Сбоев А.Г. [и др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2022. – Т.11 № 2. – С. 153-163.
5. Cartucho J., Ventura R., Veloso M. Robust Object Recognition Through Symbiotic Deep Learning in Mobile Robots // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018. С. 2336-2341.

В.Г. СОРОКИН<sup>1</sup>, А.В. ВЯЗЬМИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ: ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ НА ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ

Предложен комплексный подход проверки адекватности и оценки точности методов численного интегрирования нелинейных реакционно-диффузионных уравнений с запаздыванием. Рассматриваются уравнения, содержащие произвольные функции и свободные параметры. Построенные для таких уравнений точные решения позволяют сформулировать широкий спектр тестовых задач. Варьируя параметры задач и сравнивая полученные численные решения с имеющимися точными, можно судить о работоспособности того или иного численного метода. Приведены несколько тестовых примеров проверки метода прямых в комбинации с неявными методами Рунге – Кутты и Гира.

V.G. SOROKIN<sup>1</sup>, A.V. VYAZMIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

## NONLINEAR DIFFUSION EQUATIONS WITH DELAY: TESTING NUMERICAL METHODS ON EXACT SOLUTIONS

A comprehensive approach is proposed for checking the adequacy and estimating the accuracy of methods for the numerical integration of nonlinear reaction-diffusion equations with delay. Equations containing arbitrary functions and free parameters are considered. The exact solutions constructed for such equations make it possible to formulate a wide range of test problems. By varying the parameters of the problems and comparing the obtained numerical solutions with the constructed exact ones, one can judge the performance of one or another numerical method. Several test examples of checking the method of lines in combination with the implicit Runge-Kutta and Gear methods are given.

Реакционно-диффузионные уравнения с запаздыванием применяются при моделировании пространственно неоднородных процессов, когда рассматриваемые величины зависят не только от состояния в данный момент времени, но и от некоторого момента в прошлом. Они имеют вид [1, 2]:

$$u_t = u_{xx} + F(u, w), \quad w = u(x, t - \tau),$$

где  $u = u(x, t)$ ,  $\tau$  – запаздывание,  $a$  – коэффициент диффузии,  $F$  – кинетическая функция (в общем случае нелинейная). Такие уравнения допускают решения типа бегущей волны  $u = u(z)$ ,  $z = kx + \lambda t$  [1, 2]. Более сложные точные решения были получены, например, в [3, 4].

Известные методы численного интегрирования реакционно-диффузионных уравнений без запаздывания после некоторой модификации могут применяться и при решении начально-краевых задач с запаздыванием. Наибольшее распространение имеют метод прямых и конечно-разностные методы [5, 6]. Метод прямых позволяет свести уравнение в частных производных с запаздыванием к системе ОДУ с запаздыванием. Полученную систему можно решить с помощью методов, встроенных в системы компьютерной алгебры Mathematica, Maple, MATLAB, которые не предназначены непосредственно для решения уравнений с запаздыванием в частных производных.

Важно отметить, что дифференциальные уравнения с запаздыванием обладают рядом специфических особенностей [1, 5, 6], связанных с неустойчивостью, негладкостью решений и др., которые не присущи уравнениям без запаздывания и существенно образом осложняют получение адекватных численных решений. Во многих случаях наиболее эффективным и самым наглядным способом оценки области применимости и точности численных методов является прямое сравнение численных и точных решений тестовых задач, сформулированных на основе точных решений в элементарных функциях. В докладе приведены некоторые тестовые задачи, которые содержат ряд свободных параметров, и проводится сопоставление численных и точных решений этих тестовых задач. Численные решения получены методом прямых в комбинации с методами Рунге – Кутты и Гира, встроенными в систему вычислений Mathematica.

### Список литературы

1. Wu J. Theory and applications of partial functional differential equations. New York: Springer, 1996.
2. Wu J., Zou X. Traveling wave fronts of reaction-diffusion systems with delay // J.Dynamics& Differ. Equations. 2001. Vol.13. No.3.P. 651-687.
3. Polyanin A.D., Zhurov A.I. Functional constraints method for constructing exact solutions to delay reaction-diffusion equations and more complex nonlinear equations // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2014. V.19. №3. P.417-430.
4. Polyanin A.D. Generalized traveling-wave solutions of nonlinear reaction-diffusion equations with delay and variable coefficients // Appl. Math. Lett. 2019. V. 90. P.49-53.
5. Полянин А.Д., Сорокин В.Г., Журов А.И. Дифференциальные уравнения с запаздыванием: свойства, методы, решения и модели. М.: Издательство «ИПМех РАН». 2022.
6. Sorokin V.G, Vyazmin A.V. Nonlinear reaction-diffusion equations with delay: partial survey, exact solutions, test problems, and numerical integration// Mathematics. 2022. Vol. 10. 1886.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УШИРЕНИЯ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ЭЛЕКТРОНОВ В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОМ ВЧ-РАЗРЯДЕ

В данной работе мы разработали модель индукционно-связанной плазмы в геометрии с уширением разрядной трубки. Использовалась численная модель, разработанная в пакете COMSOL-multiphysics, с заданными параметрами давления на выходе, мощностью генератора, частотой и расходом газа. Были получены пространственные зависимости концентрации электронов, температуры электронов, давления в камере, скорости газа и проведен анализ эффектов в области уширения.

V.S. ZHELTUKHIN, A.YU. SHEMAKHIN, G.B. KISELEV, T.N. TERENCEV  
Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, Russian Federation

## SIMULATION OF THE EFFECT OF DISCHARGE TUBE BROADENING ON THE ELECTRON DENSITY IN A INDUCTIVELY-COUPLED RF DISCHARGE

In this paper we developed a model of the ICRF plasma flow in a geometry with a broadening area between a plasma torch and a chamber. We used the numerical model developed in the COMSOL-multiphysics software with the given parameters of outlet pressure, drive power, drive frequency and gas flow. We obtained the spatial dependencies of the electron density, electron temperature, pressure in the chamber, gas velocity and performed the analysis of effects in the broadening area.

Данная статья посвящена изучению свойств плазмы, таких как плотность электронов, плотность возбужденных состояний в области уширения при параметрах: давления в 113 Па, мощности генератора 1кВт и расхода газа 0,1 г/с.

В отличие от цитируемых работ мы выбрали для исследования разряд при давлении 113 Па с расходом газа, так как при таком давлении скорость потока играет существенную роль в свойствах разряда. Получаемые характеристики плазмы находятся между разрядами атмосферного и низкого давления. Кроме того, в таком типе разряда можно получить энергии заряженных частиц около 100 эВ и ток плазмы около 15 А/м<sup>2</sup>, в отличие от разрядов при других давлениях[1].

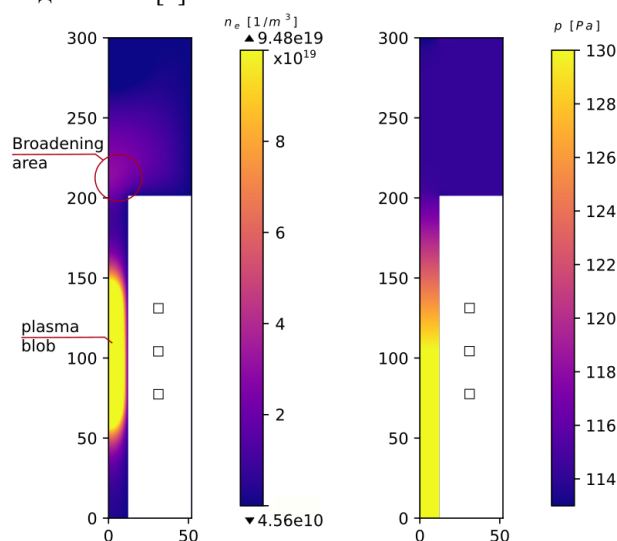


Рис. 1. Пространственные распределения электронной плотности  $n_e$  и давления  $p$ . Цветовая шкала для  $n_e$  сдвинута вниз, чтобы показать распределение в расширяющейся области.

Мы заметили, что эффект увеличения концентрации электронов в области уширения возникает при наличии потока газа. Также распределение давления в камере не влияет на концентрацию электронов в области уширения. Однако скорость газа в этой области значительно снижается, что и приводит к такому эффекту.

### Список литературы

1. Abdullin I.S., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F.// Kazan: Kazan Technol. Univ. Press (2000).

А.В. ТЕТЕРЕВ, И.В. РЕПНИКОВ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

## ЗАВИСИМОСТЬ ТЯГИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Разработана модель расчета гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя, которая позволяет найти зависимость его тяги от пространственного расположения форсунок, подающих в камеру сгорания топливную смесь. Количество топлива при этом может быть задано либо постоянным его расходом, либо определяться на основании поступающего количества кислорода и задаваемого коэффициента горючего. Пространственное расположение точек впрыска топлива может меняться как по радиусу, так и по продольному направлению камеры сгорания, а также по их количеству.

A.V. TETEREV, V.I. REPNIKOV, L.V. RUDAK, N.I. MISUCHENKO

*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

## THE DEPENDENCE OF THE THRUST OF A HYPERSONIC RAMJET ENGINE ON THE FUEL SUPPLY SYSTEM

A calculation model of a hypersonic ramjet engine has been developed, which makes it possible to find the dependence of its thrust on the spatial location of the injectors feeding the fuel mixture into the combustion chamber. The amount of fuel in this case can be set either by its constant consumption, or is based on the incoming amount of oxygen and the specified fuel coefficient. The spatial location of the fuel injection points can vary both in radius and in the longitudinal direction of the combustion chamber, as well as in their number.

Расчет тяги гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя проводится в новой модели либо как осевая составляющая силы, получающейся при интегрировании давления по поверхности сопла двигателя, либо тяга определялась из уравнения количества движения на входе и выходе из двигателя:

$$P = \int_{S_b} (\rho_b v_b^2 + p_b - p_i) ds - \int_{S_a} \rho_a v_a^2 ds,$$

где  $\rho$  – плотность,  $v$  – осевая компонента скорости,  $S$  – поверхность, а индексы  $a, b, i$  – означают, что величины берутся на поверхности входа в воздухозаборник, на поверхности выхода из сопла или в окружающем пространстве соответственно [1]. Сила сопротивления определялась как осевая составляющая силы, получающейся при интегрировании давления по поверхности входной части воздухозаборника и центрального тела. Программная реализация модели позволяет проводить моделирование либо в двумерной постановке в цилиндрической системе координат, либо в трехмерной декартовой системе координат. Горение топлива моделировалось либо в диффузионном приближении [1], когда недостающая компонента выгорала полностью мгновенно, либо в объемном приближении, в этом случае проводился расчет химической кинетики по Аррениусу.

На рис. 1 в верхней его части изображено поле полной плотности, состоящей из воздуха, водорода, который в данном расчете являлся топливом, и продуктов сгорания, представляющих собой смесь водяных паров и углекислого газа. В нижней части рисунка изображена плотность воздуха, кислород которого является окислителем.

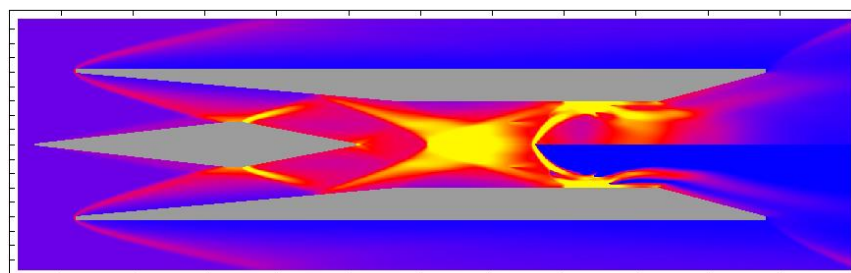


Рис. 1. Поля полной плотности в верхней части рисунка и воздуха в нижней части

Моделирование проводилось для высоты полёта 40 км со скоростью 2500 м/с. На рисунке хорошо видно, что в конце камеры сгорания происходит исчезновение воздуха, поскольку в результате горения водорода образуется азот, который в расчете является самостоятельным компонентом. Подача топлива в данном расчете осуществлялась в четырех точках камеры сгорания, разнесенных как по радиусу, так и по ее длине.

### Список литературы

1. Фомин В. М., Аульченко С. М., Звегинцев В. И., Устинов Л. А. // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 6. С. 35–42.
2. Бартльме Ф. Газодинамика горения. Пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 280 с.

А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Н.И. МИСЮЧЕНКО, Л.В. РУДАК  
*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

## ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ СКОРОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ГОРЕНИЯ

Разработана модель и методика ее расчета по оценке опасности воспламенения паро-водородно-воздушной смеси, основанная на определении максимальной скорости энерговыделения при моделировании химической кинетики горения исследуемой смеси. Проведено сопоставление получаемых по ней результатов с традиционным методом, основанным на диаграмме Шапиро, которое показало не только качественное их совпадение, но и определенные преимущества, связанные с более широким диапазоном изменения оценочной функции.

A.V. TETEREV, I.M. KOZLOV, N.I. MISUCHENKO, L.V. RUDAK  
*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

## ASSESSMENT OF THE IGNITION RISK OF COMBUSTIBLE MIXTURES BASED ON THE RATE OF ENERGY RELEASE IN THE COMBUSTION CALCULATION

A model and a method of its calculation have been developed to assess the ignition hazard of a vapor-hydrogen-air mixture based on determining the maximum energy release rate when modeling the chemical kinetics of combustion of the mixture under study. The results obtained from it were compared with the traditional method based on the Shapiro diagram, which showed not only their qualitative coincidence, but also certain advantages associated with a wider range of changes in the evaluation function.

Для сравнения результатов о степени опасности воспламенения водородосодержащих смесей внутри контейнента АЭС, полученных по разработанной нами новой модели, с подобными результатами, например, по диаграмме Шапиро, была реализована в первом приближении методика заполнения контейнента АЭС водородом и парами воды с заданным распределением температуры и при заданном постоянном давлении. Суть этой методики заключается в следующем. В области контейнента АЭС, который пока представляется в виде параллелепипеда с непроницаемыми стенками и объемом в 70 % от истинного объема, задаются две точки, одна из которых является источником воды, а вторая источником водорода. Поскольку поступление паров гораздо интенсивнее и больше, то полагается, что воздух в этой точке источника имеет минимальную плотность, которая увеличивается в любом направлении от нее по линейному закону. Аналогично по такому же закону концентрация водорода понижается от точки его источника, в которой задается его максимальная плотность. Кроме того, задаются максимальные значения температур паров и водорода, а также значения, до которых они падают на определенном расстоянии. При распределении воздуха сохраняется его исходная масса, а масса поступившего водорода является вводимой величиной. Плотность паров воды рассчитывается, исходя из заданного давления в рассматриваемом пространстве.

Для большей иллюстративности была видоизменена диаграмма Шапиро, которая исходно разбивается на три зоны [1], усовершенствованный вариант с упрощенной геометрией областей пожаробезопасности включает девять зон. На рис. 1 а) изображены прореженные через одну зоны опасности, которые получились по расширенной диаграмме Шапиро и разработанной методике заполнения контейнента водородом, масса которого в данном варианте расчета составляла две тонны. На рис. 1 б) представлены интервально прореженные зоны опасности, полученные по новой модели.

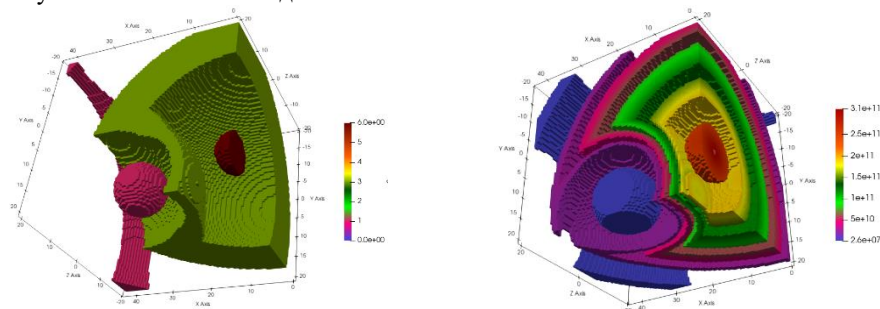


Рис. 1. Оценка опасности воспламенения: а) - по Шапиро, б) - по разработанной модели

Видно, что диапазон максимальных скоростей энерговыделения гораздо шире, чем при диаграммном подходе. Это позволяет значительно информативнее трактовать степень опасности, образующейся при тяжелых авариях водородно-воздушных смесей.

### Список литературы

1. Shapiro Z.M., Moffette T.R., Hydrogen flammability data and application to PWR loss of coolant accident // 1957. WAPD-SC-545.

**О СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ  
ВТОРОГО ПОРЯДКА**

Исследованы аналитические свойства решений нелинейного дифференциального уравнения второго порядка в зависимости от условий, наложенных на содержащуюся в данном уравнении произвольную аналитическую функцию независимой переменной.

V.V. TSEGEL'NIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

**ON A PROPERTIES OF SOLUTIONS OF A NONLINEAR DIFFERENTIAL  
EQUATION OF THE SECOND ORDER**

Analytical properties of solutions of a nonlinear differential equation of the second order are investigated depending on the conditions impede on an arbitrary analytical function of an independent variable contained in this equation.

Целью работы является исследование аналитических свойств решений уравнения

$$2ww'' = w'^2 + 3w^4 + 8l(z)w^3 + 4 \left( (l^2(z) + \varepsilon (l'(z) + p + \frac{q}{2})) w^2 - q^2 \right), \quad (1)$$

в котором  $l(z)$  – произвольная аналитическая функция независимой переменной  $z$ ,  $\varepsilon^2 = 1$ ,  $p = -1 - \alpha\varepsilon - \frac{q}{2}$ ,

$q^2 + 2\beta = 0$ ;  $\alpha, \beta$  – произвольные параметры.

Уравнение (1) эквивалентно системе

$$\begin{aligned} w' &= q + 2\varepsilon l(z)w + \varepsilon w^2 + 2\varepsilon wu, \\ u' &= p - 2\varepsilon l(z)u - \varepsilon u^2 - 2\varepsilon wu. \end{aligned} \quad (2)$$

Если из (2) исключить неизвестную функцию  $w$ , то относительно  $u$  получим уравнение

$$2uu'' = u'^2 + 3u^4 + 8l(z)u^3 + 4 \left( (l^2(z) + \varepsilon (l'(z) + q + \frac{p}{2})) u^2 - p^2 \right). \quad (3)$$

*Теорема 1.*  $w = w(z, p, q, \varepsilon)$  – решение уравнения (2) при фиксированных значениях  $p, q, \varepsilon$ . Тогда функция

$$u = (w' - q - 2\varepsilon l(z)w - \varepsilon w^2)(2\varepsilon w)^{-1} \quad (4)$$

является решением уравнения (3).

*Теорема 2.* Пусть  $u = u(z, p, q, \varepsilon)$  – решение уравнения (3) при фиксированных значениях  $p, q, \varepsilon$ .

Тогда функция

$$w = -(u' - p - 2\varepsilon l(z)u - \varepsilon u^2)(2\varepsilon u)^{-1} \quad (5)$$

является решением уравнения (1).

Легко видеть, что уравнение (3) получается из (2) преобразованиями  $u \rightarrow w$ ,  $\varepsilon \rightarrow -\varepsilon$ ,  $p \rightarrow q$ ,  $q \rightarrow p$ .

Таким образом, соотношения (4), (5) определяют преобразование Беклунда (прямое и обратное) уравнения (1), которое в случае  $l(z) = az + b$  ( $a \neq 0$ ) или  $l(z) = b - const$  является уравнением Пенлеве-типа [1-5].

При значениях  $l(z)$ , отличных от указанных выше, общее решение уравнения (1) не свободно от подвижных критических особых точек.

*Список литературы*

1. Э.Л. Айнс. Обыкновенные дифференциальные уравнения. ОНТИ. Харьков. 1939.
2. Лукашевич Н.А. // Дифференциальные уравнения. 1967. Т. 3, № 5. С. 1-6.
3. В. И. Громак, Н. А. Лукашевич. Аналитические свойства уравнений Пенлеве. Университетское. Минск. 1990.
4. Hone A. N. W., Zullo F. // Random matrices: Theory and Applications. 2018. Vol. 7, № 4. 184 001 (15 pages).
5. Цегельник В. В. // Вестник НИЯУ «МИФИ». 2022. Т. 11, № 2. С. 117-121.



В.А. ШЕИН<sup>2</sup>, Р.Б. РЫБКА<sup>2</sup>, А.Г. СБОЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АГЕНТА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

В работе представлена нейросетевая модель управления движением робототехнической платформы для задачи следования в 2D среде с учетом избегания динамических препятствий. Проведена апробация результатов и выявлены основные недостатки полученной модели.

V.A. SHEIN<sup>2</sup>, R.B. RYBKA<sup>2</sup>, A.G. SBOEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

## NEURAL NETWORK MODEL OF AGENT MOTION CONTROL WITH THE POSSIBILITY OF COLLISION PREVENTION WITH DYNAMIC OBSTACLES

The paper presents a neural network model for controlling the movement of a robotic platform for the task of following in a 2D environment, taking into account the avoidance of dynamic obstacles. The testing of the results was carried out and the main shortcomings of the obtained model were revealed.

Управление робототехнической платформой в динамически изменяющихся условиях среды является сложной и малоизученной задачей. Одним из подходов для решения данной задачи является создание нейросетевых моделей на базе обучения с подкреплением (далее RL модель) для управлением движением агентом, в частности для задачи следования за ведущим, с учетом наличия различных типов препятствий: статических и динамических. Настройка модели осуществляется за счет большого количества числа итераций обучений агента в специальной упрощенной 2D среде, в которой реализованы ведущий и ведомый агенты, базовые алгоритмы движения и построения маршрутов, а также, наличие статистических и динамических препятствий [1].

В данной работе получена RL модель для предотвращения столкновения с динамическими препятствиями на базе лучевого сенсора, полученного в предыдущей работе [2]. Лучевой сенсор формирует безопасный коридор следования и абстрактные лучи из центра ведомого агента, которые определяют расстояние до ближайшей точки либо коридора, либо препятствия. В работе предлагается модифицированный вариант лучевого сенсора с 12 лучами и длиной 3 метра, а также, две дополнительные модификации. Первая модификация состоит из 30 лучей вокруг агента с шагом в 12 градусов и длиной 3 метра, которые определяют расстояние до ближайшего объекта препятствия. Вторая модификация тоже состоит из 30 лучей, но с длиной 4 метров, и определяет расстояние только до динамических препятствий. Дополнительно в качестве входных признаков использовалась информация о скорости и направлении агента следования. В результате, в качестве входных признаков модель получала конкатенированный вектор из 74 значений.

При обучении модели использовался вариант среды с 35 статическими и одним динамическим препятствием с заданным направлением движением по траектории движения вокруг ведущего. Модели обучались в течение 800 итераций. На каждой итерации собиралась выборка из 18000 шагов, что соответствует примерно 40-60 эпизодам. Время обучения модели занимало около 45 часов с учётом использования 4 процессов, запущенных на 4 ядрах процессора Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v2 @ 2.60GHz и с использованием 1 графического процессора Nvidia Tesla K80 (12GB) для обучения.

Качество модели оценивалось на 100 тестовых маршрутах при заданном числе препятствий (35), расположенных случайно. Критерием качества является количество пройденных маршрутов. В результате тестирования RL модель для избегания динамических препятствий продемонстрировала свою эффективность пройдя 80 тестовых маршрутов из 100, что на 18 маршрутов больше, чем результат модели следования с базовой конфигурацией признаков для учета только статических препятствий. Недостатками модели является плохое ориентирование агента в случаях лобового столкновения с динамическим препятствием, а также, тот факт, что для данной модели реализованы входные признаки, которые отслеживают только динамические препятствия, что может затруднить дальнейшую реализацию универсальной модели следования. Данные недостатки планируется устранить в дальнейшей работе.

### Список литературы

1. Selivanov A. et al. // Procedia Computer Science. 2022. Vol. 213. P. 209-216.
2. Грязнов А. и др. // Вестник НИЯУ МИФИ. 2022. Vol. 11. №. 2. P. 143-152.



А.Ю. ШЕМАХИН

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ВЧ-ПЛАЗМЫ Пониженного Давления в условиях Динамического Вакуума

Для исследования параметров ВЧ-плазмы пониженного давления разработана математическая модель, которая включает в себя уравнение Больцмана для несущего газа, уравнения сохранения энергии, неразрывности электронов, ионов и метастабильных атомов, Пуассона, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты электромагнитного поля, введена функция распределения электронов по энергиям, зависящая от напряженности электрического поля. Получены результаты расчетов концентрации заряженных частиц и потенциала электрического поля.

A. YU. SHEMAKHIN

*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

## MATHEMATICAL MODELING OF LOW-PRESSURE RF PLASMA FLOW UNDER DYNAMIC VACUUM CONDITIONS

To study the parameters of a reduced-pressure RF plasma, a mathematical model has been developed that includes the Boltzmann equation for the carrier gas, the energy conservation equations, the continuity of electrons, ions and metastable atoms, Poisson, telegraphic equations for the RF components of the electromagnetic field, and the electron energy distribution function depending on the electric field strength. The results of calculations of the concentration of charged particles and the electric field potential are obtained.

Высокочастотная (ВЧ) плазма пониженного давления (13.3-133 Па) применяется для модификации материалов различной физической природы: сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех и др. [1]. Образованная данным видом разряда плазма, характеризуется следующими параметрами: концентрация электронов  $10^{15}-10^{19} \text{ м}^{-3}$ , степень ионизации  $10^{-5}-10^{-4}$ , электронная температура 1-4 эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке 3000-4000 К, в струе 320-1000 К.

ВЧ-плазма пониженного давления имеет ряд особенностей. Экспериментальные результаты [1] показали, что в плазменной струе велико влияние и индуктивной и емкостной составляющей, потому что плотность электронов в плазменной струе на несколько порядков выше чем в околоструйном пространстве, при этом обнаружены как аксиальная, так и азимутальная компоненты напряженностей магнитного поля и тока в плазме в вакуумной камере. Для исследования параметров ВЧ-плазмы пониженного давления разработана математическая модель, которая включает в себя уравнение Больцмана для несущего газа, уравнения сохранения энергии, неразрывности электронов, ионов и метастабильных атомов, Пуассона, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты электромагнитного поля, введена функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), зависящая от напряженности электрического поля. Для решения системы задач разработан гибридный численный метод, который включает в себя модифицированный метод Г.Бёрда для несущего газа и метод конечных объемов для расчета распределений электронной температуры и концентрации, преобразованных уравнений Максвелла. Для реализации метода разработана программа на языке C++, использующая библиотеки пакета OpenFOAM [2]. Коэффициенты диффузии электронов, частоты соударений, частоты ионизации, электронной теплопроводности рассчитываются по ФРЭЭ и сравниваются с расчетами по пакету BOLSIG+ [3-5].

Расчеты проведены для потока ВЧ-плазмы аргона в предположении максвелловской ФРЭЭ. ВЧ-плазма генерируется в вакуумной камере радиусом входного отверстия 12 мм, радиусом 48 мм и длиной  $L=128$  мм. На входном сечении вакуумной камеры задавались давление 60 Па, температура 450 К, и скорость 10 м/с. Получены результаты расчетов концентрации заряженных частиц и потенциала электрического поля. Расчеты для вакуумной камеры показали, что для мощности разряда 100 Вт потенциал на границе области СПЗ у образца становится равным -1,8 В, а при увеличении мощности до 2,5 кВт - потенциал принимает значение -14,34 В. Концентрация метастабильных частиц приблизительно на половину порядка выше в вакуумной камере в зоне свечения разряда, чем концентрации электронов и ионов. Концентрации электронов и ионов достигают значения  $4 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$  для 100 Вт и возрастают до  $3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  для 2,5 кВт.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

### *Список литературы*

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения. – , 2000. Казань: Изд-во Казан. Ун-та
2. Пакет OpenFOAM. Режим доступа: <https://openfoam.org/>
3. Boeuf J. P. and Pitchford L.C. Two-dimensional model of a capacitively coupled RF discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor. Phys. Rev. E, 1995. – Vol. 51, No.2. 1376–1390.
4. G.J.M. Hagelaar and L.C. Pitchford. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. Plasma Sources Sci. Technol., 2005. – Vol. 14, 722–733.
5. UBC database, Database of scattering cross sections. Режим доступа: [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on November 12, 2019

К.Е. ШИЛЬНИКОВ<sup>1,2</sup>, М.Б. КОЧАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СЕТОК ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОДНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Предлагается подход для повышения точности численного моделирования процессов, описываемых нелинейным уравнением теплопроводности на примере задачи о распространении тепловой волны. Алгоритм основан на конечно-объемной аппроксимации уравнения для производной искомой функции в подвижной системе координат. Локальная скорость системы координат определяется из соотношений типа Ренкина — Гюгонио. Такой выбор системы координат позволяет повысить концентрацию узлов сетки вблизи особенностей решения (разрыв производной решения на фронте волны). Для предотвращения вырождения расчетной сетки используется механизм регуляризации.

K.E. SHILNIKOV, M.B. KOCHANOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

## ON AN APPLICATION OF ADAPTING GRIDS FOR NUMERICAL SOLVING OF ONE INITIAL-BOUNDARY PROBLEM FOR NONLINEAR HEAT EQUATION

An approach to improve the accuracy of numerical simulation of processes described by a nonlinear heat equation is proposed. The problem of heat wave propagation is considered as an example. The algorithm is based on a finite-volume approximation of the equation for the derivative of the unknown function in a moving coordinate system. The local speed of the coordinate system is determined from relations of the Rankine—Hugoniot type. Such a choice of the coordinate system leads to high concentration of grid nodes near the singularities of the solution (a discontinuity in the derivative of the solution at the wave front). To prevent degeneracy of the computational grid, a regularization mechanism is used.

В работе рассматривается следующая задача:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( -k(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad k(u) = u^\alpha, \quad 0 < x < \infty, \quad t > 0, \quad u(x, 0) = u_0(x), \quad u(0, t) = u_1(t).$$

Рассматриваемая задача допускает негладкие решения типа тепловой волны [1]:

$$u(x, t) = (\alpha D)^{\frac{1}{\alpha}} (Dt - x)^{\frac{1}{\alpha}} \eta(Dt - x)$$

для  $u_0(x) = 0$ ,  $u_1(t) = (\alpha D)^{\frac{1}{\alpha}} (Dt)^{\frac{1}{\alpha}}$ . Здесь  $D$  — положительная константа и  $\eta$  — функция Хевисайда.

Традиционные численные алгоритмы для решения задач с подобными особенностями требуют большого числа узлов расчетной сетки для удовлетворительного воспроизведения решения вблизи особенности.

Переход в подвижную систему координат осуществляется посредством замены [2, 3]

$$x = x(q, \tau), \quad t = \tau, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{Q}{\psi} \frac{\partial}{\partial q},$$

где  $\psi = \frac{\partial x}{\partial q}$  и  $Q = -\frac{\partial x}{\partial \tau}$ .

В работе рассматривается конечно-объемная аппроксимация уравнения

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial q} \left( Q \frac{p}{\psi} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q} k \frac{p}{\psi} \right) = 0, \quad p = \frac{\partial u}{\partial q}.$$

Локальная скорость системы координат определяется соотношением

$$Q = k \frac{\partial}{\partial q} \frac{1}{\psi} + \frac{\partial k}{\partial u} \left( \left( \frac{p}{\psi} \right)_- + \left( \frac{p}{\psi} \right)_+ \right),$$

где подстрочные индексы обозначают предельные значения величины слева и справа от разрыва. При численном решении предполагается, что разрыв имеет место в каждом узле расчетной сетки. Таким образом определяется скорость движения узлов. Для предотвращения вырождения расчетной сетки выражение для скорости дополняется регуляризирующим слагаемым.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00093).

### Список литературы

1. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1994 г. - 528 с.
2. Shilnikov K.E., Kochanov M.B. // J. Comput. Appl. Math. 2023. Vol. 421, 114884.
3. Мажукин А.В., Мажукин В.И. // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2007. Том 47, №11. С. 1913–1936.

Э.Э. САМУЭЛЬ ПЬЕР

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА УГЛЕРОДНОЙ ГУБКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ДИФфуЗНОЙ АГРЕГАЦИИ

Рассмотрен процесс формирования губкообразных структур в присутствии электрического поля и при воздействии лазерного излучения. Проведено моделирование процесса роста углеродных губок в условиях диффузной ограниченной агрегации с помощью программы MATLAB.

E. E. SAMUEL PIERRE

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

## MODELISATION OF CARBON SPONGE GROWTH UNDER CONDITIONS DIFFUSION-LIMITED AGGREGATION

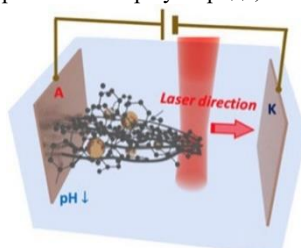
The process of formation of sponge-like structures in the presence of an electric field and under the influence of laser radiation is considered. The simulation of the growth process of carbon sponges under conditions of diffuse limited aggregation using MATLAB program was performed.

Углерод, как химический элемент, обладает аллотропными формами, проявляющими уникальные оптоэлектронные свойства. На сегодняшний день возникает потребность в проведении исследований в направлении разработки надёжных методов синтеза наноразмерных углеродных структур с заданным строением, с целью их применения в областях нанотехнологии и оптоэлектроники.

В данной работе представлена модель роста  $sp$ - $sp^2$  углеродных губок в жидких средах с помощью пакета прикладных программ MATLAB.

Углеродные губки являются макромасштабными углеродными структурами, которые характеризуются перемежающейся  $sp$ - $sp^2$ -гибридизацией. Их формирование было достигнуто совместным воздействием электрического поля и лазерного излучения на раствор, содержащий аморфные частицы шунгита, распределенные в объёме дистиллированной воды (рис. 1).

Рис. 3. Самосборка губкообразных структур на основе  $sp^2$ -углерода, легированного  $sp$ -углеродными связями [1]



Моделирование данной работы регулируется процессами, по принципу диффузионно-ограниченной агрегации[2] и заключается в «запуске» частиц в центральной области правой границы, выполняющей роль катода и их движении к левой (аноду), с изменением вероятности прилипания частиц от 0 до 60% от правого края до центра (рис. 2).

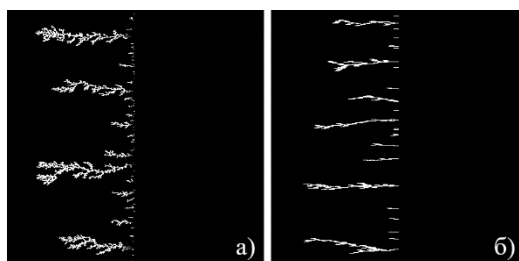


Рис. 4. Визуализация модели роста углеродных макроструктур в среде MATLAB

а) рост углеродной губки с размером двух условных единиц исходного кластера, б) рост углеродной губки с начальным размером восьми условных единиц исходного кластера

Приведённые результаты демонстрируют возможность получения протяжённых структур по мере увеличения длины углеродных молекул. Однако, их неустойчивость в эксперименте приводит к сворачиванию в губки.

### Список литературы

1. Kutrovskaya S. et al. Field-Induced assembly of  $sp$ - $sp^2$  carbon sponges //Nanomaterials. – 2021. – Т. 11. – №. 3. – С. 763
2. Di Rocco E. D. DLA model //Seminar Univerza V Ljubljani. – 2009.

А.С. КОВАЛЁВА<sup>1</sup>, Т.Р. КАЛИМУЛЛИН<sup>1</sup>, Е.В. СТЕПИН<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В УЗКИХ КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Построена математическая модель и произведен расчет стационарных течений плотной горячей плазмы в коаксиальном канале плазменного ускорителя в присутствии продольного магнитного поля. Работа выполнена в квазиодномерном приближении без учета диссипативных эффектов.

A.S. KOVALEVA<sup>1</sup>, T.R. KALIMULLIN, E.V. STEPIN<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## MATHEMATICAL MODELING OF STATIONARY MHD FLOWS IN NARROW CHANNELS OF PLASMA ACCELERATORS

A mathematical model is constructed and the stationary flows of dense hot plasma in the coaxial channel of a plasma accelerator in the presence of a longitudinal magnetic field are calculated. The work was performed in a quasi-one-dimensional approximation without taking into account dissipative effects.

В данной работе рассматриваются стационарные течения плазмы в узких коаксиальных каналах плазменного ускорителя. Плазма рассматривается как сплошная электропроводящая среда без учета диссипативных эффектов, что позволяет использовать приближение магнитной газодинамики [1].

Исходя из симметрии задачи, а также используя квазиодномерное приближение, была получена система первых интегралов – законов сохранения [2].

В качестве результатов приводятся наиболее важные характеристики - значения внутренней энергии плазмы, продольная скорость и азимутальное магнитное поле при различных параметрах продольного магнитного поля.

Результаты вычислений показали, что при включении продольного магнитного поля (увеличении  $H_z S$ ) расход внутренней энергии уменьшается. Вместе с этим возникает и увеличивается скорость вращения потока, вследствие чего ускорительные характеристики канала, соответствующие разности выходной и входной скоростей потока, падают. Расход электромагнитной энергии, соответствующий азимутальному магнитному полю, увеличивается.

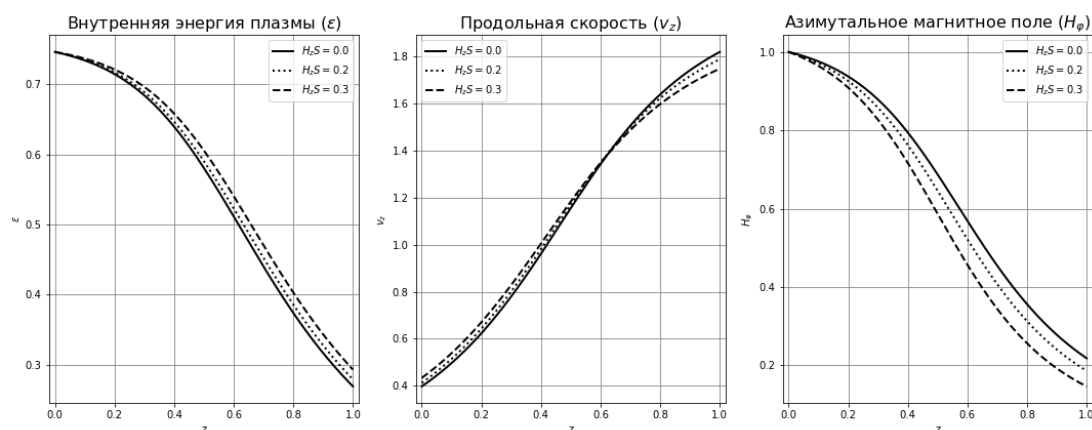


Рис. 1. Поведение основных характеристик плазмы при включении внешнего продольного магнитного поля при значении параметров  $H_z S = 0.0$ ,  $H_z S = 0.2$ ,  $H_z S = 0.3$

Список литературы

1. Брушлинский К.В., Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 200 с.
2. Стёпин Е.В., Численная модель установления стационарных альфвеновских и близких к ним МГД-течений в коаксиальных каналах в присутствии продольного магнитного поля //Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2014. Т. 3, №. 5. С. 517-528

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЛОС СДВИГА В СТАЛИ, АЛЮМИНИИ И ОБЕДНЕННОМ УРАНЕ

Рассмотрены процессы локализации пластической деформации в обедненном уране, высокопрочной стали марки НУ-100 и алюминии. Предложена математическая модель данного процесса. Разработан численный алгоритм, позволяющий проводить моделирование локализационных процессов в материалах при высокоскоростном нагружении в одномерном и двумерном случае. Проведено численное моделирование процессов самоорганизации полос сдвига в материалах. Сопоставлены результаты одномерных и двумерных расчетов. Изучено влияние размерности задачи на важные характеристики процесса локализации.

R.V. MURATOV, P.N. RYABOV, N.A. KUDRYASHOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL SIMULATION OF PLASTIC FLOW LOCALIZATION IN STEEL, ALUMINIUM AND DEPLETED URANIUM

The processes of plastic flow localization in depleted uranium, HY-100 steel, and aluminum are considered. A mathematical model of this process is proposed. A numerical algorithm has been developed. This algorithm allows to simulate localization processes in materials under high-speed loading in one- and two-dimensional cases. Numerical modeling of self-organization processes of shear bands has been carried out. The results in 1D and 2D were compared. The influence of spatial dimension on parameters of problem is studied.

Понимание механизмов разрушения материалов является одной из важных задач современной науки. В этой связи, актуальным становится разработка методик, позволяющих исследовать механизмы разрушения материалов. В данной работе проводится исследование процессов локализации пластических деформации (полосы сдвига) при высокоскоростном нагружении. Данное явление часто встречается при отказе материалов.

В работе [1] представлена математическая модель и численный алгоритм, позволяющий проводить математическое моделирование процессов локализации в металлах. В данной работе внимание уделяется сопоставлению результатов двумерного и одномерного расчетов данного процесса. Показано, что размерность задачи существенно влияет на время начала локализационного процесса (сама зависимость носит линейный характер, см. Рис. 2).

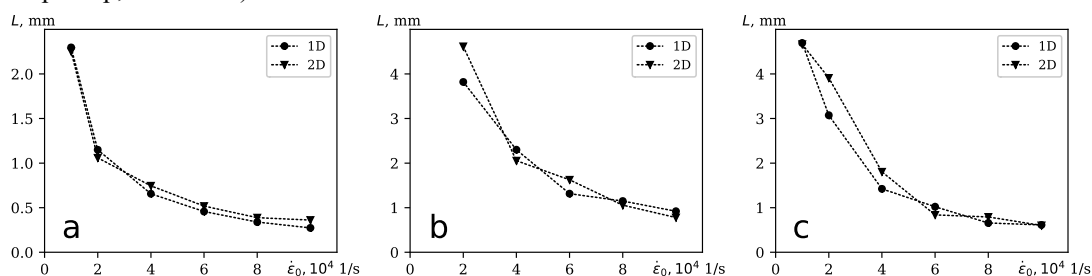


Рис. 1. Зависимость расстояния между зонами локализации от начальной скорости локализации

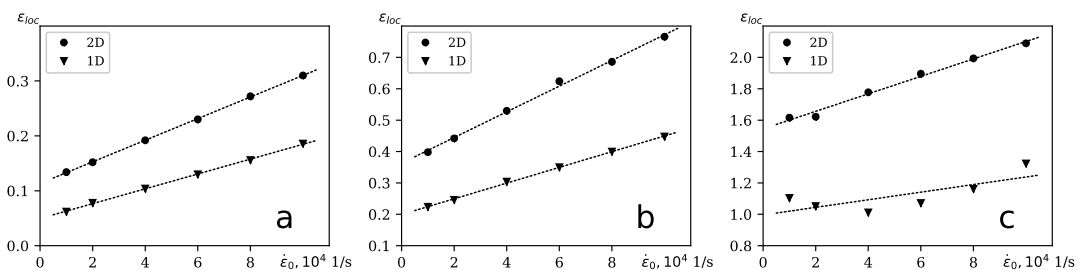


Рис. 2. Зависимость времени начала локализационного процесса от начальной скорости локализации

Показано, что расстояние между зонами локализации убывает в зависимости от начальной скорости деформации и не зависит от пространственной размерности, см. Рис. 1. Проведено статистическое исследование (по алгоритму из [2]) показавшее, что взаимодействие полос сдвига увеличивает расстояние между ними.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00102).

### Список литературы

1. Muratov R.V., Kudryashov N.A., Ryabov P.N. // Commun. Nonl. Sci. Nume. Simulat. 2021. Vol. 101. 105858.
2. Muratov R.V., Kudryashov N.A., Ryabov P.N. // Applied Mathematics and Computation 338 (2018) 164–174.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НЕЙРОСЕТЕВЫМ МЕТОДОМ

Рассмотрен метод решения как обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), так и уравнений в частных производных (УРЧП), который опирается на возможности аппроксимации функций нейронными сетями с прямой связью. Идея метода заключается в использовании нейронной сети с прямой связью в качестве базового элемента аппроксимации, параметры которой (веса и смещения) настраиваются таким образом, чтобы минимизировать соответствующую функцию ошибки. Приведены примеры работы алгоритма для ряда дифференциальных уравнений.

S.A. LADYGIN, R.N. KARACHURIN, P.N. RYABOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL APPROACH FOR STUDYING PROBLEMS FOR DIFFERENTIAL EQUATIONS BASED ON NEURAL NETWORK METHOD

A general method for solving both ordinary differential equations (ODEs) and partial differential equations (PDE) was considered, which relies on the possibility of approximating functions by neural networks with direct communication. The idea is to use a neural network with direct communication as a basic element of approximation, the parameters of which (weights and offsets) are adjusted in such a way as to minimize the corresponding error function.

При описании многих процессов в физике возникает потребность в решении различных задач использующих дифференциальные уравнения. К настоящему времени разработано множество методов численного решения таких уравнений. Мы рассмотрим метод основанный на главном свойстве нейронных сетей с прямой связью - аппроксимация функций. Эта идея была впервые описана Лагариасом и др [1].

Пусть  $G, B$  - дифференциальные операторы,  $u$  - функция нескольких переменных с областью определения  $D$ . Тогда рассмотрим краевую задачу с дифференциальным уравнением  $Gu=0$  в области  $D$  и граничными условиями  $Bu=0$  в области  $\partial D$ . Нейросеть будет приближать решение к истинному в каком-то заданном наборе точек в области  $D$  и на её границе  $\partial D$ . Для этого из области  $D$  и её границы  $\partial D$  выделим дискретные множества точек  $\tilde{D}$  и  $\partial\tilde{D}$ . А также введем функцию  $y$ , которая считается с помощью обучаемой нейронной сети и является аппроксимацией функции  $u$ . Тогда при обучении нейронная сеть должна стремиться к тому, чтобы выполнялись выражения  $Gy=0$  на множестве  $\tilde{D}$  и  $Bu=0$  на множестве  $\partial\tilde{D}$ . Нейронная сеть ищет параметры (такие как веса и смещения) таким образом, чтобы минимизировать функцию  $loss = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ . Здесь  $\sigma_1^2$  представляет собой среднеквадратичную ошибку на внутренних точках, а  $\sigma_2^2$  среднеквадратичную ошибку на границе. Для того, чтобы получить значение функции  $loss$  необходимо уметь искать градиенты от функции  $y$ . Есть несколько подходов позволяющих сделать это, но самый эффективный и универсальный – это автодифференцирование [2]. Пусть нам известны некие «базисные» функции и значения их производных. Тогда для любой сложной функции, которая определяется через эти «базисные» функции, мы можем автоматически вычислить её значение и значение её производных. Для нашего случая функция  $y$ , которая аппроксимирует решение  $u$ , является суперпозицией функций активации, которые и служат теми «базисными» функциями.

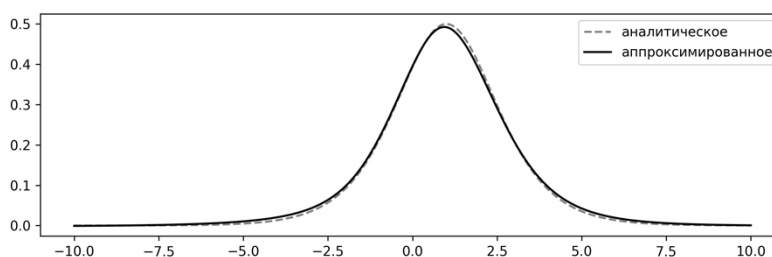


Рис. 1. Сравнение профиля истинного и аппроксимированного решения

На Рис. 1 представлен пример решения данным методом известного дифференциального уравнения Кортевега - де Фриза и сравнение с аналитическим решением [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00102).

### Список литературы

1. I.E. Lagaris, A. Likas, and D.I. Fotiadis. Artificial neural networks for solving ordinary and partial differential equations. IEEE Transactions on Neural Networks, 9(5):987–1000, 1998.
2. Nikhil Ketkar and JojoMoolayil. Automatic differentiation in deep learning. In Deep Learning with Python, pages 133–145. Springer, 2021.
3. Jun Li and Yong Chen. A deep learning method for solving third-order nonlinear evolution equations. CommunicationsinTheoreticalPhysics, 72(11):115003, oct 2020.

**Секция  
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ  
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ**

Руководитель секции - к.ф.-м.н., доцент кафедры №21  
Гаспарян Ю.М.

Секретарь секции - инженер кафедры №21  
Аксенова А.С.

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

E-mail: YMGasparyan@mephi.ru, ASAKsenova@mephi.ru

Е.А. ВИНИЦКИЙ<sup>1,2</sup>, С.А. КРАТ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>

1.Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
2.Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА МЕРНІСТ-1

В работе спроектирована геометрия тороидальной катушки для токамака МЕРНІСТ-1 с учетом вакуумной камеры. По результатам моделирования в пакете моделирования COMSOL были определены значения рассеянных вертикальных и радиальных полей, образованных в результате наклона обмотки. Оценено влияние отклонения полоидального сечения катушки от сечения, рассчитанного из условия компенсации отрывных сил.

Е.А. VINITSKIY<sup>1,2</sup>, S.A. KRAT<sup>1</sup>, A.S. PRISHVITCYN<sup>1</sup>, N.E. EFIMOV<sup>1</sup>

1.National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
2.National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

## DESIGN OF MERNIST-1 TOKAMAK TOROIDAL MAGNETIC FIELD COIL SYSTEM

The geometry of the toroidal coil for the MERNIST-1 tokamak was designed taking into account the vacuum chamber. Based on the results of simulations in the COMSOL simulation package, the values of the scattered vertical and radial fields formed as a result of the inclination of the winding were determined. The influence of the deviation of the poloidal section of the coil from the section calculated from the condition of compensation of separation forces is estimated.

В токамаке МЕРНІСТ-1 принято решение использовать винтовую конфигурацию [1] системы тороидального магнитного поля, которая представляет собой единый неразрывный соленоид, намотанный на тороидальную поверхность. Данная конфигурация уменьшает рассеянные поля от токоподводов, а также гарантирует согласованную работу каждого сегмента катушки и делает возможным использование одной линии электрического питания. Главный недостаток винтовой конфигурации – возникновение рассеянных вертикальных и радиальных полей в результате наклона обмотки соленоида. Данные поля отрицательно влияют на процессы удержания плазмы и являются препятствием для зажигания разряда [2]. В связи с этим основная задача работы – создание такого тороидального соленоида, который бы не создавал рассеянные поля в вакуумной камере установки.

В ходе работы классическое полоидальное сечение, которое обеспечивает максимальную механическую прочность, [3] было скорректировано из-за геометрических особенностей вакуумной камеры МЕРНІСТ-1. В программе COMSOL было оценено влияние данного смещения на силовые нагрузки, оказываемые на катушку. Был определен наклон одного витка соленоида вдоль его длины, который соответствует минимуму рассеянных полей, в приближении бесконечно тонкого тороида. По найденным параметрам винтовой обмотки была спроектирована модель тороидальная катушки для токамака МЕРНІСТ-1 в САПР SOLIDWORKS с учетом особенностей вакуумной камеры (рис.1).

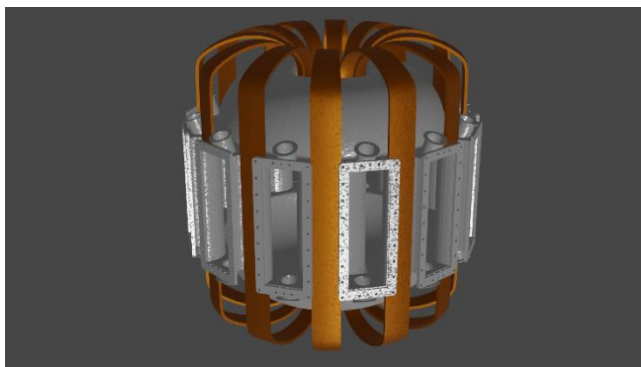


Рис 1. Модель тороидальной катушки для параметров токамака МЕРНІСТ-1 (Коричневая), натянутая на вакуумную камеру установки (серая).

В ходе моделирования в COMSOL, были определены рассеянные поля, создаваемые катушкой, и гофрировка тороидального магнитного поля. Оценено влияние геометрии тороидальной катушки на процессы удержания плазмы и возникновение запертых частиц в установке.

### Список литературы

1. А.Н. Левицкий, О.В. Федоров, С.В. Цаун, К.Г. Шаховец, П.Н Юшманов – Разработка системы тороидального магнитного поля в сферическом токамаке GLOBUS. Препринт ИАЭ-546/7, 1992.
2. Neubauer, O. et al. (1997). Measurement of the vertical magnetic field in textor using the electron beam technique. *Fusion Technology*, 31, 154-158.
3. Shafranov V.D. (1973). Optimum Shape of a Toroidal Solenoid. *Soviet Physics Technical Physics*.



А.А. СТЕПАНЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА МИФИСТ-0**

В работе рассматривается конвективный перенос плазменных филаментов на периферии токамака МИФИСТ-0. Представлена модель динамики пристеночной плазмы установки. Приведены оценки параметров плазмы и магнитного поля, описывающие режим движения филаментов в установке. Показано, что для рабочих параметров токамака транспорт филаментов должен определяться электромагнитными эффектами, связанными с возбуждением в среде альфвеновских волн и их взаимодействием с турбулентностью пристеночной плазмы и обращёнными к плазме элементами вакуумной камеры установки. Это делает токамак МИФИСТ-0 подходящим для исследования механизмов развития как электростатической, так и электромагнитной турбулентности, позволяя расширить научную программу исследований на установке за рамки исследования вопросов взаимодействия плазмы с поверхностью.

A.A. STEPANENKO

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **CONVECTIVE TRANSPORT OF PLASMA FILAMENTS AT THE EDGE OF MEPHIST-0 TOKAMAK**

The paper discusses the convective transport of plasma filaments at the periphery of the MEPHIST-0 tokamak. A model of scrape-off-layer plasma dynamics in the setup is presented. Estimates of the plasma and magnetic field parameters are given, which describe the motion regime of filaments in the facility. It is shown that for the operating parameters of the tokamak, the transport of filaments should be determined by electromagnetic effects associated with the excitation of the Alfvén waves in the medium and their interaction with the turbulence of the SOL plasma and the installation plasma facing components. This makes the MEPHIST-0 tokamak suitable for studying the mechanisms of development of both electrostatic and electromagnetic turbulence, making it possible to expand the scientific research program at the facility beyond the framework of studying the issues of plasma-surface interactions.

Создание и эксплуатация реактора ИТЭР и промышленных термоядерных установок будет зависеть от успешного решения ряда ключевых проблем, в частности управления турбулентным переносом на периферии плазменного шнура [1]. Развитие турбулентности сопровождается, как показывают опыты [2, 3], периодическими выбросами на периферии плазменного шнура филаментов – длинных, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля, «нитей», характеризующихся более высокими значениями плотности и температуры плазмы, по сравнению с окружающей плазмой. Динамика филаментов определяется режимом замыкания токов, возбуждаемых в среде. В достаточно плотной и горячей пристеночной плазме, формирование которой неизбежно при выходе установки на режимы термоядерного горения, важным компонентом, определяющим режим движения частиц, является возбуждение и поглощение альфвеновских волн в результате их взаимодействия с турбулентной плазмой и обращёнными к плазме элементами вакуумной камеры установки [4].

Параметром, позволяющим определить важность влияния электромагнитных эффектов на аномальную динамику пристеночной плазмы, является температура электронов  $T_*$  [5], при которой глубина скин-слоя оказывается меньше характерного поперечного размера филамента. Оценки, выполненные в работе, показывают, что для пристеночной плазмы токамака МИФИСТ-0 [6] величина  $T_*$  находится в диапазоне рабочих параметров установки, делая необходимым учёт возбуждения альфвеновских волн при анализе переноса пристеночной плазмы в установке. Оценки других параметров, таких как параметр  $\beta$  и параметр вмороженности  $K$  [5], также демонстрируют важность учёта электромагнитных эффектов при описании турбулентности в скрэп-слое установки. В соответствии с результатами качественного анализа предложена электромагнитная модель транспорта пристеночной плазмы установки, на основе которой в коде BOUT++ [7] проведены расчёты транспорта изолированных филаментов на периферии токамака. Найдены характерные зависимости скорости движения филаментов от параметров разряда. Продемонстрированы характерные паттерны движения филаментов, согласующиеся с электромагнитной картиной динамики плазмы. Полученные результаты позволяют предложить новое направление исследований на токамаке: изучение механизмов электромагнитного турбулентного транспорта плазмы скрэп-слоя – в дополнение к существующей научной программе, направленной на исследование вопросов взаимодействия плазмы с поверхностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание, проект № 0723-2020-0036).

### *Список литературы*

1. Loarte A. et al. // Nuclear Fusion. 2007. V. 47. №. 6. P. S203.
2. Krasheninnikov S.I., D'Ippolito D.A., Myra J.R. // J. Plasma Physics. 2008. V. 74. №. 5. P. 679-717.
3. D'Ippolito D.A., Myra J.R., Zweben S.J. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. №. 6. P. 060501.
4. Rozhansky V., Kaveeva E., Tendler M. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2015. V. 57. №. 11. P. 115007.
5. Stepanenko A.A. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. №. 9. P. 092301.
6. Кирнева Н. А. и др. // ВАИТ. Серия: Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. №. 3. С. 90-100.
7. Dudson B. D. et al. // Comp. Phys. Comm. 2009. V. 180. №. 9. P. 1467-1480.

А.Б. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>, А.А. ПШЕНОВ<sup>2</sup>, А.А. СТЕПАНЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-15МД

Проведено моделирование переноса плазменных филаментов на периферии токамака Т-15МД в различных режимах работы установки. Получены значения скоростей движения филаментов и связанных с ними аномальных потоков частиц и тепла в зависимости от геометрических параметров филаментов.

A. LYASHENKO, A. PSHE NOV, A. STEPANENKO

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

## IMPACT OF PLASMA FILAMENTS GEOMETRY ON TRANSPORT PROCESSES AT THE EDGE OF T-15MD TOKAMAK

The simulations of the plasma filaments transport at the edge of the T-15MD tokamak in various operating regimes of the facility have been carried out. The velocities of filaments and associated anomalous fluxes of particles and heat are obtained depending on the geometrical parameters of the filaments.

Одной из ключевых проблем, возникающих при анализе и прогнозировании режима работы современных токамаков, является аномальный перенос плазмы на периферии плазменного шнура [1]. Аномальный перенос связан с развитием турбулентных течений, формированием плазменных филаментов – когерентных структур, вытянутых вдоль линий магнитного поля – в области сепаратрисы [2] и их последующим конвективным переносом в область скрэп-слоя. Экспериментальные данные показывают, что филаменты могут быть ответственны за перенос до половины от общего потока тепла и частиц на стенки установки [3]. Динамика плазменных филаментов определяется механизмами замыкания тока в плазме, на которые влияют, среди прочих эффектов, геометрические параметры филаментов [2].

В работе проведено моделирование движения отдельных филаментов в пристеночной плазме в рамках электромагнитного приближения. Расчёты выполнены для параметров установки, подобных прогнозируемым на периферии токамака Т-15МД, который в настоящее время находится в стадии введения в эксплуатацию в НИЦ «Курчатовский институт». Рассмотрены режимы работы установки с различными мощностями, вложенными в разряд, и, соответственно, различными температурой и плотностью пристеночной плазмы. Определены суммарные потоки тепла и частиц, переносимые филаментами при их движении через сепаратрису, а также вычислены скорости движения филаментов в зависимости от их геометрических параметров. Исследовано влияние на динамику филаментов наличие локальных неоднородностей распределения параметров плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект Государственного задания № FSWU-2023-0031.

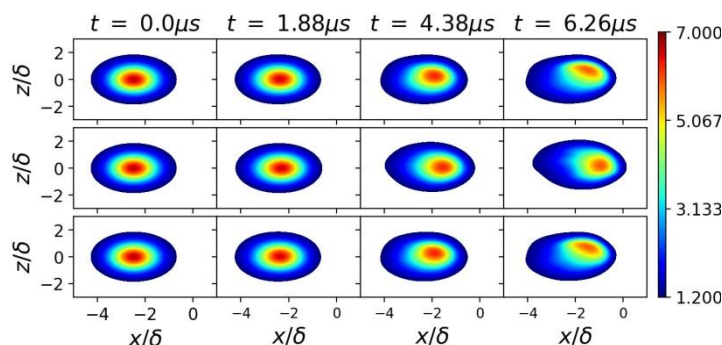


Рис. 1. Динамика филамента с однородной по длине структурой. Мощность разряда 10 МВт, поперечный размер блока  $\delta = 1$  см. Изображено поперечное сечение филамента на концах силовых линий магнитного поля (верхний и нижний ряды изображений) и в центральном разрезе (средний ряд).

### Список литературы

1. Hidalgo C. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. V. 37. №. 11A. P. A53.
2. Krasheninnikov S. I. // Phys. Lett. A. 2001. V. 283. No. 5-6. PP. 368-370.
3. Boedo J.A. et al. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. No. 11. PP. 4826-4833.

И.И. ФАЙРУШИН, А.В. МОКШИН  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

## РАЗВИТИЕ САМОСОГЛАСОВАННОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕОРИИ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ СИЛЬНО НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

В работе получена развитие самосогласованная релаксационная теория коллективной динамики классической сильно неидеальной плазмы. Ключевая характеристика системы – динамический структурный фактор – в рамках данного подхода рассчитывается без подгоночных параметров напрямую с использованием лишь параметров неидеальности, экранировки и соответствующей информации о структуре. Расчеты дисперсионных характеристик, выполненные по полученным аналитическим выражениям, дают результаты, согласующиеся с данными компьютерного моделирования методом молекулярной динамики.

I.I. FAIRUSHIN, A.V. MOKSHIN  
*Kazan (Volga region) federal university, Kazan, Russia*

## DEVELOPMENT OF A SELF-CONSISTENT RELAXATION THEORY OF THE COLLECTIVE DYNAMICS IN STRONGLY COUPLED PLASMA

Self-consistent relaxation theory of the collective dynamics of classical strongly nonideal plasmas has been developed in this work. The key characteristic – dynamic structure factor – is calculated within this approach without fitting parameters directly, using only the parameters of non-ideality, screening, and appropriate information about the structure. The calculations of dispersion characteristics carried out using the obtained analytical expressions give results which agree with the computer simulation obtained data using the molecular dynamics method.

Сильно неидеальная плазма обнаруживается в различных физических ситуациях (оболочки нейтронных звезд, недра белых карликов, пылевая плазма, ультрахолодная плазма и т.д.), также она представляет интерес с точки зрения фундаментальных вопросов физики жидкого состояния вещества [1, 2]. В зависимости от физических условий взаимодействие частиц (зарядов) сильно неидеальной плазмы может описываться либо потенциалом Юкавы, либо Кулона. Во втором случае необходимо также учитывать наличие однородного фона противоположного заряда. Ключевыми параметрами сильно неидеальной плазмы являются параметры неидеальности и экранировки. Данные характеристики определяют термодинамическое состояние системы. Такие важные физические свойства неидеальной плазмы, как скорость распространения звука, теплоемкость, тепло- и массоперенос определяются коллективной динамикой составляющих ее частиц. Основной величиной, которая характеризует коллективные свойства многочастичных систем, является динамический структурный фактор  $S(k, \omega)$ . В данной работе с использованием самосогласованной релаксационной теории построена модель  $S(k, \omega)$  для сильно неидеальной плазмы с юкавовским и кулоновским потенциалом межзонного взаимодействия. Наряду с моделью, которая основывается на теории моментов [3], предложенный подход позволяет напрямую, зная лишь параметры неидеальности и экранировки, рассчитывать коллективные свойства неидеальной плазмы без привлечения дополнительных подгоночных величин. Результаты расчетов спектров динамического структурного фактора и дисперсионных характеристик в рамках предложенного формализма согласуются с данными моделирования методом молекулярной динамики и воспроизводят все основные особенности, присущие сильно неидеальной плазме.

Авторы выражают признательность Фонду развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (проект № 20-1-2-38-1).

### *Список литературы*

1. Mokshin A.V., Fairushin I.I., Tkachenko I.M. // Phys. Rev. E 2022. Vol. 105, 025204.
2. Fairushin I.I., Mokshin A.V. // Fluids 2023 Vol. 8, 72.
3. Arkhipov Yu.V., Askaruly A., Davletov A. E., Dubovtsev D. Yu., Donko Z., Hartmann P., Korolov I., Conde L. and Tkachenko I. M. // Phys. Rev. Lett. 2017 Vol. 119, 045001.

С.Ю. ГУСЬКОВ<sup>1</sup>, Р.А. ЯХИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский пр., 53, 119991

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЧНО ГОМОГЕНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА

Предложено уравнение состояния плазмы малоплотного пористого вещества в виде уравнения состояния сплошной среды, содержащее в качестве регулирующего параметра давления степень гомогенизации плазмы, которая является функцией параметров первоначальной структуры пористого вещества, а также текущих значений плотности и температуры плазмы. Обсуждаются особенности полученных результатов по сравнению со случаем сплошного вещества эквивалентного химического состава. Предложенное уравнение состояния использовано для анализа данных экспериментов по нагреву пористого вещества импульсами лазерного и рентгеновского излучения.

S.Yu. GUS'KOV<sup>1</sup>, R.A. YAKHIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, E-mail:yakhin.rafael@gmail.com

## THE EQUATION OF STATE OF A PARTLY HOMOGENIZED PLASMA OF LOW-DENSE POROUS MATTER

The equation of state (EOS) of a low-density porous substance plasma is proposed in the form of continuous media EOS containing, as a pressure control parameter, the degree of plasma homogenization, which is function of the initial porous structure, as well as of the current values of plasma density and temperature. The features of the obtained results are discussed in comparison with the case of a continuous substance of equivalent chemical composition. The proposed equation of state is used to analyze the experimental data on porous substance heating with laser and X-ray pulses.

Предложено уравнение состояния плазмы пористого вещества в виде УРС сплошной среды, содержащего в качестве регулирующего параметра давления степень гомогенизации плазмы, которая является функцией параметров первоначальной структуры пористого вещества, а также текущих значений плотности и температуры среды. Получено аналитическое решение задачи о тепловом разлёте слоя пористого вещества с УРС частично-гомогенизированной плазмы, которое находится в хорошем количественном согласии с результатами численных расчётов. Показано, что степень влияния УРС частично-гомогенизованного вещества на термодинамические и гидродинамические характеристики плазмы пористого вещества определяется безразмерным параметром, который представляет собой отношение времени гомогенизации к характерному времени распространения волны разгрузки в эквивалентном сплошном веществе. Установлена зависимость от этого параметра степени увеличения длительности сохранения квазиоднородного состояния нагретого слоя пористого вещества по сравнению со случаем сплошного вещества за счёт пониженного давления в период протекания процесса гомогенизации. Результаты применения уравнения состояния частично-гомогенизированной плазмы согласуются с данными экспериментов по замедлению распространения ударной волны в пористом веществе по сравнению со случаем сплошного вещества при лазерном нагреве и данными экспериментов по сохранению квазиоднородного состояния плазмы пористого вещества при нагреве рентгеновским импульсом.

Расчёт степени гомогенизации выполнен в данной работе в приближении столкновения плоских потоков вещества внутри пор. Применение этого приближения оправдано для рассматриваемых веществ с высокой пористостью, превышающей значения порядка 0.99, при котором разлетающиеся частицы стенок пор пролетают внутри пор расстояния, в 5-10 раз превышающие начальную толщину стенок. При уменьшении пористости скорость гомогенизации становится чувствительной к геометрии начальной структуры пористого вещества, корректный учёт которой, по-видимому, может быть выполнен только с применением численного моделирования.

А.В. КОЗЫРЕВ, М.Ю. ДОКУКИН

МГТУ имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

## ИОННО-ЗВУКОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ СТРАТЫ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Проведены измерения характеристик стратифицированной водородной плазмы в разряде промежуточного давления на токах 200 – 300 мА. Анализ полученных данных указывает на то, что плазменное образование имеет структуру неустойчивого слоя в виде головы страты с развитой ионно-звуковой турбулентностью и устойчивого диффузионного хвоста.

A.V. KOZYREV, M.YU. DOKUKIN

BMSTU (National Research University) (Bauman Moscow State Technical University), Moscow, Russia

## ION-SOUND TURBULENCE IN THE HEAD PART OF THE HYDROGEN PLASMA STRATUM

Measurements of the characteristics of stratified hydrogen plasma in an intermediate pressure discharge at currents of 200-300 mA have been carried out. Analysis of the data obtained indicates that the plasma formation has the structure of an unstable layer in the form of a stratum head with developed ion-sound turbulence and a stable diffusion tail.

Исследованный водородный несамостоятельный дуговой разряд с подогревным катодом относят к промежуточным [1], так как здесь параметр подобия по давлению ( $p_0 r_0 \sim 15$  торр·см) имеет промежуточное значение между так называемыми стратами повышенного и низкого давления. Такие разряды имеют свои особенности: в этой области разрядных параметров приведенное электрическое поле  $E/N$  недостаточно велико по сравнению со стратами низкого давления и в балансе энергии электронов присутствуют не только потери энергии в ходе неупругих столкновений с атомами [2], но и, по видимому, энергетические потери при взаимодействии с турбулентными волнами.

В этих условиях ионизационные волны (перемещающиеся страты) могут быть приближенно описаны с позиций гидродинамического подхода. При этом, если в плазме реализован режим ионно-звуковой турбулентности, то это приводит к аномальному сопротивлению. С точки зрения статистической физики, функция распределения электронов (ФРЭ) в голове страты имеет более быстро спадающие «хвосты» или, иначе говоря, - «бунчируется» [1]. Наблюдаемые эффекты могут быть описаны в рамках физической модели двух частичных стохастических взаимодействий токовых электронов с ионно-звуковыми шумами (на языке квазичастиц – ионно-звуковыми плазмонами).

Изучение возникающей турбулентности в разряде проводилось с помощью высокочастотных электрических зондов резонансным методом [3]. На зонды подавался высокочастотный токовый сигнал (волна накачки) и с помощью анализатора спектра С4 – 25 регистрировался отклик в виде спектра напряжения на измерительном сопротивлении. В случае, если зонды находились в «хвосте» страты, на всех частотах внешнего возбуждающего поля наблюдался ровный колоколообразный спектр. Когда же зонды оказывались в области головы страты при узкой полосе пропускания  $\Delta\omega = 0,3$  МГц на частотах 9 – 60 МГц, характерных для ионно-звуковых волн, спектр подвергался стохастическим пульсациям.

Появление этих пульсаций в регистрируемом спектре можно связать с возникновением неустойчивостей в плазменном образовании. В связи с этим в данной работе для проверки условий появления ионно-звуковой и Бунемановской неустойчивостей использовался критерий Пенроуза [4]. А именно: Бунемановская неустойчивость (БН) наблюдается, когда скорость дрейфа электронов  $u_0$  подчиняется условию  $u_0 > 1,3\sqrt{\kappa T_e/m_e}$  (здесь и далее  $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана), а ионно-звуковая неустойчивость (ИЗН), которой также присуще неравенство ионной и электронной температур  $T_i \ll T_e$ , проявляется, когда выполняется следующее условие  $u_0 > \sqrt{\kappa T_i/m_i}$ .

В работе были получены значения основных параметров изучаемой стратифицированной плазмы (температура  $T_e$ , концентрация  $n_e$  и средняя энергия дрейфа  $E_0$  электронов). По этим данным была проведена оценка средней направленной скорости (скорости дрейфа) электронов относительно зондов, и было установлено, что на токах, превышающих 200 мА, условие для БН нигде не выполняется, а условие на ИЗН выполнено только в узком слое головы страты. Следовательно, в головной части страты существует ионно-звуковая турбулентность, а хвостовая часть страты остается достаточно диффузной и спокойной.

В ходе экспериментов было выяснено, что температура ионов выровнена по всей длине разрядной трубки из-за амбиполярной диффузии и остывания на стенках, а электроны претерпевают сильный турбулентный нагрев в головных частях страт. Таким образом, можно заключить, что в любой точке страты ионная температура близка к электронной температуре в стратовом хвосте.

### Список литературы

1. Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. // ЖТФ. 2014. Т. 84, № 12. С. 50–62.
2. Цендин Л.Д. // УФН. 2010. Т. 180, № 2. С. 139–164.
3. Голанд В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. Основы физики плазмы. М: Атомиздат, 1977. 385 с.
4. Ишимару С. Основные принципы физики плазмы. М: Атомиздат, 1975. 288 с.

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПОДХОД И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В АНИЗОТРОПНОЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

Развит спектральный подход в квазилинейной теории ТМ-вейбелевской неустойчивости в бесстолкновительной плазме. Получена замкнутая система уравнений для 1- и 2-мерной эволюции взаимодействующих пространственных гармоник функции распределения частиц и электромагнитного поля в случае, когда ось анизотропии плазмы, волновые векторы и соответствующие магнитные поля гармоник перпендикулярны друг другу. На основе численного решения этой системы уравнений исследованы основные свойства развивающейся квазимагнитостатической турбулентности и проведено их сравнение с результатами аналогичных расчетов в рамках приближенной аналитической квазилинейной теории.

A.A. KUZNETSOV, M.A. GARASEV, A.A. NECHAEV, VI.V. KOCHAROVSKY  
Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

## SPECTRAL APPROACH AND NUMERICAL SIMULATION OF THE WEIBEL INSTABILITY IN ANISOTROPIC COLLISIONLESS PLASMA

A spectral approach in the quasilinear theory of TM-Weibel instability in a collisionless plasma is developed. A closed system of equations for the 1- and 2-dimensional evolution of the interacting spatial harmonics of a particle distribution function and an electromagnetic field is obtained. There is considered the case when the plasma anisotropy axis, wave vectors and the corresponding magnetic fields of the harmonics are perpendicular to each other. Based on the numerical solution to this system of equations, the main properties of growing quasi-magnetostatic turbulence are investigated and compared with the results of similar modeling based on the approximate analytical quasilinear theory.

Для космической и лазерной плазмы, наблюдаемой, например, в солнечном ветре и лабораториях, свойственны анизотропные распределения частиц, подверженные вейбелевской неустойчивости и приводящие к филаментации токов и образованию согласованных с ними случайных квазимагнитостатических полей. В настоящей работе анализируются свойства такого рода ТМ-турбулентности на нелинейной стадии вейбелевской неустойчивости в одноосно анизотропной бесстолкновительной плазме в 1- и 2-мерном приближении, когда ось анизотропии плазмы, волновые векторы и соответствующие магнитные поля пространственных гармоник взаимно перпендикулярны.

С этой целью из уравнений Максвелла-Власова в квазилинейном приближении получена и численно решена система уравнения для большого числа гармоник электромагнитного поля и функции распределения электронов (ионы остаются неподвижными) [1], начальный вид которой для определенности взят бимаксвелловским. На рис. 1 приведен пример расчета ряда параметров квазимагнитостатической турбулентности, включая эволюцию параметра анизотропии плазмы  $A(t)$ , определяемого отношением продольной и поперечной (к оси анизотропии) температур за вычетом единицы. Показано, что для изучения вейбелевской турбулентности при небольших величинах параметра анизотропии развитый подход является гораздо более эффективным, чем обычно использующийся подход на основе метода крупных частиц (particles-in-cells), искажающий результат численными шумами при  $A \ll 1$ .

Выполнен качественный анализ полученных результатов и проведено их сравнение с результатами, найденными на основе известной 1-мерной аналитической квазилинейной теории [2] в области её применимости  $A \ll 1$ .

Изучены особенности нелинейной эволюции вейбелевских гармоник, установлены свойства и эволюция их спектра мощности, найдена зависимость уровня насыщения турбулентного магнитного поля от параметра анизотропии исходной функции распределения электронов. Даны также аналитические оценки указанных величин.

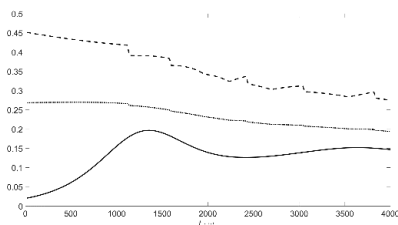


Рис. 1. Эволюция удвадцатерённого среднеквадратичного магнитного поля (сплошная), характерного волнового числа (пунктир) и удесятеренной дисперсии волновых чисел (штрихи) ТМ-вейбелевской турбулентности при анизотропии  $A=0.25$ .

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-12-00416. Для численных расчетов использованы суперкомпьютерные ресурсы ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

### Список литературы

1. Kuznetsov A.A., Kocharovsky V.V., Kocharovsky VI.V. et al. // Plasma Physics Reports. 2022. Vol. 48, № 9. P. 973-982.
2. Pokhotelov O.A., Amariutei O.A. // Ann. Geophys. 2011. Vol. 29, № 11. P. 1997-2001.

Т.А. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>, С.А. ШУЛЯПОВ<sup>2</sup>, Д.А. ГОРЛОВА<sup>2</sup>, А.В. ЛАЗАРЕВ<sup>2</sup>, К.А. ИВАНОВ<sup>2,3</sup>,  
М.С. ДЖИДЖОЕВ<sup>2</sup>, А.Б. САВЕЛЬЕВ<sup>2,3</sup> и В.М. ГОРДИЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## **ЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ( $I \approx 3 \times 10^{19}$ Вт/см<sup>2</sup>) ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО СМЕШАННЫМИ K<sub>r</sub>X<sub>e</sub> КЛАСТЕРАМИ**

Мы демонстрируем новый подход к генерации пучков высокоэнергетических электронов и рентгеновских квантов в режиме воздействия на смешанные K<sub>r</sub>X<sub>e</sub> кластеры релятивистскими лазерными импульсами излучения фемтосекундного Ti:Sa лазера ( $E = 60$  мДж,  $\Delta t = 50$  фс,  $I \approx 3 \times 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>). Малая 9% добавка Xe к Kr позволила на 60% увеличить заряд пучка ускоренных (0.4 – 4 МэВ) электронов и достичь величины 3.5 пКл/имп, а также значительно увеличить температуру рентгеновского свечения плазмы.

T.A. SEMENOV<sup>1</sup>, S.A. SHULYAPOV<sup>2</sup>, D.A. GORLOVA<sup>2</sup>, A.V. LAZAREV<sup>2</sup>, K.A. IVANOV<sup>2,3</sup>,  
M.S. DZHIDZHOEV<sup>1</sup>, A.B. SAVEL'EV<sup>2,3</sup>, V.M. GORDIENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Photon Technologies of FSRC 'Crystallography and Photonics', RAS, Troitsk, Russia

<sup>2</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

## **EFFECTIVE PRODUCTION HIGH ENERGY ELECTRONS AND X-RAY UNDER INTERACTION RELATIVISTIC ( $I \approx 3 \times 10^{19}$ W/cm<sup>2</sup>) LASER PULSES WITH MIXED K<sub>r</sub>X<sub>e</sub> CLUSTERS**

We demonstrate a new approach to the generation of high-energy electron beams and X-ray under irradiation of mixed K<sub>r</sub>X<sub>e</sub> clusters by relativistic laser pulses from a femtosecond Ti:Sa laser ( $E = 60$  mJ,  $\Delta t = 50$  fs,  $I \approx 3 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>). A small addition 9% of Xe to Kr made it possible to increase the charge of the accelerated (0.4 – 4 MeV) electron beams by 60% and reach a value of 3.5 pC/pulse, as well as to significantly increase the temperature of the X-ray emission of the plasma.

Воздействие на конденсированные среды лазерным излучением релятивистской интенсивности  $I > 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> обеспечивает создание плотной горячей плазмы, являющейся источником жесткого рентгеновского излучения, высокоэнергетических ионов и электронов. Для лазерно-плазменного возбуждения инертных атомов, например, Kr и Xe используют технику сверхзвукового расширения газа в сопле, позволяющую обеспечить формирование наночастиц в струе в результате конденсации. Интерес к созданию горячей кластерной наноплазмы Kr обусловлен возможностью лазерно-плазменного возбуждения ядерного изомера Kr83 [1]. При этом нагрев Kr кластеров можно усилить с помощью добавки Xe, которая позволяет увеличить плотность создаваемой плазмы. В настоящей работе исследуется генерация МэВ-ых электронов и жестких рентгеновских квантов в результате сильного возбуждения смешанных K<sub>r</sub>X<sub>e</sub> кластеров релятивистскими лазерными импульсами.

Кластеры формировались методом сверхзвукового расширения газа высокого давления в вакуум в коническом сопле (угол раствора 10°, критическое сечение 0.5 мм, длина 10 мм). Для создания кластеров использовался чистый Kr и смесь Kr+Xe (91:9) при начальных сверхкритических условиях ( $P = 90$  бар,  $T = 298$  К). Воздействие на кластеры осуществлялось Ti:Sa лазерной системой (энергия, длительность и частота следования импульсов 60 мДж, 50 фс и 10 Гц, соответственно) с интенсивностью  $I \approx 3 \times 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>. Лазерный фокус находился в области максимальной плотности наночастиц на передней границе струи. Измерение пучков ускоренных электронов с энергиями более 400 кэВ проводилось на сцинтилляторе LANEX. Заряд электронного пучка фиксировался с помощью цилиндра Фарадея, при этом набор фильтров позволял проводить грубые спектральные измерения. Для исключения влияния атмосферы и поглощения в сопутствующих препятствиях на пути электронного пучка все диагностические приборы размещались в вакуумной камере диаметром 1 м. Регистрация рентгеновского спектра наноплазмы проводилось с помощью полупроводникового детектора с прямой регистрацией рентгеновского излучения на чипе CdTe (10 - 200 кэВ).

Проведено сравнительное исследование лазерной генерации ускоренных электронов и рентгеновских квантов в кластерах Kr и K<sub>r</sub>X<sub>e</sub>. Установлено, что малая добавка Xe позволила на 60% увеличить заряд пучка ускоренных электронов и достичь интегральной величины 3.5 пКл/имп. Энергетические спектры ускоренных электронов лежат в диапазоне 0.4 – 4 МэВ, имеют экспоненциальный вид (рис. 1) с температурой  $T_e \approx 600$  кэВ. При этом в струе смешанных кластеров электронные пучки имели лучшую расходимость в  $380 \pm 70$  мрад. Также выявлено увеличение температуры рентгеновского свечения наноплазмы с  $35 \pm 0.5$  кэВ для Kr до  $53 \pm 1$  кэВ для K<sub>r</sub>X<sub>e</sub> (рис. 2) в диапазоне 30 – 200 кэВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта №20-21-00030. Разработка методов формирования струй наночастиц проводилась в рамках Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН Министерства науки и высшего образования РФ.

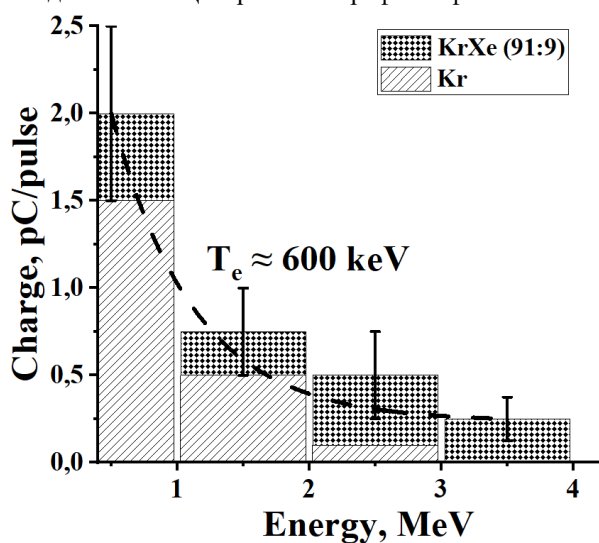


Рис. 1. Спектр ускоренных электронов в кластерах Kr и KrXe.

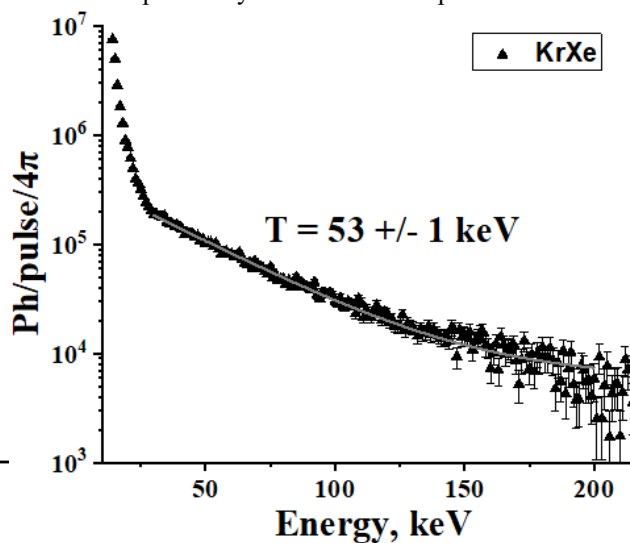


Рис. 2. Спектр рентгеновского свечения кластерной наноплазмы KrXe.

Список литературы

1. Недорезов В.Г., Рыкованов С.Г., Савельев А.Б. // УФН. 2021. Том 191, С. 1281–1306.



## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В СТРУЕ АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ VERA С ПОМОЩЬЮ ТРОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА

Измерены параметры плазмы в струе импульсного абляционного плазменного двигателя VERA с помощью тройного электрического зонда. Получены зависимости температуры электронов и концентрации плазмы в струе АИПД от времени. Получены пространственные распределения измеряемых параметров вдоль оси двигателя.

I.I. PASHKOV, I.D. EGOROV, JU.S. KOROLYOVA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MEASUREMENT OF PLASMA PARAMETERS IN THE JET OF VERA PULSED PLASMA THRUSTER WITH TRIPLE ELECTRIC PROBE

Plasma parameters in the jet of VERA pulsed plasma thruster are measured with triple electrical probe. Time dependences of electron temperature and plasma concentration in PPT jet are obtained. Spatial distribution of measured parameters along the thruster axis are obtained.

Абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД) являются перспективным видом электроракетных двигателей для малых космических аппаратов. Преимуществами АИПД являются простота конструкции, дешевизна, по сравнению со стационарными плазменными или электростатическими электроракетными двигателями. Также значительным преимуществом АИПД является отсутствие необходимости хранения и подачи рабочего тела, так как твердое рабочее тело уже является частью конструкции двигателя.

Актуальной проблемой при разработке и совершенствовании данного типа двигателя является отсутствие достоверных математических моделей процессов абляции твердого рабочего тела и последующего разгона образующейся плазмы. В плазменном двигателе VERA используется внешняя магнитная система, ранее не применявшаяся в подобных АИПД, таким образом разработанные ранее математические модели оказываются не актуальными в его случае. В свою очередь, для построения новых достоверных математических моделей требуется получить информацию по крайней мере о самых базовых параметрах плазмы. В данном исследовании предпринята попытка измерения электронной температуры и концентрации заряженных частиц в потоке плазмы АИПД VERA.

Характерной длительность разряда АИПД VERA – 90 мкс, что делает невозможным применение классического зонда Ленгмюра. Также плазма струи АИПД не имеет явной электрической связи с вакуумной камерой, в следствие чего она не может являться опорным электродом. Данные проблемы могут быть решены использованием тройного электрического зонда. При этом температура электронов и концентрация плазмы определяется по мгновенным значениям измеряемых напряжений, что делает возможным исследование эволюции измеряемых параметров в течение разряда [1].

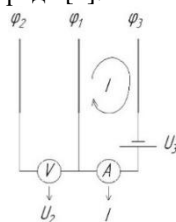


Рис. 1. Схема включения тройного электрического зонда.

В ходе эксперимента электрический зонд помещался на оси АИПД на различном расстоянии от него. В качестве источника питания зонда использовалась батарея конденсаторов большой емкости, такой, что напряжение на ней за выстрел двигателя падало незначительно. Напряжение  $U_3$  в эксперименте составляло 8,85 В. Ток  $I$  в контуре зонда регистрировался с помощью измерительного резистора сопротивлением  $R = 1$  Ом. Площадь собирающей поверхности каждого электрода зонда в эксперименте составила  $S = 11,38$  мм<sup>2</sup>. Осциллограммы напряжений снимались для 12 выстрелов двигателя и усреднялись. Затем по измеренным напряжениям параметры плазмы пересчитывались для каждого момента времени.

При расстоянии между зондом и АИПД  $l = 10$  см измеренная плотность плазмы составила  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Измеренная температура электронов достигала 2 эВ в начале разряда, а затем резко спадала. При этом плотность плазмы оставалась выше  $1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> в течение всего разряда.

### Список литературы

1. S. L. Chen and T. Sekiguchi, "Instantaneous direct-display system of plasma parameters by means of triple probe," *J Appl Phys*, vol. 36, no. 8, pp. 2363–2375, 1965, doi: 10.1063/1.1714492.

А.В. ДЕДУРА<sup>1</sup>, Д.С. ЛЕОНТЬЕВ<sup>1</sup>, В.С. ЛИСИЦА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ $H\alpha$ В ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ MSE

В рамках разработки MSE диагностики на основе динамического Штарк-эффекта был получен спектр линии  $H\alpha$  в параболическом базисе атомных состояний. Рассчитаны отношения интенсивностей различных штарковских компонент спектра. Проведено сравнение с динамическим и статистическим пределами этих отношений, а также с результатами других расчетов. Продемонстрирован плавный переход отношения интенсивностей от динамического предела в случае малых плотностей к статистическому в случае больших плотностей.

A.V. DEMURA<sup>1</sup>, D.S. LEONTYEV<sup>1</sup>, V.S. LISITSA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## THE STATISTICAL AND DYNAMICAL INTENSITIES $H\alpha$ IN MSE DIAGNOSTIC OF PLASMA

As part of the development of MSE diagnostics based on the dynamic Stark effect, the spectrum of the  $H\alpha$  line was obtained in the parabolic basis of atomic states. The ratios of the intensities of various Stark components of the spectrum are calculated. A comparison is made with the dynamic and statistical limits of these ratios, as well as with the results of other calculations. A smooth transition of the intensity ratio from the dynamic limit in the case of low densities to the statistical limit in the case of high densities is demonstrated.

Диагностика MSE (Motional Stark Effect) основана на исследовании спектра пучка нейтрального водорода при его пролете через плазму, когда в его системе координат возникает электрическое поле  $E$ . Это приводит к расщеплению энергетических уровней в атоме с образованием поляризованного штарковского спектра. Такой спектр состоит из  $\pi$ -компонент с вектором поляризации, параллельным  $E$  и  $\sigma$ -компонент, с вектором поляризации, лежащим в плоскости, перпендикулярной  $E$  [1-2]. В данной работе были рассчитаны сечения возбуждения и отношения интенсивностей различных компонент спектра линии  $H\alpha$  в отличие от [2] в параболическом базисе для различных параметров плазмы и энергии водородного пучка. Абсолютная интенсивность штарковской компоненты линии  $H\alpha$   $I_{calc} = A_{3j-2i} \cdot \hbar\omega_{3j-2i} \cdot N_{3j}/g_{3j}$  (1), где  $A_{3j-2i}$  – вероятность радиационного распада с уровня  $3j$  на уровень  $2i$ ,  $\hbar\omega_{3j-2i}$  – энергия между уровнями,  $N_{3j}$  – населённость состояния  $3j$ ,  $g_{3j}$ -его статистический вес [3]. Для расчета интенсивностей компонент линии необходимо решать систему кинетических уравнений для населенностей штарковских подуровней верхнего уровня  $3j$  с учетом его связи с другими уровнями. В статистическом пределе считается, что заселение уровней происходит пропорционально их статистическому весу так, что  $I_{st} \sim A_{3j-2i} \cdot \hbar\omega_{3j-2i}$  (2). В динамическом пределе населенности уровней определяются соотношением между возбуждением из основного состояния и полной вероятностью радиационного распада  $A_{3j-2i}^{tot}$ :  $I_{din} = A_{3j-2i} \cdot \hbar\omega_{3j-2i} \cdot N_p v \cdot g_{3j} \sigma_{1-3j} / A_{3j}^{tot}$  (3), где  $\sigma_{1-3j}$  – сечение возбуждения из основного состояния на уровень  $3j$ ,  $N_p$  – плотность плазмы,  $v$  – скорость пучка [3]. В работе показано, что при малых плотностях плазмы реализуется корональное равновесие, и отношение интенсивностей близко к динамическому пределу, а в пределе больших плотностей отношение интенсивностей выходит на статистический предел.

### Список литературы

1. Крупин В.А. и др.// РАЗРАБОТКА MSE ДИАГНОСТИКИ ПРОФИЛЯ ТОКА ДЛЯ УСТАНОВКИ Т-10, Препринт ИАЭ- 5940/7, Москва: РИЦ "Курчатовский институт," 1995. 33 с.
2. Ralchenko Yu. et al//A non-statistical atomic model for beam emission and motional Stark effect diagnostics in fusion plasmas, Review Scientific Instruments 2012 , vol. 83, 10D504.
3. Бете Г., Солитер Э./Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами, Москва: ГИФМЛ, 1960.

Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ<sup>1,2</sup>, А.Т. СААКЯН<sup>1</sup>, В.Н. ПУЗЫРЁВ<sup>1</sup>, А.Н. СТАРОДУБ<sup>1</sup>, А.А. КОЛОГРИВОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ МИШЕНИ ИЗ СЕРЫ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Представлены результаты исследования взаимодействия наносекундного излучения лазера на неодимовом стекле с мишенями из серы. Спектры излучения плазмы продемонстрировали наличие интенсивного излучения в диапазонах водяного и углеродного окон, пространственные размеры плазмы составили 180×260 мкм.

D.M. BEZVERKHNYAYA<sup>1,2</sup>, A.T. SAHAKYAN<sup>1</sup>, V.N. PUZYREV<sup>1</sup>, A.N. STARODUB<sup>1</sup>,  
A.A. KOLOGRIVOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## SPECTRAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF A SULFUR TARGET PLASMA IN THE X-RAY RANGE

The results of studies of the interaction of nanosecond laser radiation on neodymium glass with sulfur targets are presented. The emission spectra of the plasma demonstrated the presence of intense radiation in the bands of water and carbon windows, the spatial dimensions of the plasma were 180×260 μm.

Актуальной задачей для развития биомедицины и микроэлектроники является создание мощных и компактных источников мягкого рентгеновского излучения [1-2]. В частности, важную роль для исследования биологических объектов играют диапазоны водяного (23,3 – 43,7 Å) и углеродного окон (45 – 50 Å). Проведенные ранее исследования подтвердили наличие излучения плазмы мишеней из серы в данных диапазонах, однако на спектр накладывался нулевой порядок дифракции, делаая расшифровку спектра в области до 37 Å невозможной [3].

Исследования проводились на установке «Канал-2» с использованием лазера на неодимовом стекле с длиной волны излучения – 1.06 мкм, длительностью импульса по полувысоте – 3.2 нс и плотностью потока излучения  $\approx 2,8 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для исследования спектральных характеристик излучения плазмы использовался спектрограф скользящего падения. Для подавления нулевого порядка дифракции использовалась система в виде поворачивающегося затвора. Регистрация пространственных характеристик производилась с помощью рентгеновской электронно-оптической камеры со спектральной чувствительностью кадрового фотокатода 1.24-20.67 Å [4] и обскуры, обеспечивающей 11-кратное увеличение изображения.

Например, спектр излучения плазмы мишени из серы при энергии лазерного импульса 17.8 Дж (рис. 1а) демонстрирует, что максимальная интенсивность наблюдается в диапазоне 30-60 Å, что говорит о возможности эффективного излучения в диапазонах водяного и углеродного окон. При этом пространственные размеры плазмы с учётом 11-кратного увеличения составили 180×260 мкм (рис. 1б).

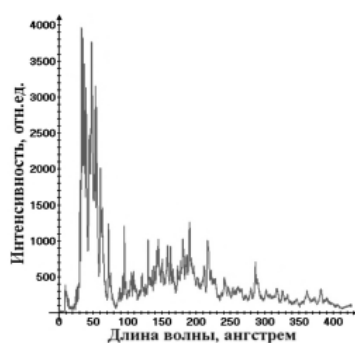


Рис. 1а

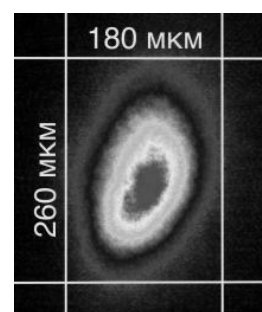


Рис. 2б

### Список литературы

1. Pereiro E. // Correlative cryo-soft X-ray tomography of cells //Biophysical reviews. – 2019. – V. 11. – №. 4. – P. 529-530.
2. Witte K. et al. // From 2D STXM to 3D imaging: soft x-ray laminography of thin specimens //Nano letters. – 2020. – V. 20. – №. 2. – P. 1305-1314.
3. Безверхняя Д.М., Кологривов А.А., Пузырев В.Н., Саакян А.Т. // Спектры излучения плазмы мишени из серы в мягком рентгеновском диапазоне // Современные проблемы физики и технологий. – 2022. – С. 86-87.
4. Feldman G.G., Lebedev V.B., Siniichuk A.A. // An apparatus for measuring the characteristics of the high-speed image converter cameras operating in the range of soft x-rays and vacuum UV.// Instruments and Experimental Techniques. 2020, v. 63, № 5, p. 767-772.

## ПРОФИЛЬ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В СВЧ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОМ ПОЛЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Исследована структура СВЧ разряда низкого давления на поверхностной электромагнитной волне (ПЭВ) в зависимости от давления в газоразрядной трубке и рабочей частоты аппликатора. Средняя по сечению концентрация электронов в разряде определялась методом проходящих СВЧ волн и по дисперсии ПЭВ на основании измеренных длин волн. Радиальные профили плотности плазмы в разряде были получены методом поперечных снимков с их последующей обработкой с помощью преобразования Абеля. Показано, что характер радиального распределения плотности плазмы определяется глубиной проникновения поля ПЭВ в плазму. Вид радиального профиля плотности может варьироваться от платообразного до сильно неоднородного с максимумом или минимумом на оси трубки. С помощью созданной в программе CST Microwave Studio Suite численной модели произведен расчет доли энергии ПЭВ, проникающей в плазму, в зависимости от профиля плотности.

V.I. ZHUKOV, D.M. KARFIDOV

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## ELECTRON DENSITY PROFILE IN A LOW-PRESSURE MICROWAVE DISCHARGE SUSTAINED BY A SURFACE WAVE FIELD

The structure of a low-pressure microwave discharge sustained by a surface electromagnetic wave (SEW) was studied as a function of the pressure in the gas-discharge tube and the operating frequency of the applicator. The cross-section average concentration of electrons in the discharge was determined by the method of passing microwave waves and by surface wave dispersion relation based on the measured wavelengths. Radial profiles of the plasma density in the discharge were obtained by the method of cross-section snapshots with their subsequent processing using the Abel transform. It was shown that the radial density profile is determined by the depth of penetration of the SEW electric field into the plasma and can vary from plateau-like to highly inhomogeneous with a maximum or minimum on the tube axis. Using the numerical model created in the CST Microwave Studio Suite program, the portion of the SEW energy penetrating the plasma depending on the density profile is calculated.

Исследована структура СВЧ разряда низкого давления, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной [1]. Разряд инициировался в кварцевых трубках различного диаметра, заполненных аргоном в диапазоне давлений от 0.2 Торр до 10 Торр. Разряд на поверхностной волне возбуждался волноводным аппликатором с рабочей частотой 2.45 ГГц, мощностью 800 Вт, либо коаксиальным резонатором (сурфатроном) [2], работающим на частоте 460 МГц, мощностью 40 Вт. Использован комплексный подход к измерению плотности плазмы. Абсолютные значения средней по сечению трубки концентрации электронов рассчитаны по дисперсионному соотношению для ПЭВ [3], связывающему измеряемую длину поверхностной волны с плотностью плазмы. Другой количественный метод основан на прохождении диагностического СВЧ сигнала. В предположении, что интенсивность свечения плазмы (при постоянной температуре электронов  $T_e$ ) пропорциональна ее плотности, по измерениям интенсивности свечения построен продольный профиль плотности плазмы в столбе [4]. Радиальные профили плотности в разряде были получены методом поперечных снимков с их последующей обработкой с помощью преобразования Абеля. Показано, что профиль плотности определяется характером проникновения поля ПЭВ в плазму. При скин-глубине порядка радиуса трубки радиальный профиль плотности аналогичен профилю плотности в тлеющем разряде, где  $n_e \sim J_0\left(\frac{2.4r}{a}\right)$  ( $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $a$  – радиус трубки) [3]. При росте концентрации электронов с увеличением давления или мощности, профиль сначала становится платообразным, а при дальнейшем росте концентрации формируется профиль плотности с минимумом на оси трубки. Численная модель эксперимента была создана в программе CST Microwave Studio Suite, где плазма задавалась моделью Друде. Моделирование позволяет на основании измеренных концентраций электронов оценить соотношение между долями энергии поля ПЭВ в вакууме  $W_{vac}$  и внутри плазмы  $W_{pl}$ . Так, в хвостовой части разряда, где концентрация электронов стремится к  $n_{11}^{-3}{}_{min}$  ( $n_{min}$  – критическая концентрация для распространения ПЭВ частотой 2.45 ГГц [3]) отношение  $W_{pl}/W_{vac}$  стремится к единице. При максимально достигнутой в эксперименте плотности плазмы  $n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  отношение  $W_{pl}/W_{vac} \approx 0.02$ , т.е. подавляющая часть энергии поля ПЭВ не проникает в плазму. В таком случае радиальный профиль плотности плазменного столба сильно неоднороден с минимумом концентрации электронов в центре трубки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90162.

### Список литературы

1. Moisan, M., Ferreira C. M., Hajlaoui Y., Henry D., Hubert J., Pantel R., Ricard A., and Zakrzewski Z. // *Revue de Physique Appliquée*. 1982. Vol. 17, № 11. P. 707–727.
2. Moisan, M., Chaker M., Zakrzewski Z., and Paraszczak J. // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1987. Vol. 20, № 11. P. 1356–1361.
3. Zhelyazkov, I., Atanassov V. // *Physics Reports*. 1995. Vol. 255, № 2–3. P. 79–201.
4. Zhukov, V. I., Karfidov D. M., Sergeichev K. F. // *Plasma Physics Reports*. 2020. Vol. 46, № 8.

## КОМПАКТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЛАЗМЫ

В работе представлен разработанный компактный магнитный спектрометр на основе постоянных магнитов, с регистрацией потока заряженных частиц плазмы на пленке ImagingPlates, рассчитанный для измерения спектра электронов с энергией в диапазоне от 0.65 до 50 МэВ и ионов с отношением импульса к заряду  $p/Z$  в диапазоне от 6 до 52 МэВ/с при энергетическом разрешении не хуже 0.8%. В работе приводится схема и расчет параметров спектрометра Томсона для измерения спектра ионов от плазмы мега-амперного Z-пинча.

V.A. PANYUSHKIN, A.V. KANTSYREV, A.O. KHURCHIEV, A.V. BOGDANOV,  
A.A. GOLUBEV

<sup>1</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF COMPACT PERMANENT MAGNET SPECTROMETERS FOR DIAGNOSTICS OF CHARGED PARTICLES FLOWS FROM PLASMA

This paper describes developed compact magnetic spectrometer based on permanent magnets, with registration of the charged plasma particle flux on the ImagingPlates. Magnetic spectrometer designed to measure the spectrum of electrons with energies in the range from 0.65 to 50 MeV and ions with a momentum-to-charge ratio  $p/Z$  in the range of 6 to 52 MeV/s with an energy resolution of at least 0.8%. The paper presents a scheme and calculation of the parameters of the Thomson spectrometer for measuring the spectrum of ions from the plasma of a mega-ampere Z-pinch.

Информация о корпускулярных потоках заряженных частиц, эмитируемых плазмой, образованной сильноточным разрядом или интенсивным лазерным излучением представляет интерес как с точки зрения исследования процессов, происходящих в плазме, так и для прикладных задач. По энергетическому спектру заряженных частиц можно судить о механизмах ускорения плазмы (ионов и электронов), а по зарядовому составу ионов – о температуре плазмы. Разработанный компактный магнитный спектрометр [1] на основе постоянных магнитов, позволяет проводить измерения спектра заряженных частиц плазмы, обеспечивая стабильную работу в условиях сильных электромагнитных наводок, возникающих в сильноточных, мега-амперных электрофизических установках и мощных лазерах. Для регистрации и количественного измерения спектра заряженных частиц плазмы используются детекторные пленки Imaging Plates FujiFilm: BAS-TR, BAS-MS на основе фотостимулируемого люминофора (BaFBr:Eu<sup>2+</sup>) [2]. Разработанный спектрометр рассчитан на измерение спектра электронов в диапазоне энергий от 0.65 до 50 МэВ и ионов с отношением импульса к заряду  $p/Z$  от 6 до 52 МэВ/с при энергетическом разрешении не хуже 0.8%. Расчет дисперсионных кривых магнитного спектрометра выполнен методом конечных элементов с учетом измеренного распределения магнитного поля. Спектрометр использован для измерения спектра заряженных частиц мега-амперного Z-пинча на установке Ангара 5-1.

Так же, в работе представлена разработанная схема спектрометра Томпсона с напряженностью магнитного поля 0.5 Тл и напряжением между электродами 400 В. Методом конечных элементов выполнено моделирование с построением изображения спектра ионов, для характерного спектра ионов от плазмы мега-амперного Z-пинча с лайнером на основе вольфрамовых проводников.

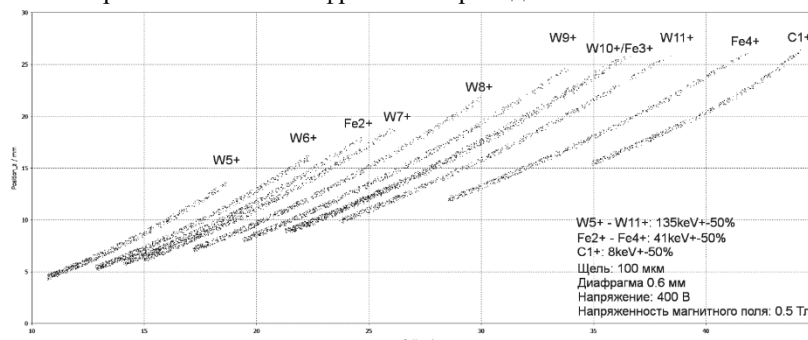


Рис. 1 Модельное изображение спектра ионов построенное в плоскости регистрации спектрометра Томпсона, рассчитанное для характерного спектра ионов от плазмы мега-амперного Z-пинча с лайнером на основе вольфрамовых проводников

Работа выполнена при поддержке Договора НИОКР №17706413348210001380/226/3467-Д от «23» июня 2021 г. между АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ а рамках комплексной программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года"

### Список литературы

1. А.О. Хурчиев, В.А. Панюшкин, А.В. Скобляков и др., Калибровка детекторных пленок Imaging Plates для регистрации заряженных частиц, ПТЭ (в печати).
2. J. Miyahara et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 246, 572 (1986)

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Восстановление спектров рентгеновского излучения плазмы, измеряемых с помощью дифракционных спектрографов, является важной задачей для изучения физических процессов в плазме импульсных лазерных и электроразрядных установок. Разработана методика восстановления исходных спектров рентгеновского излучения плазмы Z-пинча на установке Ангара 5-1 в области 2-40 нм с учетом формы поверхности и штриха дифракционной решетки, зависимости распределения интенсивности излучения в порядках дифракции от длины волны. Методика базируется на разработанной виртуальной Монте-Карло модели дифракционного спектрографа и дифференциальном методе описания взаимодействия излучения с дифракционной решеткой.

A.V. SKOBLIAKOV, D.S. KOLESNIKOV, A.V. KANTSYREV, A.A. GOLUBEV  
National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## RECONSTRUCTION OF THE INITIAL PLASMA X-RAY SPECTRA

Reconstruction of the initial X-ray spectra of plasma registered with diffraction spectrographs is an important task for studying physical processes in the plasma of pulsed laser and electric discharge facilities. A technique has been developed for reconstruction the initial X-ray spectra of the Z-pinch plasma at the Angara 5-1 facility in the range of 2–40 nm, taking into account the shape of the surface and the groove of the diffraction grating, and the dependence of the radiation intensity distribution in diffraction orders on the wavelength. The technique is based on the developed virtual Monte Carlo model of a diffraction spectrograph and a differential method for describing the interaction of radiation with a diffraction grating.

Основными проблемами, препятствующими достоверному восстановлению мягких рентгеновских спектров излучения плазмы, измеряемых с помощью дифракционных спектрографов, является наложение сигналов от разных порядков дифракции и зависимость распределения интенсивности излучения в различные порядки дифракции от длины волны после его взаимодействия с дифракционной решеткой.

В работе разработан программный комплекс, позволяющий задавать полномасштабные модели дифракционных спектрографов, которые позволяют автоматически учитывать влияние aberrаций при трекинге излучения от источника (плазмы) до детектора с учетом взаимодействия рентгеновского излучения с дифракционной решеткой. С использованием данных моделей при восстановлении исходных спектров можно учесть функцию размытия спектральной линии (ФРЛ), которая оказывает влияние при наличии выделенных линий на спектрограмме.

Разработана методика восстановления исходных спектров рентгеновского излучения плазмы (рис. 1) использующая результаты расчета зависимости интенсивности излучения в различные порядки дифракции, выполняемые с помощью дифференциального метода [1, 2]. Для восстановления спектров решается обратная задача декомпозиции экспериментального сигнала (спектрограммы) по вкладам от каждого из порядков дифракции.

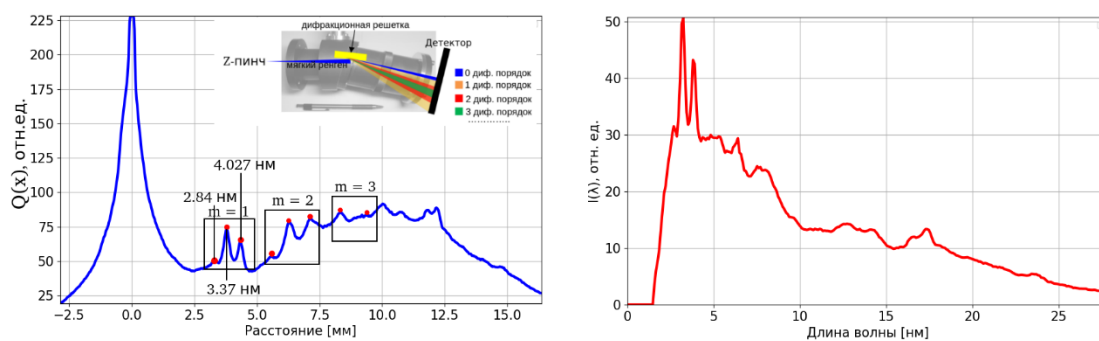


Рисунок 1. Пример восстановленного спектра для лайнера с полипропиленовыми волокнами. Слева — экспериментально зарегистрированная спектрограмма. Справа — восстановленный исходный спектр.

С использованием разработанной методики продемонстрирована возможность определения формы профиля штриха ДР на основании априорной информации о зарегистрированных спектрах и выполнено восстановление спектров рентгеновского излучения, полученных в серии экспериментов на установке Z-пинч Ангара 5-1 для лайнеров на основе вольфрамовых и полипропиленовых волокон.

Работа выполнена при поддержке Договора НИОКР №17706413348210001380/226/3467-Д от «23» июня 2021 г. между АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ в рамках комплексной программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года"

### Список литературы

1. Michel Nevier, Evgeny Popov, Light Propagation in Periodic Media: Differential Theory and Design // CRC Press; 1st edition
2. А. В. Скобляков, Д. С. Колесников, А.В. Канцырев, А.А. Голубев и др., Цифровая модель рентгеновского спектрографа скользящего падения и методики восстановления спектра в диапазоне 2 — 40 нм, Физика плазмы, 2023, (в печати).

А.О. ХУРЧИЕВ<sup>1</sup>, А.В. СКОБЛЯКОВ<sup>1</sup>, В.А. ПАНЮШКИН<sup>1</sup>, А.В. КАНЦЫРЕВ<sup>1</sup>, А.А. ГОЛУБЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Информация о параметрах заряженных частиц и рентгеновского излучения плазмы, образованной сильноточным разрядом представляет интерес как с точки зрения понимания фундаментальных процессов, происходящих в импульсной плазме, так и для прикладных задач. Пленочные детекторы Imaging Plate (IP) являются одними из часто используемых типов детекторов для регистрации заряженных частиц и рентгеновского излучения плазмы. В данной работе представлены результаты абсолютной калибровки пленок IPs BAS-MS и BAS-TR, применяемых для измерений рентгеновского излучения, потока электронов и ионов. Приводится пример применения пленок IP для измерения энергетического распределения ионов от мега-амперного Z-пинча с помощью спектрометра на постоянных магнитах.

A.O. KHURCHIEV<sup>1</sup>, A.V. SKOBLIAKOV<sup>1</sup>, V.A. PANYUSHKIN<sup>1</sup>, A.V. KANTSYREV<sup>1</sup>, A.A. GOLUBEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## CALIBRATION OF IMAGING PLATES DETECTORS FOR CHARGED PARTICLES AND X-RAYS MEASUREMENTS

The knowledge about the parameters of charged particles and X-rays of a plasma formed by a high-current discharge is of interest both in terms of understanding the fundamental processes occurring in pulsed plasma and for applied problems. Imaging Plates (IP) are one of the most commonly used types of detectors for detecting charged particles and X-rays of plasma. This paper presents the results of the absolute calibration of IPs BAS-MS and BAS-TR used for measurements of X-rays, electron and ion fluxes. An example of the use of IP for measuring the energy distribution of ions from a mega-ampere Z-pinch using a permanent magnet spectrometer is given.

Информация о потоках частиц, эмитируемых сильноточными разрядами или лазерной плазмой представляет интерес как с точки зрения исследования процессов, происходящих в плазме, так и прикладных задач. По измеренным спектрам заряженных частиц можно судить о механизмах ускорения плазмы. Регистрация рентгеновского излучения используется для построения изображения излучающей зоны плазмы и определения температуры плазмы. Для регистрации спектров заряженных частиц и рентгеновского излучения большое распространение получили пленочные детекторы Imaging Plates (IP) Fujifilm на основе фотостимулированного люминофора (BaFBr:Eu<sup>2+</sup>) [1], обладающие высоким динамическим диапазоном и хорошим пространственным разрешением.

Чувствительность пленок IP BAS-MS и BAS-TR нелинейно зависит от энергии регистрируемой частицы или рентгеновского излучения, причем абсолютные значения калибровки зависят от типа лазерного сканера, используемого для считывания с пленки зарегистрированного сигнала [2]. Сигнал детекторных пленок зависит от поглощенной энергии заряженной частицы в чувствительном слое. В работе [3] была предложена экспоненциальная модель зависимости чувствительности пленок BAS-MS, BAS-TR и BAS-SR от поглощенной энергии  $dE_{dep}$  в расчете на одну частицу:

$$PSL(E) = \alpha \int_0^W \frac{dE_{dep}}{dz}(E, z) e^{-z/L} dz = \alpha dE_{dep}^{eff},$$

где  $dE_{dep}/dz$  – энергия, выделяемая падающими и всеми вторичными частицами в люминофорном слое  $dz$ ;  $W$  – толщина слоя люминофора;  $L$  – длина поглощения фотонов фотостимулированного излучения, образованных в процессе сканирования пленки. Экспоненциальный множитель в формуле учитывает ослабление потока фотонов на глубине  $z$  в люминофорном слое. Коэффициент  $\alpha$  зависит от типа заряженной частицы, но не зависит от её энергии. Таким образом, зная коэффициент  $\alpha$ , можно рассчитать чувствительность пленки для широкого диапазона энергий.

В задачах измерения спектра частиц от плазмы мега-амперных Z-пинчей и мощных лазеров используются компактные магнитные спектрометры. В качестве детектора заряженных частиц в них используются пленочные детекторы Imaging Plates. В данной работе представлены результаты калибровки IP BAS-MS и BAS-TR для заряженных частиц, в том числе с учетом угла падения частиц в спектрометре, а также результаты калибровки для рентгеновского излучения [4].

Работа выполнена при поддержке Договора НИОКР №17706413348210001380/226/3467-Д от «23» июня 2021 г. между АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ в рамках комплексной программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года"

*Список литературы*

1. J. Miyahara et. al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1986, V. 246, p. 572-578. DOI: 10.1016/0168-9002(86)90156-7.
2. K. Zeil, D. Kraft, A. Jochmann et. al., Rev. Sci. Instrum., 2010, V. 81, 013307. DOI: 10.1063/1.3284524
3. T. Bonnet, M. Comet, D. Denis-Petit et. al., Rev. Sci. Instrum., 2013, V. 84, 103510. DOI: 10.1063/1.4826084
4. А.О. Хурчиев, В.А. Панюшкин, А.В. Скобляков и др., Калибровка детекторных пленок Imaging Plates для регистрации заряженных частиц, ПТЭ (в печати).

Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ, В.В. БОРОГ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОЛИТЕ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Проводилось исследование приэлектродных процессов при разряде в электролите. Были получены электротехнические характеристики данного разряда. Изучалось влияние филаментации тока разряда на возникновение конических образований размерами около 10-30 мкм на вольфрамовых электродах, и пористых поверхностей на титановых электродах. Влияние магнитного поля приводит к увеличению роста рассмотренных поверхностных структур.

D.L. KIRKO, A.S. SAVJOLOV, V.V. BOROG  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **RESEARCH OF INTERACTION OF PLASMA DISCHARGE IN ELECTROLYTE WITH SURFACE OF ELECTRODES IN MAGNETIC FIELD**

The study of near-electrode processes during discharge in electrolyte was carried out. Electro technical characteristics of this discharge were obtained. The influence of filamentation of the discharge current on emergence of conical formations of about 10-30  $\mu\text{m}$  in size on tungsten electrodes and porous surfaces on titanium electrodes was studied. The influence of the magnetic field leads to an increase in the growth of the considered surface structures.

Разряд в электролите обычно формируется между двумя электродами, расположенными в среде жидкости. Ток данных разрядов находится в диапазоне от десятых до единиц ампер. Цвет разряда синий или желто-красный, и зависит от свечения атомных линий элементов, входящих в состав электролита [1,2]. Прохождение тока и электролиз раствора вызывает образование пузырьков газа на электродах, которые влияют на процессы пробоя и формирования разряда.

Электролит на основе карбоната натрия при концентрации 0.1-0.4 М (1М соответствует молярному весу в граммах на 1 л воды) помещается в корпус из оргстекла объемом 100-500 см<sup>3</sup>, применялась дистиллированная вода. Катод, имеющий форму стержня с диаметром 1-3 мм, материал: вольфрам, титан размещался в среде электролита в керамической трубке. Рабочей частью катода является площадь около 0.5-1.0 мм<sup>2</sup>. В экспериментах использовалось вертикальное расположение электродов. Для анода применялись пластины из нержавеющей стали. Для питания разряда применялся источник с напряжением до 250 В, работающий с частотой 100 Гц. Около боковой стенки камеры размещались сборки из постоянных магнитов, которые создавали варьруемое магнитное поле в объеме электролита.

Зависимости напряжения и тока разряда представляют собой последовательности импульсов с заданной частотой 100 Гц. В начале каждого импульса тока наблюдаются высокочастотные колебания. Структура разряда содержит прикатодную область с размерами 1-2 мм, расположенную вблизи электрода. В зависимости от режима разряда его размеры меняются, максимальные размеры составляют 1-2 см. Ранее были зарегистрированы электрические колебания в цепи разряда в широком диапазоне 30 Гц –150 МГц [1,2]. При титановых электродах методом относительных интенсивностей по водородным линиям  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$ , при допущении локального термического равновесия, были выполнены измерения температуры плазмы. Для прикатодной области разряда температура составила величину  $T=2600\pm 200$  К при токе разряда  $I\approx 1.1$  А.

Было обнаружено, что воздействие разряда в электролите приводит к образованию различных микроструктур на поверхности электродов [2]. Ввиду этого было сделано предположение, что на приэлектродные процессы при разряде в электролите может влиять магнитное поле. Величина индукции магнитного поля в данных опытах варьровалась в диапазоне  $B=200-700$  Гс. В экспериментах разряд включался в течение промежутка времени 3-40 мин. В работе изучались участки поверхности вольфрамовых катодов вблизи оконечности электродов. Были зарегистрированы поверхностные структуры напоминающие конусы с размерами около 1-30 мкм. Форма данных образований имеет преимущественно неправильную заостренную форму. Расположение данных конусов на поверхности хаотическое нерегулярное. Для характеристики присутствия данных конусов на поверхности использовалась величина среднего количества конусов на единице площади поверхности. В работе были получены зависимости данной величины от магнитного поля. При использовании вольфрамовой проволоки поверхность катода содержит большое количество неоднородностей, что приводит к возникновению филаментной структуры тока.

### *Список литературы*

1. Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Ефимов А.В., Гильмутдинов А.Х., Кашапов Н.Ф // ТВТ. 2017. Т. 55. № 3. С. 472.
2. Кирко Д.Л. // Физика плазмы. 2020. Т. 46, № 6, С. 496.



Р. ИДЕАЛ, В.П. БУДАЕВ, Д.В. РЫЖАКОВ  
«Национальный исследовательский университет „МЭИ“», Москва, Россия  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД

В докладе описана рентгеновская диагностика для токамака Т-15МД. Разрабатываемая многоканальная диагностика позволяет определить радиальный профиль температуры электронов.

R. IDEAL, V.P. BUDAEV, D.V. RYZHAKOV  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia  
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## MULTICHANNEL X-RAY SPECTROMETER FOR TOKAMAK T-15MD

X-ray diagnostics for the tokamak T-15MD is described. The multichannel diagnostics being developed makes it possible to determine the profile of the electron temperature of the plasma.

Диагностический комплекс токамака Т-15МД состоит из диагностических систем, которые позволяют определять значения параметров плазмы в различные моменты времени и в разных областях объёма плазменного шнура.

В работе проведён расчёт рентгеновского излучения из плазмы токамака с целью разработки диагностики «Многоканальный рентгеновский спектрометр» для токамака Т-15МД [1] и разработана схема диагностики (рис.1), используя экспериментальные результаты измерений на токамаке Т-10. Из сравнения расчётных и экспериментальных данных определена зависимость поглощения рентгеновского излучения в детекторе (спектральная чувствительность детектора) от энергии регистрируемого излучения, выбраны геометрические размеры проектируемой для Т-15МД диагностики, уточнены характеристики фильтров и детектора, написана программа, автоматически аппроксимирующая экспериментальные данные и определяющая температуру электронов. Было показано, что при выбранных параметрах диагностики ожидается хорошее пространственно-временное разрешение при измерениях на Т-15МД. Диагностика позволит измерять характеристики плазмы при регистрации квантов в диапазоне от 2 кэВ до 15 кэВ.

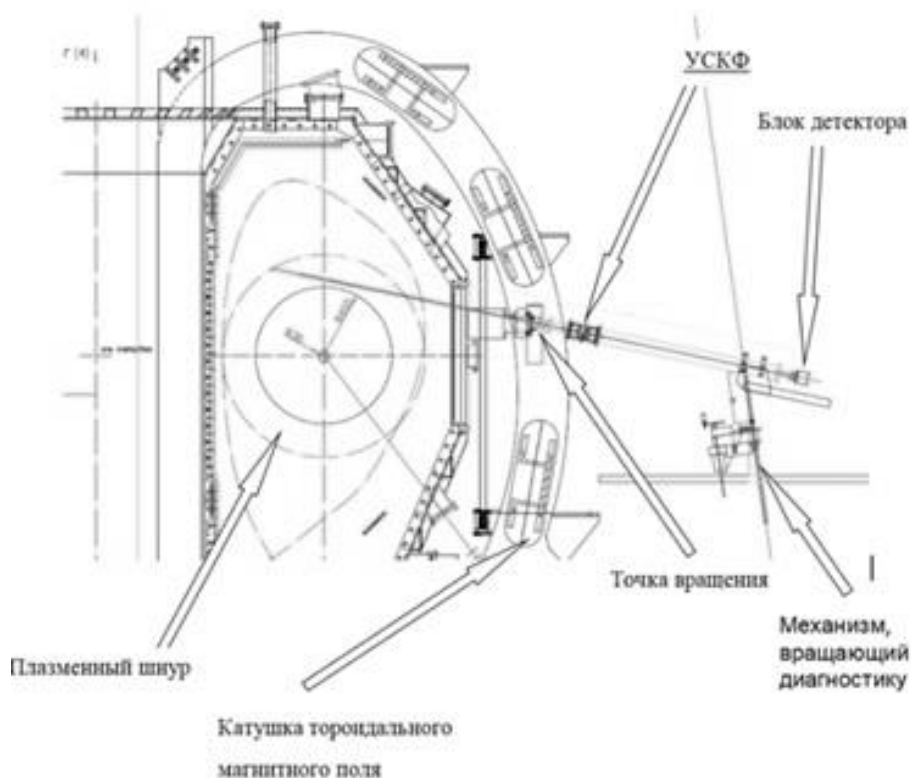


Рис. 1. Схема измерения рентгеновского излучения в Т-15МД. УСКФ – устройство смены коллиматоров и фильтров.

### Список литературы

1. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД /П.П. Хвостенко и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – т. 42, в. 1. – с. 15-38.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА**

Проводилось изучение взаимодействия плазмы с металлическими поверхностями в установке типа плазменный фокус в случае аргоновой и водородной плазмы. На стальных электродах появляются замкнутые микроstructures, состоящие из микроотверстий с диаметрами 0.1-3 мкм. При вольфрамовых электродах присутствуют образования неправильной формы с размерами 10-40 мкм. Обсуждаются модели возникновения данных образований.

D.L. KIRKO, P.P. SIDOROV, O.A. BASHUTIN, A.S. SAVJOLOV, V.V. BOROG  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURES ON METAL SURFACES UNDER INFLUENCE OF PLASMA FOCUS**

The interaction of plasma with metal surfaces was studied in a plasma focus-type setup in the case of argon and hydrogen plasma. Closed microstructures consisting of micro holes with diameters of 0.1-3  $\mu\text{m}$  appeared on steel electrodes. At tungsten electrodes irregularly shaped formations with sizes of 10-40  $\mu\text{m}$  are present. Models of occurrence of these formations are discussed.

В установках типа плазменный фокус возможно образование плотной высокотемпературной плазмы при пинчевании токовой оболочки. В работе [1] было сделано предположение о наличии в токовой плазменной оболочке волокнистой структуры с диаметром отдельного волокна около 100 мкм. При расширении плазменной оболочки разряда появляются интенсивные плазменные потоки. При взаимодействии частиц плазменного фокуса с поверхностью металлов было обнаружено образование наноструктур [2].

В данной работе электродная система содержала центральный медный анод, в верхней части которого размещалась исследуемая металлическая пластина в виде диска с диаметром 12 мм и высотой 3 мм. Характерное зарядное напряжение конденсаторной батареи находилось в диапазоне 24-26 кВ, емкость батареи 12 мкФ, амплитудное значение тока разряда 330-345 кА при периоде тока разряда 5.0 мкс. Форма импульса тока представляла собой затухающую синусоиду с количеством периодов 3-4. Рабочее давление аргона в камере составляло 1.5-1.7 Тор. После огибания анода токовая оболочка сходится вблизи оси камеры, образуя плотное плазменное образование - плазменный фокус. Согласно измерениям концентрации плазмы в периферийных областях разряда плотность потока частиц принимает значения в области  $10^{20}$ - $10^{21}$  атом/см<sup>2</sup>·с.

В качестве другого способа изучения взаимодействия потоков плазмы и металлов использовалась система, установленная на оси разряда, в которой закреплялась исследуемая пластина. При использовании стальных образцов (Ст.45) на поверхности металла присутствуют отдельные участки, где находятся сгустки овальной или неправильной формы размерами 10-40 мкм. Элементный состав данных образований, как правило, содержит железо (около 80%), алюминий (около 15%), и медь (около 5%). На некоторых данных сгустках наблюдаются микропоры с формой близкой к круглой с размерами 0.1-0.7 мкм.

Предположим, что на некоторых участках происходит филаментация тока на небольшие микронные токи диаметром 0.1-3 мкм, которые впоследствии оказывают термическое действие и приводят к образованию микропористой структуры поверхности. Для металлических поверхностей в плазме может работать механизм распыления, свойственный для воздействия ионных пучков на поверхность в вакууме. Предположим, что ток через стальную вставку в центре анода находится в диапазоне 500-5000 А. При филаментации данного тока, допустим количество токовых нитей в диапазоне 500-1000. В этом случае величина элементарного тока, проходящегося на одну токовую нить, будет находиться в области 0.5-10 А. Время воздействия тока, или его прохождения через пластину, можно взять для оценки равным половине периода 2.5 мкс.

Другими любопытными образованиями на поверхности вольфрамовых пластин являются образования размерами 10-40 мкм, состоящие из сгустков неправильной формы меньших размеров 1-5 мкм. В непосредственной близости от данных образований могут появляться своеобразные группы пятен диаметром 0.5-2 мкм, которые можно также связать с проявлением филаментации и воздействием микротоков.

### *Список литературы*

1. Орлов М.М., Терентьев А.Р., Храбров В.А. // Физика плазмы. 1985. Т. 11, №10, С. 1268.
2. В.И. Крауз, Л.Н. Химченко, В.В. Мятлон, В.П. Виноградов, Ю.В. Виноградова, В.М. Гуреев, В.С. Койдан, В.П. Смирнов, В.Е. Фортон // Физика плазмы. 2013. Т. 39, № 4, С. 326.
3. Кирко Д.Л., Сидоров П.П., Башутин О.А., Савелов А.С. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, Вып. 15, С. 19.

Е.Ю. ТУЛУБАЕВ<sup>1</sup>, Ю.В. ПОНКРАТОВ<sup>1</sup>, Ю.Н. ГОРДИЕНКО<sup>1</sup>, И.Л. ТАЖИБАЕВА<sup>1</sup>, В.С. БОЧКОВ<sup>1</sup>, А.В. ВЕРТКОВ<sup>2</sup>, М.Ю. ЖАРКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов  
<sup>2</sup>АО «НИКИЭТ», Москва, Россия

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ С ОХЛАЖДАЕМЫМ МАКЕТОМ МОДУЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИМИ ГАЗАМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Данная работа посвящена методике проведения экспериментов с макетом модуля литиевого дивертора (МЛД), охлаждаемого парогазовой смесью низкого давления при взаимодействии с плазмообразующими газами в условиях высоких энергетических нагрузок. В работе подробно описана конструкция макета МЛД, все основные системы, параметры и схема стенда для проведения испытаний с макетом МЛД в условиях высоких энергетических нагрузок. Рассчитаны рабочие режимы водяной и газовой систем охлаждения при тепловом воздействии на макет МЛД мощностью равной 5 МВт/м<sup>2</sup>. Приведено описание эксперимента по отработке методики, охлаждения макета МЛД парогазовой смесью низкого давления в условиях высоких энергетических нагрузок.

YE.YU. TULUBAYEV<sup>1</sup>, YU.V. PONKRATOV<sup>1</sup>, YU.N. GORDIENKO<sup>1</sup>, I.L. TAZHIBAYEVA<sup>1</sup>,  
V.S. BOCHKOV<sup>1</sup>, A.V. VERTKOV<sup>2</sup>, M.YU. ZHARKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov  
<sup>2</sup>SC «NIKIET», Moscow, Russia

## TEST PROCEDURE WITH A COOLED PROTOTYPE OF THE LITHIUM DIVERTOR MODULE BY EXPOSURE TO THE PLASMA GASES UNDER HIGH ENERGY LOADS

The paper is concerned with the test procedure of the lithium divertor module (LDM) prototype being cooled by means of the low-pressure steam-gas mixture when interacting with plasma-forming gases under high energy loads. The paper writes up design of the LDM prototype along with primary systems, parameters and scheme of the LDM prototype -test bench under conditions of high energy loads. There are also calculated operating modes of water and gas cooling systems by thermal exposure to the LDM prototype with a capacity equal to 5MW/m<sup>2</sup>. Experiment showing the trial of the procedure of LDM prototype cooling with a low-pressure steam-gas mixture under high energy loads is described in detail.

Проведенные исследования по применению литиевых КПС в качестве внутрикамерных элементов термоядерных реакторов в полной мере подтверждают, что литиевые внутрикамерные элементы способны обеспечить в отличие от твёрдых материалов (вольфрам и др.) длительную стационарную работу токамака. Однако проблема отвода больших тепловых потоков (свыше 10 МВт/м<sup>2</sup>) еще не решена [1].

Одним из решений данной проблемы стало инновационное предложение российских ученых использовать для охлаждения внутрикамерных устройств в установках управляемого термоядерного синтеза (лимитер, дивертор, первая стенка) мелкодисперсную смесь воды и газа с низкими значениями давления. Предварительные исследования эффективности и безопасности системы охлаждения с теплоносителем на основе газовой смеси были проведены в РФ в лабораторных условиях на модельных образцах внутрикамерных элементов, изготовленных из меди. Данный теплоноситель впервые был использован на практике для охлаждения лимитера с приемной поверхностью на основе КПС, заполненной оловом, при проведении российско-итальянского эксперимента на токамаке FTU (Италия) [2]. Как показали проведенные исследования, использование мелкодисперсного газовой смеси позволяет снизить давление в трактах охлаждения и иметь низкое объемное содержание воды в каналах охлаждения внутрикамерного элемента.

Внедрение предлагаемого способа охлаждения в практику токамаков (в частности для КТМ) требует проведения широкого комплекса экспериментальных исследований, в первую очередь в стендовых условиях, и отработки методики исследований.

В работе описаны: конструкция макета МЛД, основные системы, параметры и схема стенда для проведения испытаний с макетом МЛД. Приведено описание эксперимента, в результате которого была получена динамика нагрева макета МЛД при охлаждении парогазовой смесью и без охлаждения. Проведенный эксперимент подтвердил корректность разработанной методики по охлаждению макета МЛД парогазовой смесью низкого давления в условиях высоких энергетических нагрузок.

Работа выполняется при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (ИРН – BR09158585 НТП «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).

### Список литературы

1. Tabarés, Francisco L. First liquid lithium limiter biasing experiments in the TJ-II stellarator / Francisco L. Tabarés [et al. TJ-II Team] // Journal of Nuclear Materials. – August 2015. – Vol. 463. – P. 1142-1146.
2. Vertkov A., Lyublinski I., Mazzitelli et al. Liquid tin limiter for FTU tokamak. — Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 117, pp. 130—134; DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.041.

Р.А. СЕЛИВАНОВ<sup>1</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, С.А. КРАТ<sup>1</sup>,  
*1*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
*2*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия,  
Фрязино Московской обл

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ КАПИЛЛЯРНО ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ЛИТИЕМ, ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

В работе было проведено исследование скорости потери массы лития и эрозии сетки капиллярно-пористой структуры при воздействии водородной плазмы.

R.A. SELIVANOV<sup>1</sup>, I.A.SOROKIN<sup>1,2</sup>, S.A.KRAT<sup>1</sup>  
*1* National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
*2* Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics Fryazino branch. Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia

## **STUDY OF THE EROSION OF A CAPILLARY POROUS STRUCTURE FILLED WITH LITHIUM UNDER INTENSE PLASMA EXPOSURE**

In this work study of the rate of lithium mass loss and erosion of a network of capillary-porous structure was carried out.

При разработке термоядерных установок остаётся актуальной проблема разрушения первой стенки под действием тепловых и плазменных потоков. Сейчас ведутся исследования характеристик кандидатных материалов первой стенки, в первую очередь вольфрама. Однако, также рассматриваются различные жидкометаллические системы, способные уменьшить разрушение первой стенки под влиянием тепловых и плазменных потоков. Наиболее удобными и перспективными являются капиллярно-пористые структуры (КПС).

Испытание образцов КПС, заполненной литием, с матрицей из вольфрама проводились на стенде с дугой низкого давления с полым катодом / анодом в газах водороде и аргоне в условиях, имитирующих мощные плазменные потоки в области дивертора токамака. Средняя плотность мощности теплового и ионно-плазменного потока, воздействующей на образец, превышала 5 МВт/м<sup>2</sup>. Характерное время испытаний составляло ~ 60 секунд, напряжение разряда ~ 30-40 В, ток разряда до 100 А.

Для изучения взаимодействия мощных потоков плазмы с КПС было разработано и изготовлено два образца с различной площадью КПС: 2 и 10 см<sup>2</sup>. Плотностью мощности на образец контролировалось при помощи изменения площади области воздействия. Для формирования КПС образец прогревался в атмосфере аргона внутри перчаточного бокса при температуре ~ 400 °С в течении часа. Это обеспечивало равномерное смачивание вольфрамовой матрицы жидким литием.

Имитация ионно-плазменных и тепловых нагрузок на поверхность КПС осуществлялась двумя способами.

В первом случае, образец является анодом, при этом поверхность испытывает высокие, равномерно распределенные тепловые нагрузки и сопровождается потоком электронов на нее. При этом потеря массы образца в основном происходит за счет термического испарения лития. Эксперимент проводился только с образцом малой площади КПС, в качестве рабочего газа использовался аргон. В этом режиме длительного горения разряда добиться не удалось. Предполагается, что причиной нестабильного горения являлся перегрев поверхности лития, ведущий к резкому увеличению давления паров лития над поверхностью КПС и, как следствие, дестабилизации дугового разряда. В результате экспериментов масса КПС не изменилась.

Во втором случае образец являлся катодом, при этом на поверхность КПС направлены не только тепловые, но и ионные потоки. В результате таких нагрузок поверхность эродирует за счет двух процессов: испарения и распыления. В этом случае возможным было осуществление длительного (больше 30 с) стабильного горения разряда при плотностях мощности теплового потока около 2 и 12 МВт/м<sup>2</sup>.

При испытаниях с плотностью мощности теплового потока ~2 МВт/м<sup>2</sup> скорость потери массы составила ~ 10 мкг/Кл и эта скорость линейно зависит от плотности теплового потока на поверхность. Основной причиной потери массы является испарение лития.

Изучение разрушения вольфрамовой матрицы производилось путём визуального осмотра и при помощи сканирующей электронной микроскопии. Для удаления лития, оставшегося в вольфрамовой матрице после эрозионных испытаний, КПС промывался водой. Вольфрамовые сетки не разрушились в ходе эксперимента, и их структура осталась неизменной. Не наблюдается каких-либо следов оплавления, возникновения крупных разрывов на сетке, что говорит о отсутствии зон локального не смачивания литием поверхности КПС, обращенной к плазме.

В.Ю. ЛИСЕНКОВ<sup>1</sup>, М.М. ХАРЬКОВ<sup>1</sup>, А.В. ТУМАРКИН<sup>1</sup>, Г.И. РЫКУНОВ<sup>1</sup>,  
М.С. КУКУШКИНА<sup>1</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>, А.В. КАЗИЕВ<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия*

## **ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В СТАЦИОНАРНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА С ГОРЯЧЕЙ МИШЕНЬЮ**

Получены тонкопленочные покрытия оксидов меди и кремния методом осаждения в магнетронном разряде с горячей мишенью в режимах постоянного тока и импульсного распыления высокой мощности (HiPIMS). Измерены параметры разряда и определены стабильные режимы, для которых проведена диагностика состава ионного потока на подложку. Проводится сравнение скоростей осаждения, структуры и элементного состава покрытий.

V. Yu. LISENKOV<sup>1</sup>, M.M. KHARKOV<sup>1</sup>, A.V. TUMARKIN<sup>1</sup>, G.I. RYKUNOV<sup>1</sup>,  
M.S. KUKUSHKINA<sup>1</sup>, D.V. KOLODKO<sup>1,2</sup>, A.V. KAZIEV<sup>1</sup>

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino branch, Fryazino, Russia*

## **DEPOSITION OF OXIDE COATINGS IN DC AND HIPIMS HOT-TARGET MAGNETRON DISCHARGE MODES**

Thin-film copper oxide and silicon oxide coatings have been obtained by deposition in a hot-target magnetron discharge in direct current and high-power impulse sputtering (HiPIMS) modes. The discharge parameters were measured, and its stable modes were determined, for which the diagnostics of the ion flux composition to the substrate was carried out. The deposition rates, structure and elemental composition of the coatings are compared.

Технологии импульсного магнетронного распыления высокой мощности (HiPIMS) позволяют получать более плотные и прочные покрытия по сравнению с обычными магнетронами постоянного тока с низкой степенью ионизации плазмы. Использование импульсных магнетронных разрядов в реактивных режимах является перспективным методом получения оптических и структурных покрытий сложного состава. Как правило, работа с реактивными газами значительно снижает скорость распыления мишени и, как следствие, скорость нанесения покрытия. Использование магнетрона с горячей мишенью могло бы преодолеть этот недостаток, но особенности реактивных разрядов HiPIMS, работающих с горячими мишенями, изучены недостаточно.

К числу наиболее ценных характеристик относятся параметры потоков ионов, исходящих из области разряда, которые в конечном итоге достигают поверхности подложки и способствуют росту покрытия. Актуальной задачей является сравнение параметров покрытий, осажденных при различных величине и составе ионных потоков, при использовании как режимов HiPIMS, так и разряда постоянного тока.

Эксперименты проводились на установке магнетронного напыления с медной теплоизолированной мишенью. Для формирования разряда использовался источник питания APPEL-M-5HPP-1200, который способен работать как в режиме сильноточных импульсов, так и в режиме постоянного тока, с максимальной мощностью 5 кВт. Изначально магнетрон был закрыт заслонкой. В начале процесса мишень нагревалась и плавилась разрядом HiPIMS или DC в аргоне при давлении 0,5 Па и средней мощности 1000 Вт. Затем устанавливался желаемый поток O<sub>2</sub>, а поток аргона уменьшался до нуля. Заслонка отрывалась, и выполнялось осаждение оксида. В экспериментах средняя мощность разряда фиксировалась на уровне 1000 Вт, рабочее давление кислорода на стадии напыления  $5,5 \times 10^{-3}$  Торр (при работе без аргона). Диапазон частоты повторения импульсов HiPIMS составлял 250–1000 Гц. Длительность импульса варьировалась в диапазоне 100–400 мкс.

Осажденные покрытия диагностировались методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Для случая медной мишени показано, что в зависимости от длительности импульса и частоты повторения импульсов при постоянной мощности параметры осаждаемой пленки изменяются: скорость осаждения ниже для режимов с более высоким импульсным током, однако морфология структуры улучшается с увеличением тока. Продемонстрирована реализация стабильного режима осаждения оксида меди в импульсном магнетроне в атмосфере кислорода без аргона. Результаты показали преимущественный рост стехиометрических пленок CuO со скоростью осаждения 100–200 нм/мин.

Для случая кремниевой мишени показано, что реакционное магнетронное осаждение в режиме HiPIMS с горячей мишенью в смесях Ag/O<sub>2</sub> характеризуется сглаживанием гистерезиса при мощности выше начала испарения. Это приводит к увеличению скорости осаждения покрытий Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, которые растут не только за счет окисления осаждаемого кремния, но и за счет осаждения испаряющегося оксида в молекулярном виде. Это наблюдается в масс-спектрах потока ионов, где отчетливо присутствует фракция SiO<sup>+</sup>.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-79-10242).

## РАСПЫЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В КОМБИНИРОВАННОМ ИМПУЛЬСНОМ БИПОЛЯРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В работе продемонстрирована возможность реализации комбинированного режима распыления углерода с помощью магнетронной распылительной системы. Комбинированный режим объединяет в себе магнетронное распыление биполярными импульсами высокой мощности и импульсное дуговое испарение. Импульсный магнетронный разряд и дуга используются для ионизации распыленных атомов углерода, а положительный импульс для их ускорения. В работе приводится описание устройства и принципа действия системы электропитания, позволяющей работать в комбинированном режиме. Представлены результаты измерения ионного тока на подложку, энергии ускоренных ионов и скорости напыления покрытий.

M.I. AZHGIKHIN, V.O. OSKIRKO, A.N. ZAKHAROV  
Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

## SPUTTERING OF CARBON IN A COMBINED PULSED BIPOLAR MODE BY A MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM.

The paper reveals the possibility of implementing a combined mode of carbon sputtering by a magnetron sputtering system. The combined mode includes magnetron sputtering with high power bipolar pulses and pulsed arc evaporation. A pulsed magnetron discharge and an arc discharge are used to ionize sputtered carbon atoms and a positive pulse is used to accelerate them. The paper provides a description of the device and the principle of operation of the power supply system, which allows working in a combined mode. The measurement results of the ion current to the substrate, the energy of accelerated ions, and the deposition rate of coatings are presented.

Путем реализации комбинированного режима на базе магнетронной распылительной системы (МРС) удалось реализовать источник ускоренных ионов углерода. В перспективе он может использоваться для получения углеродных покрытий с высокой долей  $sp^3$  фазы. Благодаря высокой твердости и низкому коэффициенту трения данные покрытия востребованы во многих областях производства [1]. В работе представлено описание схемы питания МРС (см. рис. 1.а), с помощью которой обеспечивался комбинированный режим распыления. Формирование импульсов высокой мощности происходит при пониженном давлении газа в камере -  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, когда напряжение на конденсаторе  $C_1$  достигает порогового значения  $600 \div 700$  В. Сначала формируется импульс магнетронного разряда высокой мощности. При токе  $\sim 400-500$  А магнетронный разряд переходит в дугу с током от 1 до 3 кА. Дуга обеспечивает ионизацию распыленных атомов углерода. После гашения дуги формируется положительный импульс напряжения, благодаря которому происходит ускорение сгенерированных дугой ионов углерода. На рис. 1.б приведены осциллограммы импульсов ионного тока, протекающего на зонд в комбинированном режиме. В работе продемонстрирована возможность регулирования параметров импульсов разрядного тока и напряжения, которая позволяет управлять плотностью и энергией потоков ионов, формирующих покрытие на подложке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00627, <https://rscf.ru/project/22-29-00627/>.

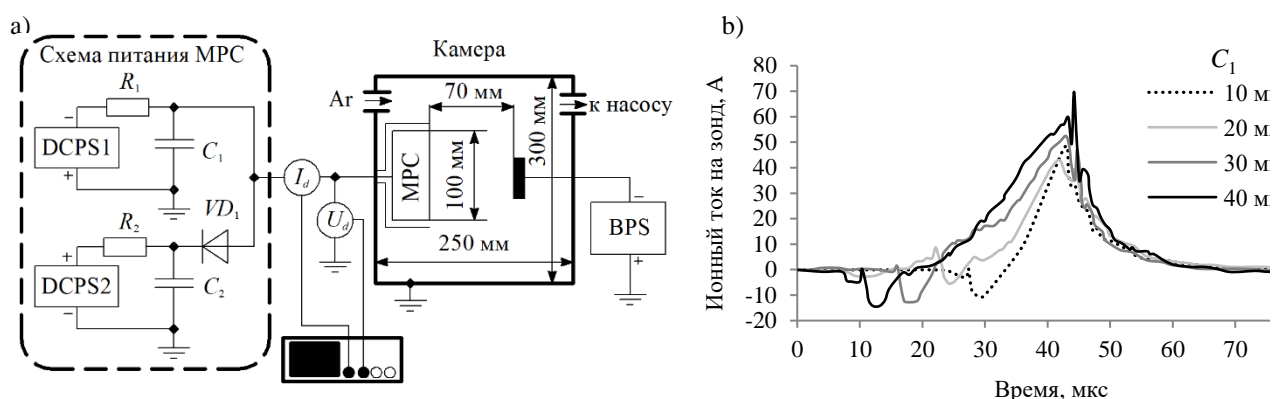


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования биполярного дугового распыления углерода (а); осциллограмма ионного тока на зонд (б).

Список литературы

1. Оскомов К.В., Соловьев А.А., Работкин С.В. Твердые углеродные покрытия, наносимые методом импульсного сильноточного магнетронного распыления // Журнал технической физики. - 2014. -Т. 84, выпуск 12. - С. 73-76.

Н.О. САВВИН, А.Е. ЕВСИН, И.Д. ЖДАНОВ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОКСИДИРОВАНИЯ И НАВОДОРОЖИВАНИЯ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОТОКА**

В работе исследуются закономерности оксидирования и наводороживания сплава Э110 в газовых средах  $Ar + O_2$  и  $Ar + H_2O$  при облучении электронами с различной плотностью потока. Показано, что в обоих случаях оксидирование сплава Э110 происходит по линейному закону со скоростью, возрастающей с увеличением потока электронов. Выдвинуто предположение о зависимости характера наводороживания сплава Э110 от соотношения скоростей роста оксидного слоя и его гидратации.

N.O. SAVVIN, A.E. EVSIN, I.D. ZHDANOV, I.E. KONDRATIEV, L.B. BEGRAMBEKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **FEATURES OF OXIDATION AND HYDROGENATION OF ZIRCONIUM ALLOY E110 UNDER IRRADIATION WITH ELECTRONS OF VARIOUS FLUXES**

The features of oxidation and hydrogenation of the E110 alloy in  $Ar + O_2$  and  $Ar + H_2O$  gas ambient under irradiation with electrons of various fluxes are studied in this work. It is shown that in both cases the oxidation of the E110 alloy proceeds according to a linear law with a rate that increases with an increase in the electron flux. An assumption was made about the dependence of the E110 hydrogenation nature on the ratio of the oxide layer growth rate to the rate of its hydroxylation.

Циркониевые оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) легководных реакторов подвергаются коррозии и наводороживанию под воздействием водного теплоносителя. Для повышения их ресурса разрабатываются новые сплавы, методы обработки поверхности и защитные покрытия, что требует проведения многочисленных дореакторных испытаний. Традиционные испытания, заключающиеся в выдержке образцов в воде или паре, занимают многие тысячи часов, тормозя, таким образом, развитие всех работ, направленных на повышение ресурса оболочек ТВЭЛ. В связи с этим ощущается острая потребность в создании метода ускоренных испытаний на стойкость к коррозии и наводороживанию. Ранее было показано, что облучение электронами позволяет ускорить как оксидирование циркониевых сплавов, так и поглощение ими водорода. Целью данной работы было исследовать закономерности оксидирования и наводороживания циркониевого сплава Э110 под действием электронного облучения.

Из трубки сплава Э110 (Zr-1%Nb) диаметром 9.1 мм и толщиной стенки 1.4 мм были вырезаны четвертные сегменты длиной 8 мм, которые использовались в качестве исследуемых образцов. Образцы облучались потоками электронов ( $E = 400$  эВ) различной плотности ( $j = 0.8$  мА/см<sup>2</sup>; 4 мА/см<sup>2</sup>) в газовых смесях  $Ar + 25\%H_2O$  и  $Ar + 25\%O_2$  ( $P = 1 \cdot 10^{-3}$  Торр) при температуре 400°C в течение 2–20 ч. Для сравнения часть образцов выдерживались в тех же газовых средах при тех же условиях, но без облучения. До и после каждого эксперимента образцы взвешивались на микровесах AND BM-20 с точностью 1 мкг для определения коррозионного привеса. Количество водорода в образцах и характер его удержания анализировались методом термодесорбционной спектрометрии (ТДС).

Эксперименты показали, что в отличие от параболической кинетики оксидирования, наблюдаемой при выдержке сплава Э110 в газовых средах  $Ar + O_2$  и  $Ar + H_2O$ , при облучении электронами в этих средах оксидирование сплава происходит по линейному закону. Линейная кинетика процесса обусловлена созданием электрического поля в растущем оксидном слое и дрейфом в нем ионов кислорода. При облучении в  $Ar + O_2$  и  $Ar + H_2O$  сплав Э110 оксидировался примерно с одинаковой скоростью. Следовательно, диэлектрические свойства оксидных слоев, выращенных в этих условиях, примерно одинаковы. Увеличение плотности потока электронов привело к ускорению оксидирования, предположительно, из-за возрастания величины заряда, накапливающегося на поверхности.

При изучении характера наводороживания циркониевого сплава под действием электронного облучения в газовой среде  $Ar + H_2O$  было обнаружено, что кинетика этого процесса имеет сходство с тем, что наблюдается при выдержке в паре: вначале идет «инкубационная» стадия, когда захват водорода не происходит, а затем наступает период интенсивного наводороживания. Однако, в отличие от выдержки в паре, при электронном облучении наблюдается еще и третья стадия, когда содержание водорода в металле выходит на насыщение. Уровень насыщения не зависит от плотности потока электронов, но эта стадия наступает раньше при более интенсивном облучении.

Сравнительный анализ ТДС-спектров водорода и кинетики оксидирования сплава Э110 при выдержке в газовой среде  $Ar + H_2O$  и при электронном облучении в этой среде позволил сделать предположение о том, как соотношение скоростей роста оксидного слоя и его гидратации влияет на процесс проникновения сквозь него водорода. Если оксидирование происходит медленно, то растущий оксидный слой постепенно насыщается гидроксильными группами, и, когда их концентрация превышает некоторое пороговое значение, происходит интенсивное проникновение водорода сквозь гидратированный оксидный слой. Если же оксидирование происходит быстро, по сравнению со скоростью гидратации оксидного слоя, то растущий оксидный слой не успевает накопить в себе достаточное количество гидроксидов для того, чтобы обеспечить проникновение водорода в металл.

С.М. СОРОКИН, А.Е. ЕВСИН, С.М. МУРОМСКИЙ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, А.М. ЗАХАРОВ,  
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОДАВЛЕНИЯ ДИФФУЗИИ АЛЮМИНИЯ В СТАЛЬ ИЗ НАПЫЛЕННОГО В ПЛАЗМЕ АЛЮМОСОДЕРЖАЩЕГО ПОКРЫТИЯ**

В работе исследовались возможности подавления диффузии алюминия из покрытия Fe-Cr-Al в сталь путем создания подслоя между сталью и покрытием. Показано, что подслои Fe-Cr-W препятствуют диффузии алюминия в сталь, однако является хрупким и имеет ограниченный ресурс. Подслои Ni-Al лишены этих недостатков и эффективно удерживают в себе алюминий до тех пор, пока не насытятся им до соотношения Ni/Al  $\approx$  50%/50%.

S.M. SOROKIN, A.E. EVSIN, S.M. MUROMSKIY, I.E. KONDRATIEV, A.M. ZAKHAROV,  
L.B. BEGRAMBEKOV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **A STUDY ON THE POSSIBILITIES OF SUPPRESSING THE DIFFUSION OF ALUMINUM FROM THE DEPOSITED IN PLASMA AL-CONTAINING COATING INTO THE STEEL**

The possibilities of suppressing the diffusion of aluminum from the Fe-Cr-Al coating into steel by creating a sublayer between the steel and the coating were studied. It is shown that the Fe-Cr-W sublayer prevents the diffusion of aluminum into steel, however, it is brittle and has a limited lifetime. The Ni-Al sublayer is devoid of these disadvantages and effectively retains aluminum until it is saturated with it to a Ni/Al ratio of  $\approx$  50%/50%.

Стальные оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем подвергаются коррозии в потоке кислородсодержащего расплава свинца. Одним из вариантов защиты оболочек от коррозии является нанесение на их поверхность самовозобновляемого защитного покрытия Fe-Cr-Al. Известно, что при контакте с кислородсодержащим расплавом свинца на поверхности этого покрытия образуется слой  $Al_2O_3$ , который не растворяется в свинце и, в отличие от оксида на поверхности стали, не подвержен интенсивному росту в условиях эксплуатации оболочек ТВЭЛов. Вместе с тем, покрытие Fe-Cr-Al имеет существенный недостаток: при эксплуатационной температуре оболочек ТВЭЛов алюминий, обеспечивающий покрытие защитными свойствами, диффундирует в сталь, обедняя собой поверхность. В данной работе рассматривались два подхода для предотвращения ухода Al из покрытия Fe-Cr-Al в сталь, основанные на создании подслоя между сталью и покрытием: а) подслои являются диффузионным барьером для Al; б) подслои являются алюминидом с высокой энергией связи.

В качестве образцов использовались четвертные сегменты оболочки ТВЭЛА из стали ЭП-823 длиной 8 мм. На образцы в аргоновой плазме несамостоятельного разряда напылялись подслои различного состава толщиной 1 мкм. В качестве диффузионного барьера для Al исследовались подслои Fe-Cr-W (до 25 ат. % W), поскольку известно, что наличие вольфрама в стали замедляет проникновение в нее алюминия. Возможность удержания алюминия с помощью алюминидов с высокой энергией связи изучалась с применением подслоев Ni и Ni-Al (Ni/Al = 50%/50%). На подслои напылялись покрытия Fe-Cr-Al (Fe/Al = 25%/75%) толщиной 2 мкм. После напыления часть образцов выдерживалась в атмосфере аргона при 600°C в течение 500 ч. Поверхности всех образцов и их поперечные шлифы анализировались методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа.

Эксперименты показали, что за время термических испытаний покрытий Fe-Cr-Al без подслоя большая часть алюминия уходит из покрытия в сталь. При этом в покрытии появляются поры и пустоты, вызванные эффектом Киркендэлла. Использование подслоя Fe-Cr-W, содержащего 25 ат. % W, позволило полностью подавить диффузию алюминия из покрытия Fe-Cr-Al в сталь в масштабах испытаний. Однако, как показал анализ шлифа образца после испытаний, профиль распределения W заметно уширился, что свидетельствует об ограниченном ресурсе подслоя Fe-Cr-W, обусловленном диффузией вольфрама. Кроме того, при столь высоких содержаниях W в подслое Fe-Cr-W, этот подслои становится хрупким, в результате чего в нем появляются трещины.

Термические испытания подслоя Ni-Al без покрытия Fe-Cr-Al показали полное отсутствие диффузии алюминия из подслоя в сталь. Никаких дефектов и изменений структуры подслоя в результате прогрева также не обнаружено. При использовании подслоев Ni и Ni-Al совместно с покрытием Fe-Cr-Al оказалось, что алюминид никеля не пропускает алюминий из Fe-Cr-Al в сталь до тех пор, пока не насытится до определенной степени (Ni/Al  $\approx$  50%/50%). При этом до момента насыщения алюминид никеля происходит не только диффузия Al из покрытия Fe-Cr-Al в подслои Ni-Al, но и обратная диффузия Ni из этого подслоя в покрытие Fe-Cr-Al. После насыщения алюминидом никеля перестает препятствовать его диффузии из Fe-Cr-Al сквозь себя в сталь.

В целом, алюминид никеля представляется более эффективным способом удержания алюминия вблизи поверхности, контактирующей с кислородсодержащим расплавом свинца, по сравнению с комбинацией подслоя Fe-Cr-W и покрытия Fe-Cr-Al. Однако, по-видимому, более целесообразно применение алюминидов никеля (или другого алюминидов с высокой энергией связи) не в качестве подслоя, а в составе самого защитного покрытия.



А.С. ИСАКОВА, А.Е. ЕВСИН, С.М. МУРОМСКИЙ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, А.М. ЗАХАРОВ,  
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ FE-CR-ME (ME = AL, ZR),  
НАНЕСЕННЫХ В ПЛАЗМЕ НА ФРАГМЕНТЫ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭП-  
823**

Проведено сравнительное исследование структуры покрытий Fe-Cr-Me (Me = Al, Zr), напыленных в плазме на фрагменты оболочек твэлов из стали ЭП-823, а также изменений, происходящих в этих покрытиях при эксплуатационной температуре оболочек твэлов. Показано, что при плазменном осаждении покрытия Fe-Cr-Zr, в отличие от Fe-Cr-Al, в нем не формируется столбчатая структура, а при длительном прогреве (600°C, 500 ч) Zr, в отличие от Al, не диффундирует из покрытия в сталь.

A.S. ISAKOVA, A.E. EVSIN, S.M. MUROMSKIY, I.E. KONDRATIEV, A.M. ZAKHAROV,  
L.B. BEGRAMBEKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

**COMPARATIVE STUDY OF FE-CR-ME (ME = AL, ZR) COATINGS DEPOSITED IN PLASMA  
ON THE CLADDING TUBE FRAGMENTS MADE OF EP-823 STEEL**

A comparative study of the structure of Fe-Cr-Me (Me = Al, Zr) coatings deposited in plasma on the cladding tube fragments made of EP-823 steel is carried out. The changes occurring in these coatings at the operating temperature of fuel claddings are studied as well. It is shown that during plasma deposition of the Fe-Cr-Zr coating, in contrast to Fe-Cr-Al, a columnar structure is not formed. At the same time, during prolonged heating (600°C, 500 h), Zr, unlike Al, does not diffuse from the coating into the steel.

Коррозия стальных оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов) в свинцовом теплоносителе является проблемой, стоящей на пути развития перспективных реакторов типа «БРЕСТ». Одно из возможных решений проблемы – нанесение на оболочки твэлов самовозобновляемого защитного покрытия, включающего в себя компоненты стали и более активный, по сравнению с ними, металл. На примере Fe-Cr-Al было показано, что такое покрытие при контакте с кислородсодержащим расплавом свинца образует на своей поверхности оксид наиболее активного компонента. Слой этого оксида, во-первых, не растворяется в свинце, а во-вторых, в отличие от оксида на поверхности стали, не подвержен интенсивному росту при эксплуатационных условиях оболочек твэлов. В данной работе исследуется структура напыленных в плазме покрытий Fe-Cr-Me, содержащих различные активные металлы (Me = Al, Zr), а также изменения, происходящие в этих покрытиях при эксплуатационной температуре оболочек твэлов реактора типа «БРЕСТ».

В качестве образцов использовались четвертные сегменты оболочки твэла из стали ЭП-823 длиной 8 мм. На образцы в аргоновой плазме самостоятельного разряда напылялись покрытия Fe-Cr-Al и Fe-Cr-Zr толщиной 2 мкм при различных температурах (420, 455°C) и различных соотношениях Fe/Al и Fe/Zr (75%/25%, 50%/50% и 25%/75%). После напыления покрытий часть образцов выдерживалась в атмосфере аргона при 600°C в течение 500 ч. Поверхности всех образцов и их поперечные шлифы анализировались методами растровой электронной микро-скопии и энергодисперсионного анализа.

Эксперименты показали, что покрытия Fe-Cr-Al с Fe/Al = 25%/75%, напыленные при температуре 455°C, характеризуются столбчатой структурой. Данный тип структуры является крайне неблагоприятным с точки зрения защитных свойств, поскольку допускает проникновение расплава свинца в сталь между колоннами, из которых состоит покрытие. Формирование столбчатой структуры, по-видимому, обусловлено особенностями микро-структуры образующегося в этих условиях алюминиды железа. Избежать формирования столбчатой структуры удавалось при снижении температуры напыления до 420°C или уменьшении содержания алюминия в покрытии до Fe/Al = 75%/25%. При напылении покрытий Fe-Cr-Zr столбчатая структура не формировалась в исследуемом диапазоне температур ни при одной из исследуемых концентраций циркония.

Термические испытания покрытий Fe-Cr-Al при эксплуатационной температуре оболочек твэлов показали, что соотношение Fe/Al в покрытиях резко увеличивается из-за диффузии Al в сталь. Это сопровождается появлением дефектов в покрытии: при отсутствии столбчатой структуры развиваются поры Киркендэлла, а при ее наличии увеличиваются промежутки между колоннами. Аналогичные испытания покрытий Fe-Cr-Zr не приводили к диффузии Zr в сталь и изменению структуры покрытий. Вместе с тем, в покрытиях Fe-Cr-Zr в результате термического воздействия произошло перераспределение Fe и Zr и образование слоев с различными соотношениями Fe/Zr, которые предположительно обусловлены стехиометрией определенных фаз цирконидов железа.

Проведенное сравнительное исследование показало, что по ряду характеристик использование циркония в качестве активного металла в составе защитного покрытия для стальных оболочек твэлов выглядит предпочтительнее, по сравнению с использованием алюминия. Вместе с тем, для однозначного выбора покрытия необходимо проведение сравнительных коррозионных испытаний покрытий Fe-Cr-Al и Fe-Cr-Zr и анализ особенностей образования оксидного слоя на поверхности этих покрытий при контакте с кислородсодержащим расплавом свинца.

## ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Построена аналитическая теория взаимодействия легких ионов (изотопы водорода, ионы гелия) с твердым телом, справедливая в широком интервале энергии (от десятков до тысяч эВ) и для любой геометрии рассеяния. Проанализированы условия применимости существующих аналитических теорий. Проведено сравнение результатов аналитического расчета с экспериментальными данными и данными численного моделирования. Показано абсолютно верное качественное описание данных экспериментов и численного моделирования с помощью представляемой аналитической теории, указаны причины количественного несоответствия.

V.P. AFANAS'EV, L.G. LOBANOVA

*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia*

## PROBLEMS OF LIGHT IONS INTERACTION WITH THE SURFACE OF SOLID STATE

An analytical theory of light ions (hydrogen isotopes, helium ions) interaction with solid state, which is valid in a wide energy range (from tens to thousands of eV) and for any scattering geometry, is constructed. The conditions of existing analytical theories applicability are analyzed. The comparison of analytical calculations with experimental and computer modeling data is carried out. An absolutely correct qualitative description of the experimental and computer modeling data using the present analytical theory is shown, the reasons of quantitative discrepancy are pointed out.

Изучение процессов взаимодействия легких ионов с твердым телом необходимо для понимания и анализа ситуаций, происходящих с поверхностью, обращенной к термоядерной плазме в установках УТС. Актуальность данной темы также обусловлена широким применением легких ионов для анализа поверхности твердого тела с помощью таких методов как, Ion Scattering Spectroscopy, Rutherford Back Scattering, Low Energy Ion Spectroscopy, Medium Energy Ion Spectroscopy. Для оценки скорости эрозии поверхности под воздействием потоков легких ионов, для количественной интерпретации вышеупомянутых методов анализа поверхности необходимо знать интегральные и дифференциальные характеристики рассеяния, такие как, коэффициенты отражения частиц и энергии, энергетические и угловые распределения.

Существующие в настоящее время аналитические теории не способны описать взаимодействие легких ионов с твердым телом во всем интервале энергии и для произвольной геометрии рассеяния. Например, модель однократного рассеяния или Straight Line Approximation с удовлетворительной точностью описывает взаимодействие ионов с энергией, больших МэВ. Теория Фирсова [1] описывает взаимодействие ионов с твердым телом в случае скользящей геометрии рассеяния, наоборот, теория Бете [2] удовлетворительно описывает данные процессы при зондировании ионами мишени в направлении нормали к поверхности.

Аналитическая теория, представленная в настоящей работе, описывает взаимодействие легких ионов с твердым телом в широком интервале энергии (от десятков до тысяч эВ) и для любой геометрии рассеяния. Данная теория основана на решении граничных задач для уравнения переноса методом инвариантного погружения в малоугловом приближении. Гипотеза Ферми, согласно которой рассеяние частиц можно рассматривать как рассеяние по двум независимым каналам – упругое и неупругое, позволяет отдельно решать задачу для уравнения упругого и неупругого переноса. В настоящей работе решение граничной задачи для уравнения упругого переноса получено методом ОКГ, успешно применяемым в задачах электронного рассеяния [3]. Решение данной задачи апробировано на основе сравнения с данными компьютерного моделирования для мишеней из Be, Cu, W. Получено удовлетворительное качественное и количественное соответствие. Неупругие потери энергии легких ионов традиционно описываются в приближении Фоккера-Планка [1]. В работе проведено сравнение экспериментальных энергетических спектров для мишени из Be, Cu, W, Au с результатами аналитического решения. Получено абсолютно верное качественное описание. Количественное несоответствие связывается с неприменимостью приближения Фоккера-Планка для описания неупругих потерь энергии ионов с энергией, меньших сотен кэВ. Решение Фоккера-Планка основано на знании лишь двух моментов сечения неупругого рассеяния ионов в твердом теле – средние потери энергии ионов на единице длины (stopping power) и средний квадрат потерь энергии ионов на единице длины (straggling). В работе показано, что величина stopping power, известная для большинства элементов с погрешностью, достигающей сотни процентов [4], не способна дать адекватное количественное описание неупругих потерь энергии ионов в твердом теле.

Исследование проведено в рамках государственного задания № FSWF-2023-0016.

### *Список литературы*

1. Калашников Н.П., Ремизович В.С., Рязанов М.И. Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах М., Атомиздат, 1980, с. 272.
2. Рязанов М.И., Тилинин И.С. Исследование поверхности по обратному рассеянию частиц М., Энергоатомиздат, 1985, с. 150.
3. Afanas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S. // J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. 2016. Vol. 210, P. 16–29.
4. Andersen H.H., Ziegler J.F. Hydrogen stopping powers and ranges in all elements N.Y., Pergamon Press, 1977.

Ю. ВАН<sup>1</sup>, З. Р. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>, Ю. М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, Д. Н. СИНЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>,  
Н. Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, С. ТАН<sup>2</sup>, Н. С. УМЕРЕНКОВА<sup>1</sup>, С. А. ГВИНДЖИЛИЯ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Хэфэйский технологический университет «HFUT», Хэфэй, Китай

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В W-Cr-Y СПЛАВЕ

Захват изотопов водорода в стенках ТЯР считается серьезной проблемой безопасности и может уменьшить срок эксплуатации реактора. По сравнению с ИТЭР, материал первой стенки реактора ДЕМО будет подвергаться более высоким потокам частиц и нейтронного облучения [1,2]. Поэтому сейчас активно разрабатываются разные облицовочные материалы первой стенки ТЯР на основе вольфрама. Одним из наиболее перспективным материалом для защиты первой стенки ДЕМО является вольфрамовый сплав W-11.4Cr-0.6Y [3]. Накопление изотопов водорода в таких сплавах было исследовано в работах [4,5]. В данной работе представлены результаты влияния отжига на захват дейтерия в сплаве W-11.4Cr-0.6Y.

Y. WANG<sup>1</sup>, Z. R. HARUTYUNYAN<sup>1</sup>, Y. M. GASPARYAN<sup>1</sup>, D. N. SINELNIKOV<sup>1</sup>,  
N. E. EFIMOV<sup>1</sup>, X. TAN<sup>2</sup>, N. S. UMERENKOVA<sup>1</sup>, S. A. GVINDZHILIY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Hefei University of Technology (HFUT), Hefei, China

## THE IMPACT OF ANNEALING ON DEUTERIUM RETENTION IN W-Cr-Y ALLOY

The retention of hydrogen isotopes in the walls of thermonuclear reactor is considered a serious problem of radiation safety and can reduce the life of the reactor. Compared to ITER, the first-wall material of the DEMO reactor will be subjected to higher fluxes of particles and neutron irradiation [1,2]. Therefore, different plasma-facing materials for the first wall of fusion reactors based on tungsten are being actively developed. One of the most promising materials for protecting the first wall of DEMO is W-11.4Cr-0.6Y tungsten alloy [3]. This paper presents the results of the influence of high-temperature annealing on deuterium retention in the W-11.4Cr-0.6Y alloy.

Эксперименты проводились на высоковакуумной установке МЕДИОН, позволяющей облучать образцы масс-сепарированным пучком ионов дейтерия, затем проводить in-situ термодесорбционный анализ (ТДС). Образцы сплава W-11.4Cr-0.6Y размерами 10×10×1 мм (производство Китай) отжигались при температурах в интервале 1000-1473 К, затем проводился анализ поверхности методом LEIS (спектроскопия рассеяния медленных ионов) для определения элементного состава на поверхности. Потом образцы были облучены ионами D<sub>3</sub><sup>+</sup> с энергией 2 кэВ (667эВ/D) дозой 5×10<sup>19</sup> D/м<sup>2</sup> при комнатной температуре на установке МЕДИОН. ТДС анализ проводился со скоростью 2 К/с до температуры 1050 К. Выход дейтерия регистрировался квадрупольным масс-спектрометром QMS 200 Pfeiffer.

Концентрация хрома на поверхности образцов до отжига была анализована методом LEIS и составила 67-75 ат.%. После отжига при температуре 1050 К в течение 10 часов концентрация хрома на поверхности сплава W-11.4Cr-0.6Y увеличилась до максимального значения 99%. А после отжига при 1250 К и больше, концентрация хрома на поверхности быстро уменьшается.

Все образцы отжигались при 1000 К на 5 мин в вакууме до экспериментов, чтобы уменьшить влияние фоновых сигналов QMS на получение качественных ТДС спектров. При отжиге 1050 К в течение нескольких часов амплитуда пика ТДС спектра уменьшается, что связано с процессами изменения концентрации хрома. А при более высоких температурах отжига (1250 К и выше), изменение микроструктуры сплава начинает влиять на захват дейтерия и играет более доминирующую роль чем изменение концентрации хрома.

### Список литературы

1. A.S. Kukushkin, A. Loarte, M. Merola, et. al // J. Nucl. Mater. 2013. 438, 48–S56.
2. J.-H. You // Nucl. Fusion. 2015. 55, 113026.
3. A. Litnovsky, F. Klein, J. Schmitz, et. al // Fusion Eng. Des. 2018. 136, 878–882.
4. H. Maier, T. Schwarz-Selinger, R. Neu, et. al // Nucl. Mater. Energy. 2019. 18, 245–249.
5. Z. Harutyunyan, Y. Gasparyan, V. Efimov, et. al // Vacuum. 2022. 199, 110956.

## НЕКОТОРЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕКОМБИНАЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА С ПОВЕРХНОСТИ W(100): ИССЛЕДОВАНИЕ DFT

В рамках метода теории функционала плотности проводится анализ процессов рекомбинации и десорбции атомов водорода, расположенных на поверхности и в подповерхностных слоях вольфрама. Данные явления активно исследуются и важны для понимания взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерных реакторов.

N.N.DEGTYARENKO, K.S.GRISHAKOV, A.A.PISAREV, Y.M.GASPARYAN  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SOME PROCESSES OF RECOMBINATION AND DESORPTION OF HYDROGEN FROM W(100) SURFACE: A DFT STUDY

Within the framework of the density functional theory method, the processes of recombination and desorption of hydrogen atoms located on the surface and in the subsurface layers of tungsten are analyzed. These phenomena are being actively studied and are important for understanding the interaction of plasma with the first wall of thermonuclear reactors.

Процессы рекомбинации и десорбции водорода с поверхности вольфрама зависят от большого числа условий. В частности, от потока междоузельных атомов водорода на поверхность, степени покрытия поверхности адсорбированными атомами водорода  $\theta$ , от состояния поверхности вольфрама и температуры [1– 4]. В работе моделирование этих процессов на атомистическом уровне проведено на основе теории функционала плотности DFT [5].

При малой степени покрытия  $\theta$  на поверхности присутствуют преимущественно уединенные атомы или энергетически менее выгодные группы атомов – зародыши кластеров той или иной конфигурации. Для  $\theta < 1$  сближение адсорбированных атомов наиболее вероятно при их движении вдоль поверхности.

В данной работе в рамках *ab initio* моделирования показано, что:

1. Энергии активации десорбции одного уединенного атома водорода с атомно-гладкой поверхности W(100) для исходной поверхности вольфрама (3.25 эВ) и для реструктурированной поверхности (3.24 эВ) совпадают.

2. При малой заселенности поверхности и малом расстоянии между двумя атомами порядка 2.32 Å (расстояние между ближайшими оптимизированными позициями адсорбированных атомов) возможны коррелированные колебания двух атомов перпендикулярно поверхности с частотой  $\nu \approx 30$  ПГц, что соответствует выходу пары атомов водорода с поверхности вольфрама в виде молекулы H<sub>2</sub>. Энергии активации десорбции в этом случае составляет  $\varepsilon_d \approx 1.85$  эВ. При больших расстояниях между атомами водорода на поверхности десорбция возможна после сближения атомов водорода вдоль поверхности (энергия активации диффузии вдоль поверхности 0.24÷ 0.5 эВ) до расстояния порядка 2.32 Å.

3. При увеличении числа адсорбированных атомов на поверхности появляются кластеры - зародыши сплошного покрытия, которые на этапе начального роста имеют одномерную структуру. В спектре колебаний линейного эквидистантного кластера из 4 атомов водорода появляются две моды с частотой  $\nu \approx 32$  ГГц, которые не наблюдаются в случае 4 удаленных друг от друга атомов водорода. В одной из них два внутренних атома линейного кластера колеблются одновременно и синфазно, собственные векторы их смещений перпендикулярны поверхности. В остальных модах векторы смещений атомов в большей степени соответствуют колебаниям в антифазе относительно друг друга вдоль поверхности. Синфазные колебания двух атомов перпендикулярно поверхности приводят к десорбции молекулы H<sub>2</sub> с энергией активации  $\varepsilon_d \approx 1.56$  эВ, что меньше, чем при десорбции при  $\theta < 1$ .

4. При сплошном заселении поверхности  $\theta=1$  энергия активации десорбции молекулы H<sub>2</sub>  $\varepsilon_d \approx 0.88$  эВ, что соответствует результату [4]. Выход атомов водорода создает пустые места в сплошном покрытии.

5. Атомы водорода, находящиеся под поверхностью могут выйти в первый подповерхностный слой под ограниченный по размерам кластер вблизи его границы. В случае, если вблизи места выхода нет свободных мест на поверхности, подповерхностный атом вытесняет поверхностный атом H во второй слой, межатомное расстояние между ними сокращается. Эта пара атомов выходит из зоны хемосорбции с энергетическим барьером десорбции  $\varepsilon_d \approx 0.65$  эВ, образуя молекулу H<sub>2</sub>. В случае же наличия в области выхода пустых мест в теле или на границе кластера, подповерхностный атом может реадсорбироваться, увеличивая число атомов в кластере.

### Список литературы

- [1] M.S. Zibrov and others // Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. 38 (2015) 32–41.
- [2] J. Guterl and others // J. Nucl. Mater. 463 (2015) 263–267.
- [3] Zachary A. Piazza and others // Journal of Phys. Chem. C 125(29) (2021) .
- [4] M Ajmalghan and others // Nuclear Fusion, 2019, 59 (10), pp.106022. (hal-02879798).
- [5] Giannozzi P and others // 2009 J. Phys.: Condens. Matter 21 395502.

Д.Н. СОВЫК, Ю.М. КРЫЛОВ, В.Ю. ЮРОВ, И.А. ФЁДОРОВА, А.П. БОЛЬШАКОВ, В.Г. РАЛЬЧЕНКО

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

## ТРАВЛЕНИЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ В ПРИСУТСТВИИ КИСЛОРОДА: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ

Для интерпретации экспериментальных данных об аномальном влиянии добавки кислорода на замедление травления диоксида кремния в СВЧ плазме определён круг химических реакций, протекающих в плазме и на границе раздела твёрдой фазы и плазмы. Представлены результаты расчёта констант равновесия около 30 возможных прямых реакций при температурах 800°C и 1200°C методами Киреева и Тёмкина-Шварцмана, недостающие данные восполнены по Чейзу. Наблюдаемое влияние кислорода на ингибирование травления SiO<sub>2</sub> в водородной плазме с точки зрения химической термодинамики объясняется тем, что изменения химических потенциалов окислительных (SiH<sub>4</sub> → SiO<sub>2</sub>) реакций в системе SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> намного больше по модулю, чем восстановительных (SiO<sub>2</sub> → SiH<sub>4</sub>) реакций на всех стадиях.

D.N. SOVYK, YU.M. KRYLOV, V.YU. YUROV, I.A. FEDOROVA, A.P. BOLSHAKOV, V.G. RALCHENKO

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## HYDROGEN PLASMA ETCHING OF SILICON DIOXIDE IN THE PRESENCE OF OXIGEN: THERMODYNAMIC CALCULATIONS

A range of chemical reactions occurring in plasma and at the interface of the solid phase and plasma has been determined to interpret experimental data on the abnormal effect of oxygen addition on inhibition of etching of silicon dioxide in microwave plasma. The results of calculating the equilibrium constants of about 30 possible direct reactions at temperatures of 800°C and 1200°C by the Kireev and Temkin-Schwartzman methods are presented, the missing data are filled up by the Chase method. The observed effect of oxygen on the inhibition of SiO<sub>2</sub> etching in hydrogen plasma according to thermodynamics is explained by the fact that changes in the chemical potentials of oxidative (SiH<sub>4</sub> → SiO<sub>2</sub>) reactions in the SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> system are much greater in modulus than the reduction (SiO<sub>2</sub> → SiH<sub>4</sub>) reactions at all stages.

Очистку поверхности диоксида кремния в водородной плазме достаточно широко используют в электронике и оптике. Недостатками данного процесса является как восстановление поверхности кварцевого стекла до SiO<sub>x</sub> (x<2), что приводит к снижению оптического пропускания, росту проводимости и показателя преломления, так и увеличение шероховатости при травлении. При темплатном синтезе алмаза в порах опаловой матрицы данный процесс также является паразитным, приводя к удалению состоящих из SiO<sub>2</sub> шаров опала – темплата. Для устранения этих недостатков недавно было предложено вводить в плазму небольшое (до 1%) количество кислорода. Если при травлении в водородной СВЧ плазме (частота магнетрона 2,45 ГГц) энергия активации E<sub>a</sub>=128 кДж/моль, то при добавке 0,4% кислорода E<sub>a</sub> растёт до 276 кДж/моль [1]. Так, например, при температуре 1200°C скорость травления диоксида кремния снижается в 7 раз, если ввести в водородную плазму всего лишь 0,8% кислорода.

Для объяснения данного эффекта были проведены термодинамические расчёты 31 химической реакции в системе SiO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, протекающих в газовой фазе и на границе её раздела с твёрдой фазой при температурах 800°C и 1200°C, для которых методом низкокогерентной интерферометрии недавно нами были измерены [1] зависимости скорости травления от (а) температуры и (б) концентрации кислорода. Значения термодинамических функций – энтальпии, энтропии, энергии Гиббса (ΔG) – для различных реагентов: водорода, кислорода, диоксида кремния и частиц, на которые они распадаются в плазме (радикалы, катионы, анионы) – при данных температурах были вычислены на основе справочных данных [2,3]. Значения теплоёмкости мы нашли методом Тёмкина-Шварцмана [2], а изменение энергии Гиббса в ходе реакций – методом Киреева [4]. Недостающие данные восполнены по Чейзу [3]. Вычисленные константы равновесия выявили наиболее вероятные пути восстановления SiO<sub>2</sub> водородной плазмой до SiH<sub>4</sub> или окисления Si (промежуточный реагент, наблюдаемый экспериментально [1] в спектрах оптической эмиссии) до SiO<sub>2</sub> плазмой в присутствии O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и производных от них радикалов ·O и ·OH.

Проведённые расчёты показали, что наиболее вероятный путь восстановления/травления водородом SiO<sub>2</sub> до SiH<sub>4</sub> протекает в три стадии: SiO<sub>2</sub>(s) + 2H·(g) = SiO(s) + H<sub>2</sub>O(g), SiO(s) + 2H·(g) = Si(s) + H<sub>2</sub>O(g), Si(s) + 4H·(g) = SiH<sub>4</sub>(g). В свою очередь, наиболее вероятный путь окисления кислородом SiH<sub>4</sub> до SiO<sub>2</sub> протекает в основном по механизму: SiH<sub>4</sub> + 2O· = Si + 2H<sub>2</sub>O, Si + 2HO· = SiO + H<sub>2</sub>O, 2SiO + O<sub>2</sub> = 2SiO<sub>2</sub>. На всех трёх стадиях изменения химических потенциалов (или ΔG) окислительных реакций намного больше по модулю, чем восстановительных реакций – окисление SiH<sub>4</sub>-Si-SiO<sub>x</sub> кислородом термодинамически выгоднее восстановления SiO<sub>2</sub>-SiO-Si водородом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00403.

*Список литературы*

1. V.Yu. Yurov, A.P. Bolshakov, I.A. Fedorova and others // Appl. Surf. Sci. 2023. Vol. 612, No. 155834.
2. А.А. Равдель и А.М. Пономарева (ред.) // Краткий справочник физико-химических величин. 2002.
3. Chase, M.W., Jr. // NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition. J. Phys. Chem. Ref. Data. Monograph 9. 1998. 1-1951.
4. Киреев В.А. // Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. М.: Химия, 1975.

С.А. КРАТ<sup>1</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, Д.А. БУТНЯКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup> Фрязинский филиал государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук, Фрязино, Московская область, 141190, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА РАСПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА В ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СМЕЩЕНИЕМ МИШЕНИ

Построена компьютерная модель экспериментальной установки с новым типом распылительной системы на основе разряда с полым катодом с плоскими электродами и дополнительным смещением мишени, учитывающая диффузионные и конвективные потоки и рассчитывающая скорость осаждения на подложку распыляемого материала.

S.A. KRAT<sup>1</sup>, I.A. SOROKIN<sup>1,2</sup>, D.A. BUTNYAKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow oblast, 141190, Russia

## MODELING OF SPUTTERED MATERIAL TRANSPORT IN AN ION-PLASMA SPUTTERING SYSTEM BASED ON A HOLLOW CATHODE DISCHARGE WITH AN EXTRA VOLTAGE BIAS APPLIED ON THE TARGET

A computer model of an experimental facility with a new type of sputtering system based on a hollow cathode discharge with planar electrodes and an extra voltage bias applied on the target is constructed, taking into account diffusion and convective flows and calculating the deposition rate of the sputtered material on the substrate.

Ранее был предложен прототип новой ионно-плазменной распылительной системы (ИПРС) на базе разряда с полым катодом (РПК) с дополнительным смещением мишени [1]. Перспективность исследований ИПРС на основе РПК обуславливается рядом преимуществ [2-4], в частности, сравнимыми с магнетронными скоростями нанесения тонких пленок, равномерным распылением материала с мишени [5], отсутствием магнитного поля, что позволяет работать с ферромагнетиками. Для предлагаемой системы также характерна простая геометрия, позволяющая значительно масштабировать ИПРС.

В работе представлены результаты компьютерного моделирования предложенной системы, выполненное в программной среде COMSOL Multiphysics 6.0. Были сделаны расчеты для двумерной (упрощенной) и трехмерной геометрии, соответствующей прототипу ИПРС. Для оценки тока насыщения ионной эмиссии из плазмы, образующейся между сеткой и мишенью, использовалась формула Бома. Коэффициент выхода нейтралов считался с помощью пакета SRIM. Энергия бомбардирующих ионов считалась равной  $e/U_{dis} + U_{bias}$ , где  $U_{dis}$  – напряжение на сетке,  $U_{bias}$  – дополнительное напряжение смещения на мишени.

Результаты компьютерного моделирования: происходит транспорт вещества в нормально теневые области, на расстоянии примерно трех длин от мишени до сетки наблюдается участок с широкой эквипотенциальной плоскостью, область максимального распыления – на краях мишени. Для двумерной геометрии характерен относительно пологий в центре и резко возрастающий к краям профиль скорости осаждения на подложку.

### Список литературы

- 1 I. A. Sorokin and D. v. Kolodko, "Planar hollow cathode sputtering with asymmetrical voltage supply," Vacuum, vol. 207, p. 111570, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.VACUUM.2022.111570.
- 2 Grigoriev, S. N., Melnik, Y. A., & Metel, A. S. (2013). Gas discharge source of metal vapor and fast gas atoms. Instruments and Experimental Techniques, 56(3), 358–364. doi:10.1134/s0020441213030044.
- 3 Muhl, S., & Pérez, A. (2015). The use of hollow cathodes in deposition processes: A critical review. Thin Solid Films, 579, 174–198. doi:10.1016/j.tsf.2015.02.066.
- 4 V.I. Kolobov, A.S. Metel Glow discharges with electrostatic confinement of fast electrons, J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 233001; https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/23/233001.
- 5 Grigoriev, S. N., Metel, A. S., Volosova, M. A., & Melnik, Y. A. (2015). Deposition of wear-resistant coatings using a combined source of metal atoms and fast gas molecules. Mechanics & Industry, 16(7), 705. doi:10.1051/meca/2015092.

Я.Е. ЖАРКОВ<sup>1</sup>, К.И. РОМАНОВ<sup>1,2</sup>, Е.А. ШЕРШУНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук (ИЭЭ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ В ВОЗДУХЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Исследованы электрические характеристики разряда с микрополым катодом в воздухе при атмосферном давлении. Произведено моделирование разрядного процесса в программе LTSpice. Получены осциллограммы тока и напряжения с применением электрической схемы замещения разряда с микрополым катодом.

Y.E. ZHARKOV<sup>1</sup>, K.I. ROMANOV<sup>1,2</sup>, E.A. SHERSHUNOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Electrophysics and Power Engineering of the Russian Academy of Sciences (IEE RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

## SIMULATION OF MICROHOLLOW CATHODE DISCHARGE IN AIR AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Electrical characteristics of a microhollow cathode discharge (MHCD) in air at atmospheric pressure were studied. The discharge process was simulated in LTSpice software. Current and voltage oscillograms were obtained using equivalent electrical scheme of the MHCD.

Разряд с микрополым катодом является одним из видов разрядов в газе, который возникает между электродами, разделёнными слоем диэлектрика с отверстием. Данный вид разряда находит применение из-за его преимуществ: малой потребляемой мощности и низкого напряжения зажигания, в таких приложениях как нанесение тонких пленок, обработка поверхности, деконтаминация [1–3]. Возрастающая область применения разряда увеличивает потребность в изучении его электрофизических характеристик, которые могут быть получены посредством моделирования разряда с применением электрической схемы замещения, что и является целью данной работы.

Для составления электрической схемы были получены экспериментальные зависимости токов и напряжений для электродной системы с отверстием диаметром 400 мкм при толщине диэлектрика FR4 0,2 мм. Напряжение зажигания в рассматриваемой системе составляло 730 В. Параллельно в программе LTSpice была составлена электрическая схема замещения экспериментальной установки (красный), приведённая на рис. 1, а, включающая источник постоянного напряжения  $U_{\text{ист}}$  750В, зарядное сопротивление  $R_3$  190 кОм и ёмкость электродной системы  $C_r$ , равной 16 пФ. Схема содержит разрядную часть (синий), включающую ключ  $K$  с его эквивалентным сопротивлением 6 кОм, ёмкостью  $C_{\text{п}}$  равной 16,8 пФ и активным сопротивлением  $R_{\text{п}}$  равным 223,5 кОм. Приведённые элементы схемы имитируют процесс генерации заряженных частиц в области разряда (ключ  $K$  и ёмкость  $C_{\text{п}}$ ) с последующей диссипацией объёмного заряда (сопротивление  $R_{\text{п}}$ ). Параметры электрической схемы замещения разрядной части получены посредством экспоненциальной аппроксимации экспериментальных кривых токов и напряжений.

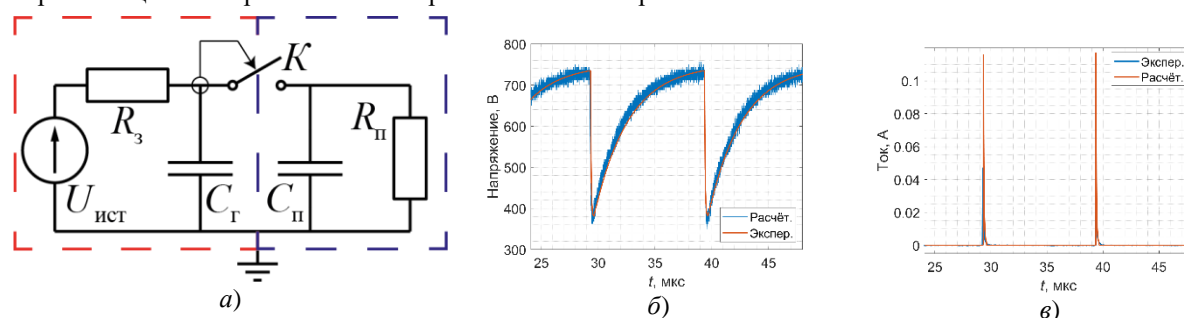


Рис. 1. Электрическая схема замещения разряда (а), экспериментальные и расчётные зависимости напряжений (б) и токов (в)

Из приведённых зависимостей видно, что приведённая схема замещения имеет хорошее совпадение с зарегистрированными экспериментальными кривыми рис. 1, б-в, что говорит о применимости её для анализа прикладных характеристик.

Работа была выполнена при поддержке Минобрнауки РФ.

Список литературы

1. Becker K. H., Schoenbach K. H., Eden J. G. Microplasmas and applications //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2006. – Т. 39. – №. 3. – С. R55.
2. Schoenbach K. H. et al. High-pressure hollow cathode discharges //Plasma Sources Science and Technology. – 1997. – Т. 6. – №. 4. – С. 468.
3. Мошкунов С. И. и др. Условия зажигания самопulsирующего разряда с микрополым катодом в воздухе при атмосферном давлении //Прикладная физика. – 2021. – №. 5. – С. 11.

В.Н. АРУСТАМОВ, И.Х. ХУДАЙКУЛОВ, Б.Р. КАХРАМОНОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Узбекистан, Ташкент.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРУЕМОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА И НАНОСИМЫХ ПОКРЫТИЙ

Работа посвящена изучению пространственного распределения эродированных компонентов потока из катода разгрузки дуги в вакууме. Изучения изменений рассеяния углового рассеяния и распределения тока расположена на пространственной воздействию медного и стального материала в вакуумного дугового разряда.

V.N. ARUSTAMOV, I.KH. KHUDAYKULOV, B.R. KAKHRAMONOV

*Institute of Ion-plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences, Uzbekistan, Tashkent.*

## DETERMINATION OF THE PARAMETERS FOR THE FORMABLE PLASMA FLOW OF A VACUUM ARC AND DISTRIBUTION COATINGS

The work is devoted to the study of the spatial distribution of eroded stream components from the cathode of the arc unloading in vacuum. Studying changes in the scattering of angular scattering and distribution of current is located on the space exposure to copper and steel material in a vacuum arc discharge.

В настоящее время одной из актуальных проблем является сокращение отходов материалов, нанесение покрытия из износостойких материалов с целью рационального использования ресурсов и, таким образом, сокращение отходов материалов. В данной работе рассмотрены параметры эродированного материала катода при росте покрытия.

Распределение плотности ионно-плазменного потока генерируемом вакуумно-дуговым источником в зависимости от угла  $\alpha$  относительно оси катода представлена на рис 1. Как следует из рисунка приведенная зависимость симметрична и имеет колоколообразную форму. С увеличением угла плотность эродированного потока уменьшается и при  $\alpha = 25 \pm 1^\circ$  составляет 50% от максимального значения. Относительное распределение плотности эродированного потока определяется выражением:  $h_{\text{отн}} \frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{\Delta m}{\Delta m_0}$ , где  $\Gamma_0$  - плотность эродированного потока по оси катода,  $\Delta m$  - масса осажденного материала на подложке, расположенной на оси катода. Пространственное распределение плотности эродированного потока в относительных единицах при различных расстояниях от катода приведено на рис. 1а. Полученная зависимость имеет характерный падающий вид и не соответствует закону косинуса. С увеличением расстояния от плоскости катода возрастает полуширина кривых распределения. Результаты, получены для расстояния 220 мм от плоскости катода и тока разряда 150А. Пространственное распределение плотности эродированного потока не отличается от закона косинус и возрастает для меди, то есть материала с меньшей температурой плавления, характеризующихся высокой концентрацией частиц в потоке, что и усиливает отклонение частиц от оси эродированного потока за счет столкновений. Столкновение частиц в потоке плазмы происходит при условии если длина свободного пробега частицы  $\lambda$  меньше, чем характерное расстояние  $L$ , например, расстояние от плоскости катода до подложки, то есть  $\lambda < L$ . Длина свободного пробега частиц определяется выражением  $\lambda = \frac{1}{n\alpha\sigma}$ , где  $n\alpha$  - концентрация частиц, а  $\sigma$  - газокинетическое сечение столкновений ( $\sigma = 10 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>). Скорость испарения материала катода в дуговом разряда при токе разряда  $I_p = 300$ А составляет  $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 2 \cdot 10^{-2}$  Г/с. Поток испаренных атомов в плазменном потоке может быть представлен в виде  $G \approx n_a v_a m_a$  отсюда  $N_a \approx \frac{Q}{m_a v_a}$

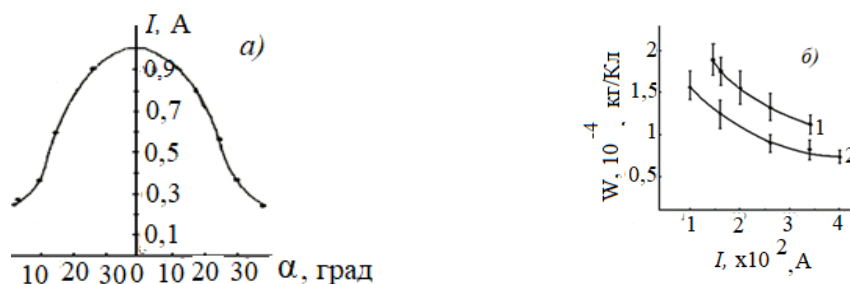


Рис. 1. Рис 1 А- пространственное распределение плотности эродированного потока стали на расстоянии от плоскости катода  $R = 19$  см при токе дугового разряда 120 А. Б- зависимость удельной эрозии материала катода дугового разряда от тока разряда для различных материалов; Си- кривая -1, сталь кривая -2.

С учетом скорости атомов  $v_a = 5 \times 10^4 - 10^5$  см/с и ее массы  $m_a \approx 10 \cdot 22$ г получим  $n_a \approx 2 \times 10^{15} - 10^{16}$  см<sup>3</sup>. Отсюда следует, что длина свободного пробега составляет  $\lambda \approx 1-5$  см. и на расстояниях больших лот плоскости катода частицы испытывают столкновения во время полета.

Таким образом, эродированный материал катода сильно связан с концентрацией частиц плазмы, а эродированный материал отклоняется относительно оси потока под действием частиц плазмы.



## ОСОБЕННОСТИ ТРАССИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ МИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Исследован механизм трассировки вольфрамовых и алюминиевых частиц микронных размеров в постоянном электрическом поле. Разработана теоретическая модель, объясняющая влияние потока металлических частиц на электрическое поле, приводящее к их мобилизации. Исследованы силы адгезии и когезии, действующие на металлические частицы.

E.N. STANKEVICH, Y.A. SADOVSKIY, L.B. BEGRAMBEKOV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## FEATURES OF TRACING MICRON SIZE METAL PARTICLES IN A CONSTANT ELECTRIC FIELD

The mechanism of tracing micron size tungsten and aluminum particles in a constant electric field has been investigated. The theoretical model has been developed to explain the influence of the metal particles flux on an electric field, leading to their mobilization. The adhesion and cohesion forces acting on the metal particles have been investigated.

В строящемся международном термоядерном реакторе ITER существует проблема образования металлической пыли при распылении контактирующих с плазмой материалов, поскольку металлическая пыль, накапливающаяся в токамаке, приведёт к серьёзным осложнениям в его работе. В виду необходимости анализа и контроля количества образовавшихся частиц авторами работы был разработан электростатический зонд, позволяющий извлекать из токамака и исследовать образцы пыли. Принцип работы зонда, заключается в следующем: на специальные электроды параболической формы подается напряжение, в результате чего между поверхностью, на которой лежит пыль, и электродами создается электрическое поле; частицы, приобретая заряд и удаляясь с поверхности, ускоряются в поле до соударения с электродами после чего следуют в контейнер, располагаемый в зонде.

Необходимо было изучить особенности электростатического метода собираемых микронных металлических частиц, включающие исследование механизмов удаления частиц с металлической поверхности и их трассировка в постоянном электрическом поле электростатического зонда. [1]

Из-за действующего электрического поля металлические частицы приобретают заряд равный  $q = 5,48\pi\epsilon_0 r^2 E$  (1) [2], где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $r$  – радиус частицы;  $E$  – напряженность электрического поля.

В результате чего на частицу действует электрическая сила  $F = qE$ . В момент, когда электрическая сила превосходит силы тяжести и когезии, частица отрывается от поверхности и ускоряется в электрическом поле по направлению к электродам.

Для установления режима работы электростатического зонда исследованы силы когезии и адгезии микронных шарообразных вольфрамовых и алюминиевых частиц. Было установлено, что сила адгезии в виду сильной шероховатости поверхности диагностических труб ( $R_a \sim 10$  мкм) подчиняется закону Рабиновича и составляет порядка  $3 \cdot 10^{-9}$  Н. [3] Сила когезии согласуется в пределах погрешности с теорией Хамакера дополненной косинусоидальным влиянием действующих на выбранную частицу партнеров и составляет порядка  $10^{-7}$  Н. [4] Также установлено, что сорбированные слои воды увеличивают силы адгезии и когезии для вольфрамовых частиц в 1.5 раза, не оказывая влияние на зависимость сил от диаметра частиц.

В результате воздействия потока заряженных металлических частиц происходит ослабление электрического поля у поверхности пыли, приводящее к увеличению заряда частиц, необходимого для их отрыва от поверхности в 900 раз относительно формулы (1), что приводит к увеличению их скорости и изменению режима работы электростатического зонда, уменьшению эффективности его работы, а также формированию паразитных каналов потерь частиц. Исследованы механизмы формирования режима ограничения тока объемным зарядом, и разработана теоретическая модель на основе модели ограничения тока объемным зарядом, объясняющая наблюдаемые экспериментальные зависимости.

[1] “Technical Specification for Dust Collection Head,” 17 Jan 2019 [Online]. Available: <https://user.iter.org/?uid=WEG9TS>.

[2] G. Riva et al., Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 593–598

[3] Yakov I. Rabinovich et al., Journal of Colloid and Interface Science 232, 10–16 (2000)

[4] H. C. Hamaker, Physica IV, no 10, 23 November 1937

А.А. КОЖУРИН<sup>а</sup>, М.Л. ДУБРОВ<sup>б</sup>, Р.Р. ХАЙРУТДИНОВ<sup>а</sup>, В.Э. ЛУКАШ<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”

<sup>б</sup>ITER Organization, Route de Vinon-sur-Verdon, CS 90 046, 13067 St. Paul Lez Durance Cedex, France

## ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА НЕЙТРАЛОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

Численно реализованы модели транспорта нейтралов в плазме токамака для расширения функционала кода ДИНА и оценены их эффективности: двумерная модель на основе метода Монте-Карло (код MCN-2D), редуцированные кинетические модели Ю.Н. Днестровского с моноэнергетическими распределением первичных нейтралов и ионов и диффузионная модель. В качестве эталонных профилей параметров нейтралов использованы результаты расчетов трехмерным Монте-Карло кодом EIRENE.

A.A. KOZHURIN<sup>а</sup>, M.L. DUBROV<sup>б</sup>, R.R. KHAYRUTDINOV<sup>а</sup>, V.E. LUKASH<sup>а</sup>

<sup>а</sup>National Research Centre Kurchatov Institute

<sup>б</sup>ITER Organization, Route de Vinon-sur-Verdon, CS 90 046, 13067 St. Paul Lez Durance Cedex, France

## ONE-DIMENSIONAL MODELLING OF NEUTRAL TRANSPORT IN PLASMAS OF A ТОКАМАК

Neutral transport models in tokamak plasmas for expanding functionality of the DINA code have been numerically implemented and their efficiencies have been estimated: a two-dimensional Monte-Carlo code MCN-2D, reduced kinetic Dnestrovskij's models with monoenergetic primary neutrals and ions distributions and the diffusion model. Three-dimensional Monte-Carlo code EIRENE calculation results are selected as referenced neutral parameters profiles.

Источником новых ионов топливной составляющей в термоядерной плазме токамака является ионизация нейтрального газа, подаваемого через границу плазмы различными способами. В этой связи транспортные процессы нейтральной компоненты имеют большое практическое значение. При этом важным направлением для правильного описания физических процессов является совершенствование численных моделей переноса нейтралов для прогнозирования их распределения по объему плазмы. Часть из них уже реализована в плазмозфизическом коде ДИНА [1].

В представленной работе будут рассмотрены: транспортная модель нейтралов на основе метода Монте-Карло (новый код MCN-2D – Monte-Carlo Neutrals Two-Dimensional и трёхмерный код EIRENE [2]), редуцированная кинетическая транспортная модель нейтралов в плоско-одномерной (Kin-1D) и цилиндрической (Kin-CYL) геометрии [3], двухгрупповая диффузионная транспортная модель [4]. Оценена эффективность численных реализаций перечисленных моделей, отклонения в балансе частиц и энергии. В качестве эталонных распределений плотностей нейтралов и их температур использованы результаты расчетов по методу Монте-Карло кодом EIRENE. Плазма дейтериевая, скорости атомных процессов во всех моделях одинаковы. Расчётная сетка соответствует геометрии токамака ИТЭР: большой радиус  $R_0 = 6.2$  м, малый радиус  $r_0 = 2$  м.

Выполнены 4 серии численных расчетов. В 1-й и 2-й сериях параметры плазменного фона (концентрации и температуры плазмы) заданы так, что средние длины свободного пробега нейтралов малы по сравнению с размерами системы, и выполняются условия применимости диффузионной и Kin-1D моделей. (Резкие скачки в профилях параметров фона отсутствуют.) В 1-й серии источник нейтралов на границе, а во 2-й в объёме за счёт излучательной рекомбинации ионов и электронов. Аналогично для 3-й и 4-й серий, только параметры плазменного фона заданы так, чтобы длины свободного пробега нейтралов были порядка размера системы. В результате, время вычислений для всех сравниваемых моделей практически не менялось: для диффузионной модели и плоско-одномерного варианта редуцированной кинетической модели  $t_{calc} \sim 0.008$  с, для MCN-2D и Kin-CYL моделей  $t_{calc} \sim 0.5$  с. При малых длинах свободного пробега нейтралов по сравнению с размером плазмы с точки зрения скорости вычислений предпочтительно использовать Kin-1D, а для лучшего баланса частиц и энергии нейтралов – MCN-2D или Kin-CYL, в частности, для которых отклонения по общему числу частиц и энергии не превышают 15%. При относительно больших длинах свободного пробега нейтралов модели вне границ применимости могут давать существенные отклонения в балансе частиц и энергии нейтралов (более 60% в интегральном балансе частиц и энергии), в отличие от MCN-2D и Kin-CYL.

В зависимости от задач могут быть использованы рассмотренные редуцированные кинетические модели (для Kin-1D нужна проверка условия применимости) или код MCN-2D. Подробный анализ профилей параметров нейтралов подтверждает сказанное.

### Список литературы

1. Khayrutdinov R. R., Lukash V. E. Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique // Journal of Computational Physics. – 1993. – Vol. 109. – №. 2. – P. 193-201.
2. Reiter D., Baelmans M., Boerner P. The EIRENE and B2-EIRENE codes // Fusion science and technology. – 2005. – Vol. 47. – №. 2. – P. 172-186.
3. Днестровский Ю. Н., Костомаров Д. П. Математическое моделирование плазмы. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982.
4. Vold E. L. et al. The neutral diffusion approximation in a consistent tokamak edge plasma-neutral computation // Journal of nuclear materials. – 1990. – Vol. 176. – P. 570-577.

Н.В. БАТРАК<sup>1</sup>, Н.Г. КОПАЛЕЙШВИЛИ<sup>1</sup>, В.В. КУЗЕНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия*

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ С ПЛАЗМОЙ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

На основе ранее разработанных авторами физико-математических моделей, численных методов и комплексов программ для электронно-вычислительных машин получены новые знания, которые позволяют уже сегодня задумываться как о новейших технологиях, так и об устройствах на основе пучков и излучения высоких энергий.

N.V. BATRAK<sup>1</sup>, N.G. KOPALEISHVILI<sup>1</sup>, V.V. KUZENOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia*

## **HYDRODYNAMIC AND THERMOPHYSICAL CALCULATIONS OF THE INTERACTION OF POWERFUL ENERGY FLOWS WITH A PLASMA IN A STRONG MAGNETIC FIELD**

On the basis of previously developed physical and mathematical models, numerical methods and software packages for electronic computers, new knowledge has been obtained that allows us to think about both the latest technologies and devices based on high-energy beams and radiation already today.

Представлены результаты теоретических расчетов и численных экспериментов теплофизических и гидродинамических процессов при взаимодействии мощного излучения с мишенью в магнитном поле. В данной работе сделан акцент на глубокое исследование физических процессов в плазме с магнитным полем в условиях генерации мощных пучков частиц и излучений. Сформулированы и обоснованы методики моделирования процессов и расчета основных параметров плазмы в системах с мощными драйверами (атомарные пучки, ВЧ/СВЧ-нагрев, лазеры, плазменные струи), а также выполнены оценки характеристик систем различного назначения, в которых эффективно используется неравновесная плазма с магнитным полем [1-10].

В представленном материале созданы математические модели взаимодействия лазера высокой энергии импульса и импульсной плазменной струи с замагниченной плазменной мишенью, основанные на уравнениях радиационной плазмодинамики с учетом подавления гидродинамической неустойчивости внешним магнитным полем. Создан комплекс программ, включающий внутреннее энерговыделение, газодинамику и радиационный транспорт, а также для исследования свойств импульсной плотной плазмы при сжатии мишеней с учетом конвекции, излучения и ядерных превращений при наличии внешнего магнитного поля. Выполнены оценки параметров квазистационарных нейтронных источников на основе плазмы, удерживаемой магнитным полем в различных магнитных конфигурациях. Определены предельно достижимые значения коэффициента усиления мощности в неравновесной термоядерной плазме, состояние которой поддерживается атомарным пучком, СВЧ-нагревом и комбинированным нагревом. Рассмотрены системы с альтернативными реакциями. Показано, что нейтронный источник-драйвер для системы «синтез–деление» может использовать топливный цикл на основе дейтерия без внешней наработки трития, т.е. использующий только тот тритий, который получается в Д-Д реакции непосредственно в плазме [11-20].

*Список литературы*

1. Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. // *Fusion Science and Technology*. 2003. V. 43. № 1Т. P. 304–308.
2. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Journal of Phys.: Conf. Series*. 2017. V. 830. P. 012124.
3. Кузенов В.В. // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2016. Т. 7, № 4. С. 342–346.
4. Ryzhkov S.V. // *Fusion Science and Technology*. 2005. V. 47. № 2Т. P. 342–344.
5. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // *ZAMP*. 2019. V. 70. P. 46.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 830. P. 012049.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Journal of Phys.: Conf. Series*. 2017. V. 815. P. 012024.
8. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. // *Труды МАИ*. 2015. № 82. С. 16.
9. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2018. V. 25 (2). P. 181-193.
10. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Fusion Science and Technology*. 2022. V. 78.
11. Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., et al. // *Plasma Physics Reports*. 2012. V. 38. P. 1025-1031.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Physics of Plasmas*. 2019. V. 26. P. 092704.
13. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Gavrilova A.Yu., Skorokhod E.P. // *High Temperature Material Processes*. 2014. V. 18. P.119-130.
14. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Applied Physics*. 2014. № 3. P. 26-30.
15. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Russian J. Nonlinear Dynamics*. 2019. V. 15, 4. P. 543-550.
16. Ryzhkov S. Reversed magnetic configuration & applications of high temperature plasma FRC // *Prikladnaia fizika*. 2010. P. 47.
17. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. *Computational Thermal Sciences*. 2021. V. 13. P. 45-56.
18. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. *Applied Sciences*. 2022. V. 12. P. 3610.
19. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Physica Scripta*. 2021. V. 96. P. 125613.
20. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. *Alternative Fusion Fuels and Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.

М.М. ХАРЬКОВ<sup>1</sup>, Г.А. КАБАНОВ<sup>1</sup>, Г.С. ЛОМОНОСОВ<sup>1</sup>, В.А. ТАТАРУЛЯ<sup>1</sup>, А.В. ТУМАРКИН<sup>1</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>, А.В. КАЗИЕВ<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ CrAlN, ОСАЖДЕННЫХ В СРЕДНЕЧАСТОТНОМ ИМПУЛЬСНОМ МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ**

Получены покрытия CrAl и CrAlN при напряжениях смещения от -50 В до +50 В. Во время осаждения проводились измерения электрических параметров разряда для различных частот и длительностей импульса. Получены изображения профилей покрытий и проведен элементный анализ на сканирующем электронном микроскопе. Измерены скорости осаждения для различных режимов осаждения

M.M. KHARKOV<sup>1</sup>, G.A. KABANOV<sup>1</sup>, G.S. LOMONOSOV<sup>1</sup>, V.A. TATARULYA<sup>1</sup>, A.V. TUMARKIN<sup>1</sup>, G.I. RYKUNOV<sup>1</sup>, M.S. KUKUSHKINA<sup>1</sup>, D.V. KOLODKO<sup>1,2</sup>, A.V. KAZIEV<sup>1</sup>

*National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino branch, Fryazino, Russia*

## **THE BIAS VOLTAGE INFLUENCE ON THE DEPOSITED IN A MEDIUM-FREQUENCY PULSED MAGNETRON DISCHARGE PROPERTIES OF THE CrAlN COATINGS**

The coatings of CrAl and CrAlN were obtained at bias voltages from -50 V to +50 V. During deposition, the electrical parameters of the discharge were measured for various pulse frequencies and durations. Images of coating profiles were obtained and elemental analysis was performed on a scanning electron microscope. Deposition rates were measured for different deposition modes

Защитные покрытия на основе CrAlN имеют широкое применение в области металлообработки для увеличения ресурсных показателей режущего инструмента. Покрытие имеет высокую твёрдость ~3000 HV, средний коэффициент трения ~0,4 и высокую предельную температуру работы ~1000°C. Одним из наиболее распространённых способов нанесения таких покрытий является ионно-плазменный метод магнетронного осаждения. В силу большой вариативности параметров осаждения, таких, как скорость осаждения, энергия и плотность ионного потока на подложку, температура подложки, возможно управление свойствами получаемых покрытий, как например, твёрдость, состав, износостойкость, структура и пр. Импульсное питание магнетронных распылительных систем приводит к повышению степени ионизации плазмы разряда, а значит к увеличению ионного потока на подложку, а напряжение смещения определяет энергию ионов, что влияет на плотность получаемого покрытия.

В работе получены покрытия CrAl и CrAlN на кремниевых полированных образцах 1×1 мм. Образцы очищались по стандартной процедуре в ультразвуковой ванне (бензин-ацетон-спирт), финальная очистка проводилась в тлеющем разряде при напряжении на образце  $U_d = 1200$  В, давлении аргона  $2 \times 10^{-2}$  торр в течение 15 минут. Затем проводилось осаждение из двух магнетронов с чистой алюминиевой и чистой хромовой мишенями. На магнетроны подавалось питание в среднечастотном режиме, варьировались частота и коэффициент заполнения, соотношение мощностей на каждом магнетроне. На образец подавалось напряжение смещения от -50 В до +50 В. Во время осаждения снимались осциллограммы тока и напряжения разряда на каждом магнетроне. После осаждения получены изображения профилей покрытий и проведен элементный анализ на сканирующем электронном микроскопе. Измерены скорости осаждения.

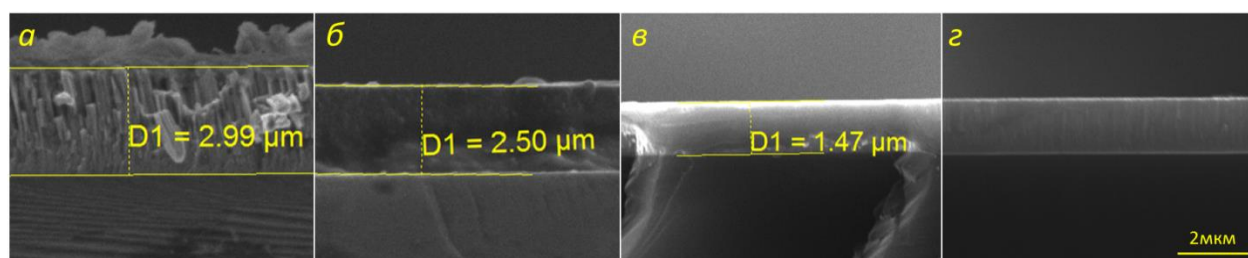


Рис. 1. Структура покрытия CrAl а –  $U_{см} = -50$  В, б –  $U_{см} = +50$  В, и CrAlN в –  $U_{см} = -50$  В, г –  $U_{см} = +50$  В при  $P_{р-да(\Sigma)} = 500$  Вт.

Скорость осаждения при подаче положительного потенциала отличается незначительно при осаждении покрытий CrAlN, для CrAl отличие составляет 15-25%, несмотря на то, что происходит существенное влияние на параметры разряда. При осаждении CrAlN скорость снижается в 2-4 раза по сравнению с осаждением CrAl, а напряжение смещения влияет в первую очередь на состав покрытия – содержание алюминия к хрому снижается на 10-15 %

**Секция  
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО  
ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
И НАНОСИСТЕМ**

Руководитель секции – д.ф.-м.н., профессор Менушенков  
Алексей Павлович

Секретарь секции – к.ф.-м.н., Кузнецов Алексей  
Владимирович

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8020

E-mail: AVKuznetsov@mephi.ru

А.А. АБДУВАЙТОВ<sup>1</sup>, М.Б. ЮСУПЖАНОВА<sup>1</sup>, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА<sup>1</sup>,  
Б.Е. УМИРЗАКОВ<sup>1</sup>, Н.А. МАРОЗИКОВА<sup>2</sup>, В.Х. ХАЛМУХАМЕДОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Маргилонское профессионально-техническое училище №1, Ташкент, Узбекистан

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ Ti ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ O<sub>2</sub><sup>+</sup>

С использованием методов фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопией упруго-отраженных электронов изучены параметры энергетических зон Ti при имплантации ионов O<sub>2</sub><sup>+</sup> и последующем отжиге.

A.A. ABDUVAITOV<sup>1</sup>, M.B. YUSUPJANOVA<sup>1</sup>, D.A. TASHMUKHAMEDOVA<sup>1</sup>, B.E.  
UMIRZAKOV<sup>1</sup>,

N.A. MAROZIKOVA<sup>2</sup>, V.X. XALMUKHAMEDOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Margilon Vocational School No. 1, Tashkent, Uzbekistan

## STUDY OF THE ELECTRONIC STRUCTURE OF A Ti SURFACE IMPLANTED WITH O<sub>2</sub><sup>+</sup> IONS

Using the methods of photoelectron spectroscopy and spectroscopy of elastically reflected electrons the parameters of the energy bands have been studied Ti by implantation of O<sub>2</sub><sup>+</sup> ions and subsequent annealing.

Среди различных оксидов металлов наноструктуры диоксида титана (TiO<sub>2</sub>) более популярны из-за их уникальности и привлекательных свойств в оптике, электронике, фотохимии и биологии, а также возможности на его основе изготовления фотогальванических устройств, сенсоров температур, литий-ионные аккумуляторы, сенсibilизированных красителем солнечных элементов и оптических преобразователей и фотокатализаторов [1-3]. Для получения наноразмерных фаз и слоев оксидов и других соединений на поверхности металлов и полупроводников широко используется метод низкоэнергетической ионной имплантации в условиях сверхвысокого вакуума [4,5]. Однако такие исследования в случае Ti проводились недостаточно. В данной работе впервые изучена электронная структура нанопленок **TiO<sub>2</sub> полученных имплантацией ионов O<sub>2</sub><sup>+</sup> в Ti в сочетании с отжигом.**

В качестве объектов исследования использовались хорошо полированные поликристаллические образцы **Ti с толщиной L ~ 0,8 мм с поверхностным диаметром 1,2 см.** Перед ионной имплантацией образцы поликристаллического Ti обезгаживались при T = 900 K в течение 8-10 часов при вакууме не хуже 10<sup>-7</sup> Па. Окисление проводилось бомбардировкой ионами O<sub>2</sub><sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 1 кэВ при дозе насыщения D<sub>n</sub> = 2 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. Начиная с D<sub>n</sub> увеличение D практически не приводит к изменению состава, структуры и свойств ионно-имплантированных слоев. Для получения информации об электронной структуре нанопленки TiO<sub>2</sub> использованы методы ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопии упругоотраженных электронов.

В таблице приведены основные зонно-энергетические параметры нанопленки TiO<sub>2</sub>/Ti с толщиной 25-30 Å.

Зоны энергетические параметры Ti и пленки TiO<sub>2</sub>/Ti

Образец	E <sub>v</sub> , эВ	E <sub>F</sub> , эВ	E <sub>g</sub> , эВ	χ, эВ
Ti	4,2	4,2	0	4,2
TiO <sub>2</sub> /Ti	6,9	4,1	3,1	3,8

Видно, что пленки TiO<sub>2</sub> являются широкозонным полупроводником. Установлено, что ширина запрещенной зоны нанопленки TiO<sub>2</sub> составляет ~ 3,1 эВ, а значение сродства к электрону χ = 3,8 эВ.

### Список литературы

1. Ge Z.X., Wei A.X., Liu J., Zhao W., Liu C.B. // Journal of Inorganic Materials. 2010. Vol. 25. №. 10. P. 1105–1109.
2. Барон Ф.А., Шанидзе Л.В., Рауцкий М.В., Михлин Ю.Л., Лукьяненко А.В., Коновалов С.О., Зеленов Ф.В., Швец П.В., Гойхман А.Ю., Волков Н.В., Тарасов А.С. // Письма в журнал технической физики. 2022. Вып. 20. С. 39.
3. Ciancio R., Carlino E., Aruta C., MacCariello D., Granozio F.M., Di Uccio U.S. // Nanoscale. 2012. Vol. 4. № 1, P. 91–94.
4. Tashmukhamedova D.A., Yusupjanova M.B. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. V.10(6), P. 1273-1275.
5. Tashmukhamedova D.A., Yusupjanova M.B. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2021. V. 15(5). P. 1054.

Д.А. АБИН<sup>1</sup>, М.А. ОСИПОВ<sup>1</sup>, А.С. СТАРИКОВСКИЙ<sup>1</sup>, С.В. ПОКРОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, И.А. РУДНЕВ<sup>1,2</sup>,

А.И. ПОДЛИВАЕВ<sup>1,3</sup>, Р.Г. БАТУЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт Проблем развития научно-образовательного потенциала молодёжи, Москва, Россия

## УВЕЛИЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА

Рассмотрено влияние ионного облучения (ионы Fe<sup>2+</sup> E=5,6 MeV) в режимах создания радиационных дефектов и имплантации на критический ток высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент. Проведен анализ как интегрального, так и локального критического тока. Показано повышение критического тока в режиме имплантации ионов при флюенсе  $\Phi=2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , в то время как в режиме радиационных дефектов наблюдается небольшое падение.

D.A. ABIN<sup>1</sup>, M.A. OSIPOV<sup>1</sup>, A.S. STARIKOVSKIY<sup>1</sup>, S.V. POKROVSKIY<sup>1,2</sup>, I.A. RUDNEV<sup>1,2</sup>,  
A.I. PODLIVAEV<sup>1,3</sup>, R.G. BATULIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Research Institute for Problems of Development of Scientific and Educational Potential of Youth, Moscow, Russia

## AN INCREASE IN THE CRITICAL CURRENT OF SUPERCONDUCTING COMPOSITES WHEN IRRADIATED WITH IRON IONS

The effect of ion irradiation (Fe<sup>2+</sup> E=5,6 MeV) in the modes of creation of radiation defects and implantation on the critical current of high-temperature superconducting (HTS) tapes is considered. The analysis of both integral and local critical current is carried out. An increase in the critical current is shown in the ion implantation mode at a fluence of  $F=2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , while a slight drop is observed in the radiation defect mode.

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) композитные ленты второго поколения – перспективные материалы для разработки источников высоких магнитных полей, в том числе для ускорителей и токамаков, где сверхпроводники могут подвергаться длительному воздействию радиационного излучения. Такое воздействие может приводить как к снижению токонесущей способности ВТСП, так и к увеличению, вследствие образования дополнительных центров пиннинга для вихрей магнитного поля.

Было проведено облучение ионами Fe<sup>2+</sup> с энергией 5,6 МэВ образцов с различной толщиной серебряного покрытия с флюенсом  $2,0 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Для исследований использовалась промышленная ReBCO (Re – редкоземельный элемент) ВТСП лента производства С-Инновации с критическим током порядка 150 А и шириной 4 мм. Изучались как образцы с открытым сверхпроводящим слоем, так и с серебряным покрытием толщиной 1,5 мкм. Показано, что критический ток как интегральная характеристика (из измерений петель намагниченности) и как локальная характеристика (из холловского сканирования захваченного потока) увеличился у образца с серебряным покрытием и уменьшился у образца с открытым сверхпроводящим слоем (рис. 1). Моделирование в программном пакете SRIM/TRIM показало, что для образца с открытым сверхпроводящим слоем подавляющее число имплантированных ионов приходится на более глубоко расположенные слои, а в сверхпроводящем преобладают радиационные дефекты типа вакансии. Для образца с серебряным покрытием значительная часть ионов имплантируется в сверхпроводящий слой.

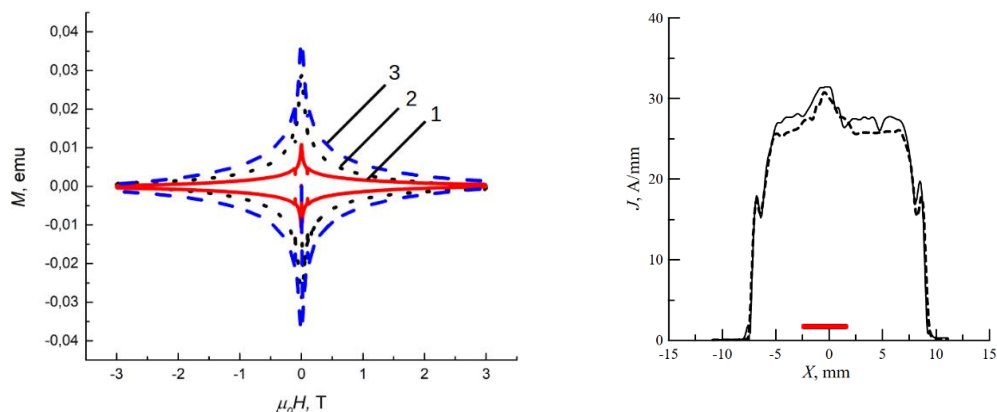


Рис. 1. Слева – Кривые намагниченности, для образцов при температуре  $T=77 \text{ K}$ : 1 – образец, с непосредственно облученным сверхпроводящим слоем, 2 – образец исходной ленты без модификаций, 3 – образец, облученный через серебряный слой. Справа – Плотность наведенного тока  $J(X)$  вдоль линий  $Y=-0.6 \text{ мм}$  (сплошная линия)  $Y=1.1 \text{ мм}$  (пунктирная линия). Образец № 1. Жирным отрезком линии вблизи оси  $X$  отмечена область облучения.



A. АВВАЛБОВЕВ, Х.Х. АХУНОВ, И.Х. АШУРОВ, Х.Х. ЗОХИДОВ, М.Ш. КУРБАНОВ  
*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан*  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДНЫХ ШЛАКОВ ДЛЯ СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
КРЕМНИЯ ДЛЯ АНОДОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ**

Обсуждаются пути создания материалов для анодов литий-ионных аккумуляторов на основе кремния с использованием шлаков медного производства. Показано, что экономичный синтез аморфного наноразмерного  $SiO_2$  из шлаков медного производства и карбонизация его при оптимальных температурах позволяет создать эффективный активный материал для анодов литий-ионных аккумуляторов.

A. AVVALBOEV, Kh.Kh. AKHUNOV, I.Kh. ASHUROV, Kh.Kh. ZOKHIDOV, M.Sh. KURBANOV  
*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan*  
**USE OF COPPER SLAG FOR THE SYNTHESIS OF MATERIALS BASED ON  
SILICON FOR ANODES OF LITHIUM-ION BATTERIES**

The ways of creating silicon-based materials for anodes of lithium-ion batteries using copper production slags are discussed. It is shown that the economical synthesis of amorphous nanosized  $SiO_2$  from copper production slags and its carbonization at optimal temperatures makes it possible to create an effective active material for anodes of lithium-ion batteries.

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), по сравнению с другими аккумуляторными батареями, имеют высокую плотность энергии, длительный срок службы, а также они безопасны и экономически эффективны. Поэтому, в настоящее время они используются практически во всех областях электроники, электромобилях, в крупных энергетических системах для хранения энергии, следовательно считается коммерчески успешными аккумуляторами и одними из наиболее основных кандидатов для удовлетворения текущих потребностей в энергии [1].

Высокая плотность энергии аккумулятора зависит от применения высокоэффективных электродных материалов, в частности катодов и анодов с высоким и низким рабочим потенциалом, соответственно. Следовательно, выбор подходящих электродных материалов является одной из самых важных задач в аккумуляторах. В ЛИА в качестве анода используется в основном графит в сочетании с оксидами лития-металла ( $LMO$ , где  $M = Co, Ni, Fe, Mn$ ). Поскольку плотность энергии определяется напряжением ячейки и емкостью обоих электродов, важно найти как высокоэффективные катодные, так и анодные материалы. Следует отметить, что уже завершены значительные разработки по катодам для ЛИА и достигнуты теоретические предельные значения емкостей возможных металл оксидных материалов, но производительность анодных материалов требует дальнейшего улучшения. Чистый металлический  $Li$  может быть использован в качестве анодного материала, который имеет теоретическую емкость 3860 мАч/г. Однако образование дендритов негативно влияет на структуру ячейки и тем самым препятствует использованию  $Li$  в качестве анодного материала. Благодаря своей экономической эффективности, доступности и стабильности цикла, графит уже был коммерциализован в качестве анодного материала в ЛИА, хотя его теоретическая емкость составляет всего 372 мАч/г.

Кремний  $Si$  с теоретической емкостью 4200 мАч/г, что в десять раз выше по сравнению с обычным графитом, считается одним из наиболее перспективных анодных материалов для ЛИА. Кроме того, кремний имеет более низкий восстановительный потенциал 0,4 В по сравнению с  $Li^+/Li$  и, таким образом, значительно способствует общему напряжению ячейки ЛИА. Кроме того, наличие кремниевых ресурсов делает использование  $Si$  в качестве потенциального электродного материала следующего поколения еще более реалистичным.

В данной работе обсуждаются проблемы, которые стали серьезным барьером на пути практического применения  $Si$  в ЛИА в качестве анодного материала, и возможные перспективные пути их решения. Показано, что использование в качестве исходного материала техногенных отходов медного производства, содержащих до 35 %  $SiO_2$ , и экономичного метода синтеза  $SiO_2$  с применением фторидов аммония, позволяет получить готовый кремниевый наноматериал, который может быть использован для создания активного материала анода ЛИА.

Проведенные исследования показали, что из медных шлаков предложенным методом могут синтезированы монодисперсные частицы с размером 100-200 нм. Для преодоления низкой электропроводности  $Si$  (или его оксидов -  $SiO, SiO_2$ ) были разработаны нанокompозиты кремниевого материала с углеродом путем карбонизации кремниевых частиц при температуре 500 °С.

Показано, что оптимизация микроструктуры кремний-углеродного композита и условия карбонизации существенно влияют на свойства разработанного активного материала анода и электрохимические характеристики ЛИА.

*Список литературы*

1. Kim, T., et al., *Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies*. Journal of materials chemistry A, 2019. 7(7): p. 2942-2964.



## МОДИФИКАЦИЯ СИНГЛЕТНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОДНОЧАСТИЧНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КОНТАКТЕ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассмотрена жидкость твердых сфер вблизи твердой поверхности. Локальная плотность жидкости обычно описывается синглетным нелинейным интегральным уравнением для одночастичной функции распределения. Предложена модификация синглетного уравнения в форме линейного интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Ядро уравнения и правая часть вычисляются через двухчастичную функцию распределения объемной жидкости. Для частного случая, когда последняя вычисляется в приближении Перкус-Йевики, разработан алгоритм аналитического решения.

YU.V. AGRAFONOV, I.S. PETRUSHIN, D.V. KHALAIMOV, I.V. BEZLER

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

## MODIFICATION OF THE SINGLET EQUATION FOR A SINGLE-PARTICLE DISTRIBUTION FUNCTION OF A LIQUID IN CONTACT WITH A SOLID SURFACE

The liquid of solid spheres near a solid surface is considered. The local density of a liquid is usually described by a singlet nonlinear integral equation for a one-particle distribution function. A modification of the singlet equation in the form of a linear integral Fredholm equation of the second kind is proposed. The core of the equation and the right-hand side are calculated using a two-particle distribution function of the volumetric fluid. For the special case when the latter is calculated in the Percus-Jevik approximation, an algorithm of analytical solution is developed.

Локальная микроструктура граничных слоев жидкостей однозначно определяется одночастичной и двухчастичной функциями распределения. Для жидкости твердых сфер вблизи твердой поверхности система уравнений зависит от многих переменных, что затрудняет её решение. Обычно для двухчастичной функции используют её граничное значение вдали от поверхности. В результате получается так называемое синглетное уравнение для одночастичной функции распределения, которую можно представить в виде  $G_1(\vec{r}_1) = \exp(-\Phi_1(\vec{r}_1)/kT + \omega_1(\vec{r}_1))$ . Одночастичный термический потенциал  $\omega_1(\vec{r}_1)$ , учитывающий взаимодействие частицы с окружающей средой, находится численным решением нелинейного интегрального уравнения. С учетом граничного условия вдали от поверхности. Нами предложена [1-2] модификация синглетного нелинейного уравнения для одночастичного потенциала в форме линейного уравнения Фредгольма второго рода

$$(e^{\omega_1(z_1)} - 1) - 2\pi n \int_0^\infty dz_2 (e^{\omega_1(z_2)} - 1) \int_{|z_{12}|}^\infty r_{12} dr_{12} C_{12}(r_{12}) = -2\pi n \int_{z_1}^\infty dz_{12} \int_{z_{12}}^\infty r_{12} dr_{12} C_{12}(r_{12}) \quad (1)$$

где  $z_1$  - удаление частицы от поверхности. Ядро уравнения и правая часть предварительно вычисляются из соответствующего интегрального уравнения для двухчастичной функции распределения макроскопической жидкости [3-6]. В частности, в приближении Перкус-Йевики ядро и правая часть уравнения заданы на интервале  $0 \leq z \leq 1$  и вычисляются аналитически. Тем самым уравнение (1) также может быть решено аналитически. Особенностью уравнения (1) является то, что для вычисления функции на интервале  $0 \leq z_1 \leq 1$  необходимо знать, как она изменяется на интервале  $1 \leq z_1 < \infty$ . На этом интервале правая часть (1) равна нулю и решение получается в квадратурах, что позволяет найти решение на интервале  $0 \leq z \leq 1$ . Таким образом, предложенный алгоритм позволяет полностью получить решение уравнения (1).

### Список литературы

1. Yu. V. Agrafonov, I. S. Petrushin Random First Order Transition from a Supercooled Liquid to an Ideal Glass. *Condensed Matter and Interphases*, 2020, 22(2), 291–302 DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/0000>
2. Agrafonov, Y.V., Petrushin, I.S. Using Molecular Distribution Functions to Calculate the Structural Properties of Amorphous Solids. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 84, 783–787 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3103/S106287382007003>
3. Martinov G.A. *Fundamental theory of liquids; method of distribution functions*. Bristol: Adam Hilger; 1992, 470 p.
4. Vompe A. G., Martynov G. A. The self-consistent statistical theory of condensation. *The Journal of chemical physics*. 1997;106(14): 6095–6101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.473272>
5. Rogers F. J., Young D. A. New, thermodynamically consistent, integral equation for simple fluids. *Physical Review A*. 1984;30(2): 999. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.30.999>
6. Tikhonov D. A., Kiselyov O. E., Martynov G. A., Sarkisov G. N. Singlet integral equation in the statistical theory of surface phenomena in liquids. *J. of Mol. Liquids*. 1999;82: 3– 17

## ОСОБЕННОСТИ ПИННИНГА ВИХРЕЙ АБРИКОСОВА В СЛОИСТОМ ВТСП НА ДЕФЕКТАХ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ

Проведены расчеты петель перемагничивания высокотемпературного сверхпроводника с дефектами различных размеров от 2 нм до 200 нм. Изучено влияние полуширины потенциальной ямы дефекта на остаточную намагниченность сверхпроводника и ее релаксацию при температуре кипения жидкого гелия. Продемонстрированы отличия в эффективности пиннинга вихрей в образцах с разными дефектами.

A.V. AITOVA, A.N. MOROZ, A.N. MAKSIMOVA, V.A. KASHURNIKOV  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FEATURES OF ABRIKOSOV VORTICES PINNING IN LAYERED HTS ON DEFECTS OF DIFFERENT SIZES

Calculations of the magnetization reversal loops of a high-temperature superconductor with defects of various sizes, from 2 nm to 200 nm, have been carried out. The influence of the half-width of the potential well of a defect on the residual magnetization of a superconductor and its relaxation at the boiling temperature of liquid helium has been studied. Differences in the efficiency of vortex pinning in samples with different defects have been demonstrated.

Ввиду растущего числа потенциальных применений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), вопрос о повышении их транспортных характеристик является актуальным. Основной проблемой по-прежнему остается улучшение эффективности пиннинга вихрей Абрикосова, зависящей от различных параметров дефектов, искусственно создаваемых в ВТСП. В частности, их размер, варьируемый от нескольких нм до нескольких мкм, может существенно влиять на то, какой режим пиннинга будет реализован в вихревой системе при данных условиях: одиночный, при котором на одном дефекте закрепляется только один вихрь, или коллективный, при котором вокруг одного дефекта может образоваться кластер из вихрей [1]. Для обеспечения максимальной эффективности ВСП при конкретных величинах магнитного поля, температуры и тока необходим подбор оптимальных для данных условий параметров дефектов, таких как концентрация и размеры. Данная проблема требует подробного исследования, и для ее решения наиболее удобным инструментом является численное моделирование, позволяющее предсказывать поведение вихревой системы в заданном массиве пиннинга.

В рамках данной работы при помощи метода Монте-Карло и модели слоистого анизотропного ВТСП [2] были проведены расчеты кривых перемагничивания и магнитной релаксации сверхпроводника  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (глубина проникновения магнитного поля  $\lambda = 180$  нм, длина когерентности  $\zeta = 2$  нм, критическая температура  $T_c = 84$  К), содержащего дефекты концентрацией  $n_{\text{def}} = 1.5 \text{ см}^{-3}$ , при температуре кипения жидкого гелия  $T = 4.2$  К. Дефекты имели вид потенциальных ям глубиной  $\alpha = 0.1$  эВ и полушириной  $W$  от 1 до  $100\zeta$ . Было показано, что изменение размера дефектов при неизменных координатах и концентрации влияет на форму петли перемагничивания и приводит к ее уширению или сужению (рис. 1). При этом зависимость остаточной намагниченности от полуширины дефектов оказалась немонотонной и имела максимум. Анализ вихревых конфигураций показал, что увеличение размеров дефектов приводит к частичному перекрытию их потенциальных ям, из-за чего вихри сначала получают возможность проникнуть в новые области образца и закрепиться на них, а затем, при определенных значениях  $W$ , быстрее покидают сверхпроводник, двигаясь вдоль областей перекрытия.

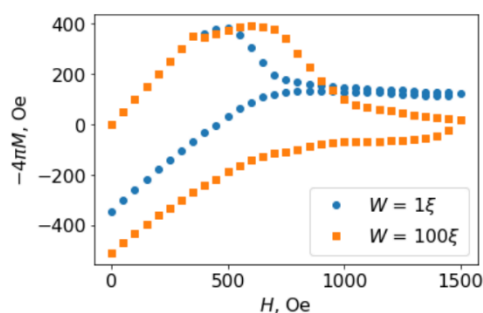


Рис. 1. Кривые перемагничивания образцов с разными полуширинами дефектов.

Исследование выполнено при поддержке программы НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Wang M.J., Wang W.T., Liu L., and others // J. Alloys Compd. 2021. Vol. 877. P. 160138.
2. Maksimova A.N., Kashurnikov V.A., Moroz A.N., and Rudnev, I.A. // Phys. Solid State. 2021. Vol. 63. P. 64-67.

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТРАССИРОВКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ГРАДИЕНТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Разработана методика моделирования постоянных магнитов в программе Comsol Multiphysics с распределением индукции магнитного поля, эквивалентным распределению реальных магнитов, измеренному с помощью холловской магнитометрии. Также разработана модель, позволяющая исследовать динамику заряженных частиц в магнитных полях, описанных выше.

D.A. ALELSANDROV, I.V. MARTIROSIAN  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL ANALYSIS OF CHARGED PARTICLE TRACING IN A GRADIENT MAGNETIC FIELD

A methodology has been developed for modelling permanent magnets in the Comsol Multiphysics software with a magnetic field distribution equivalent to that of real magnets as measured by Hall magnetometry. A model has also been developed to investigate the dynamics of charged particles in the magnetic fields described above.

Спектроскопия Лоренца является многообещающим методом исследования магнитных структур. Например, таких как скирмионы в FeGe [1], спинового расщепленного поверхностного состояния гадолиния [2] и фазовых доменных стенок в антиферромагнитном монослое железа [3].

Данное исследование направлено на моделирование спектроскопии Лоренца в программе Comsol Multiphysics и последующий анализ пространственного распределения заряженных частиц в магнитном поле, эквивалентном полю реальных постоянных магнитов в форме куба, кольца и диска. Вертикальная компонента индукции магнитного поля для каждого из этих магнитов была измерена методом сканирующей холловской магнитометрии. На рисунке 1 (а) представлен результат измерения для постоянного магнита в форме кольца на высоте 2 мм над поверхностью.

В данной работе представлен метод согласования распределения магнитных полей реальных магнитов и смоделированных магнитов. Она включает в себя построение поверхностей вертикальной компоненты индукции магнитного поля из экспериментальных данных и данных, полученных из модели, и дальнейшее их согласование путем изменения параметров в модели (рисунок 1 (а) и (б)). По рисунку 1 видно, что методика позволяет с достаточной точностью смоделировать реальный магнит. Также была разработана модель для исследования динамики заряженных частиц в магнитном поле. Был проведен численный расчет трассировки электронов в поле каждого из магнитов. На рис. 1 (в) видно, что по пространственному распределению электронов в поле кольцевого магнита можно судить о пространственном распределении магнитного поля.

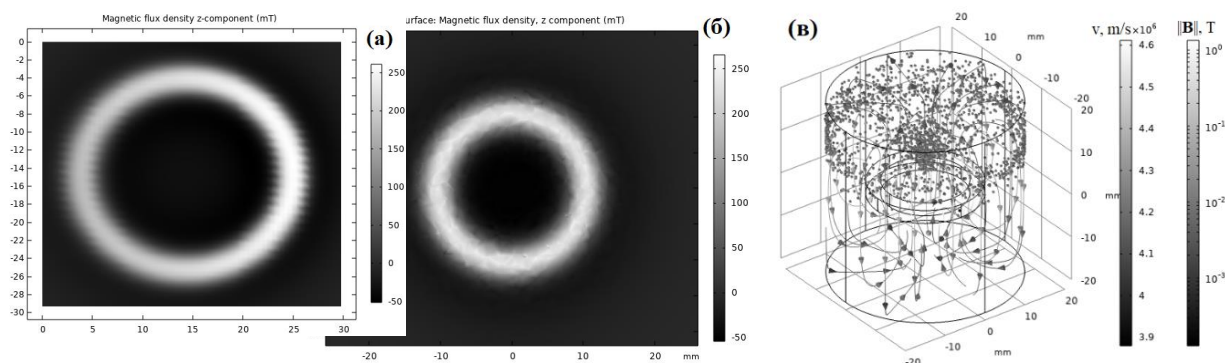


Рис. 1. (А) - распределение вертикальной компоненты индукции магнитного поля для магнита в форме кольца на высоте 2 мм над поверхностью (полученное экспериментально). (Б) - - распределение вертикальной компоненты индукции для смоделированного магнита в форме кольца на высоте 2 мм над поверхностью. (В) - пространственное распределение электронов с начальной энергией 50 эВ в поле магнита в форме кольца в момент времени 4 нс.

### Список литературы

1. Chen, Z., Turgut, E., Jiang, Y. et al. Lorentz electron ptychography for imaging magnetic textures beyond the diffraction limit. *Nat. Nanotechnol.* 17, 1165–1170 (2022).
2. O. Pietzsch, A. Kubetzka, D. Haude, M. Bode, and R. Wiesendanger, "A low-temperature ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope with a split-coil magnet and a rotary motion stepper motor for high spatial resolution studies of surface magnetism", *Review of Scientific Instruments* 71, 424-430 (2000)
3. Bode, M., Vedmedenko, E., von Bergmann, K. et al. Atomic spin structure of antiferromagnetic domain walls. *Nature Mater* 5, 477–481 (2006).

## ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Построена количественная методика спектроскопии пиков упруго отраженных электронов с учетом влияния процессов многократного упругого рассеяния на интенсивность пиков упруго отраженных электронов. Учет данного эффекта выполнен на основе решения граничной задачи для уравнения переноса в малоугловом приближении. Определены погрешности, допускаемые при использовании малоуглового приближения.

V.P. AFANAS'EV, L.G. LOBANOVA  
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia

## INVESTIGATION OF HYDROCARBON COATINGS BY MEANS OF ELECTRON SPECTROSCOPY METHODS

Quantitative method of elastic peak electron spectroscopy with taking into account the influence of multiple elastic scattering processes on the elastically reflected electron peak intensities is constructed. This effect is taken into account on the basis of solving the boundary value problem for the transport equation in a small-angle approximation. Errors allowed when using a small-angle approximation are determined.

Углеводородные покрытия имеют широкий спектр технических приложений. Анализ содержания изотопов водорода в углеводородных покрытиях необходим для решения «тритиевой» проблемы в том случае, когда «первая стенка» выполнена из графита. Важное значение имеет для исследования патологий в органических материалах.

Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов (СПУОЭ) основана на расшифровке области малых потерь энергии в энергетическом спектре отраженных электронов. Потеря энергии электрона  $\Delta E$ , падающего на исследуемую мишень с начальной энергией  $E_0$  и отраженного на угол  $\theta$  от ядра массой  $M$ , описывается формулой, следующей из классических законов сохранения энергии и импульса:

$$\Delta E = \frac{2m_e}{M} E_0 (1 - \cos \theta). \quad (1)$$

Так как потеря энергии  $\Delta E$  однозначно определяется массой ядра  $M$ , на котором происходит рассеяние электрона, то положение пика электронов, которые при своем движении в мишени не испытали неупругих рассеяний, однозначно определяется по формуле (1) и соответствует атому (изотопу), на котором произошло упругое рассеяние (рис. 1).

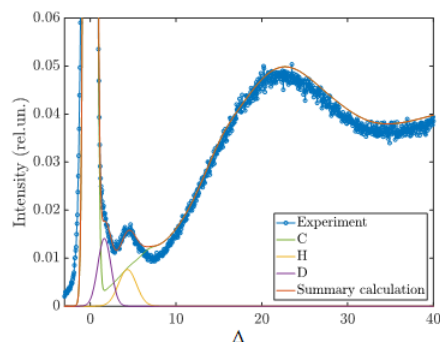


Рис. 1. Энергетический спектр REELS (Reflected Electron Energy Loss Spectroscopy) углеводородной пленки, содержащей протоны и дейтоны.  $E_0 = 3$  кэВ. Угол падения  $\theta_0 = 60^\circ$ , угол рассеяния  $\theta = 51^\circ$ , азимутальный угол  $\varphi = 120^\circ$

Плотность потока электронов, упруго отраженных от искомой компоненты мишени, определяется площадью под соответствующим пиком. Для определения этой площади необходимо выполнить процедуру вычитания фона электронов, потерявших энергию в результате неупругих процессов рассеяния [1].

Относительные концентрации изотопов водорода в углеводородной мишени определяются по соотношению площадей под пиками электронов, упруго отраженных от углерода и водорода. Формирование потока электронов, отраженных от многокомпонентной мишени, описывается с помощью метода инвариантного погружения в малоугловом приближении. Апробация развитых методов, определение возникающей погрешности выполняется на основе сравнения с результатами численного моделирования методом дискретных ординат и методом Монте-Карло.

### Список литературы

1. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. // Vacuum. 2017. Vol. 136. P. 146–155.

Е.Е. АШКИНАЗИ<sup>1</sup>, С.В. ФЕДОРОВ<sup>2</sup>, А.К. МАРТЪЯНОВ<sup>1</sup>, В.С. СЕДОВ<sup>1</sup>, О.И. ОБРЕЗКОВ<sup>3</sup>,  
Р.А. ХМЕЛЬНИЦКИЙ<sup>4,5</sup>, О.П. ЧЕРНОГОРОВА<sup>6</sup>, В.Е. РОГАЛИН<sup>7</sup>, А.А. ЗВЕРЕВ<sup>8</sup>,  
В.Г. РАЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, С.Н. ГРИГОРЬЕВ<sup>2</sup>, В.И. КОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

<sup>6</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

<sup>7</sup>Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>8</sup>ООО «НПП Булат», Королев, Россия

## СТОЙКОСТЬ К РАЗРУШЕНИЮ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ СПЛАВА WC-Co, МОДИФИЦИРОВАННОГО ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ

Установлено повышение кристаллического совершенства и упругого напряжения сжатия алмазного покрытия на режущих пластинах из сплава WC–3% Co в результате предварительной модификации ионами Nb +, Zr+. Максимальный путь резания при точении силумина (12% Si) для пластин без покрытия, с покрытием без имплантации и с покрытием с имплантацией Zr и Nb составил 3375, 7650 и 14850 м, соответственно.

Е.Е. ASHKINAZI<sup>1</sup>, S.V. FEDOROV<sup>2</sup>, A.K. MARTYANOV<sup>1</sup>, V.S. SEDOV<sup>1</sup>, O.I. OBREZKOV<sup>3</sup>,  
R.A. KHMELNITSKY<sup>4, 5</sup>, O.P. CHERNOGOROVA<sup>6</sup>, V.E. ROGALIN<sup>7</sup>, A.A. ZVEREV<sup>8</sup>,  
V.G. RALCHENKO<sup>1</sup>, S.N. GRIGORIEV<sup>2</sup>, V.I. KONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of General Physics. A.M. Prokhorov RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Physical Institute, Russian Academy of Sciences, P. N. Lebedeva RAS, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino, Russia

<sup>6</sup>Institute of Metallurgy and Materials Science A. A. Baikova RAS, Moscow, Russia

<sup>7</sup>Institute of Electrophysics and Power Engineering RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>8</sup>LLC NPP Bulat, Korolev, Russia

## RESISTANCE TO DESTRUCTION OF DIAMOND COATINGS OF WC-CO ALLOY, MODIFIED BY ION IMPLANTATION

An increase in the crystalline perfection and elastic compressive stress of a diamond coating on cutting plates made of WC–Co alloy as a result of preliminary modification with Nb +, Zr + ions has been established. The maximum cutting path when turning silumin (12% Si) for uncoated plates, coated without implantation and coated with Zr and Nb implantation was 3375, 7650 and 14850 m, respectively.

Алмазные покрытия (АП) широко используются в высокотехнологичных отраслях машиностроения, для снижения коэффициента трения, уменьшения нагрева инструмента и образования нароста на его кромке [1]. Изучено влияние предварительного модифицирования поверхности инструмента из сплава **WC-Co** ионами Cr, Ti, Mo, Zr и Nb на структуру и свойства АП, а также износостойкость резцов при обработке силумина (12% Si). Часть **WC-Co** предварительно обрабатывали высокими дозами низкоэнергетических ионов Ti, Cr, Mo, Nb и Zr на генераторе типа e-MEVVA. Для снижения концентрации **Co** и создания барьерного слоя проводили химическое травление пластин и напыление слоя **W** толщиной 600 нм. Синтез АП происходил в СВЧ-реакторе АРДИС-100. До и после нанесения АП проведено комплексное исследование микротвердости по Виккерсу, а также методами оптической профилометрии, рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа, атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света – КР. При имплантации ионов Zr и Nb в поверхностном слое WC-Co обнаружено увеличение микротвердости и снижение концентрации Co. Наименьшую ширину на полувысоте алмазного пика КР в спектрах АП (то есть, большее совершенство АП) имеют образцы пленок, осажденных на пластины WC, имплантированные Nb (8 см<sup>-1</sup>) и Zr (9 см<sup>-1</sup>). Худшие результаты получены на образцах после имплантации Mo (11,5 см<sup>-1</sup>), Ti (10,2 см<sup>-1</sup>) и Cr (10,1 см<sup>-1</sup>). Инструмент испытан на износостойкость путем обработки силумина резанием на универсальном токарном станке на форсированном режиме. Показано, что Nb и Zr образуют устойчивые и прочные соединения с WC, изменяющие характеристики контактных процессов резца с обрабатываемым силумином. Благодаря этому предварительная ионная имплантация Nb и Zr снизила наступление стадии катастрофического износа пластин до 7 раз. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-19-00694.

### Список литературы

1. Ашкинази Е. Е., Хомич А. В., Рогалин В. Е. и др. // ФХОМ. 2019. № 5. С. 42–67.

Н.Н. БЕГЕН<sup>1</sup>, Р.А. КАРАКУЛОВ<sup>1</sup>, Е.П. БАНИН<sup>2</sup>, П.А. ЖИЛЕНКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

## ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Исследованы трибологические характеристики корпуса клапана, изготовленного из стали AISI 316, в установке для розлива газированных напитков. Измерена микротвёрдость на поперечном шлифе с построением графика изменения микротвёрдости по глубине. Изучен элементный состав и микроструктура стали. Рассмотрены наиболее эффективные методы ионно-плазменного поверхностного упрочнения деталей из аустенитных нержавеющей сталей.

N.N. BEGEN<sup>1</sup>, R.A. KARAKULOV<sup>1</sup>, E.P. BANIN<sup>2</sup>, P.A. ZHILENKOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>3</sup>Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

## INCREASING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF STEEL PRODUCTS BY ION-PLASMA METHODS

The tribological characteristics of insert valve made of AISI 316 steel were studied. The microhardness was measured on a transverse section with the construction of a graph of the hardness profile. The elemental composition and microstructure of steel have been studied. The most effective ion-plasma surface hardening of parts made of austenitic stainless steels is considered.

В рамках программы импортозамещения поставлена задача по замене корпуса клапана (расчетный ресурс составляет 2 года), изготовленного из стали AISI 316, в установке для розлива газированных напитков на отечественный аналог, обладающий большим сроком службы. Проведено исследование трибологических характеристик детали и определены возможные методы обработки.

При изучении микротвёрдости металлографического шлифа выявлено, что твердость на поверхности составляет  $980 \pm 50$  HV, а толщина упрочненного слоя 21...24 мкм.

Исследование химического состава материала показало повышенное содержание углерода в приповерхностном слое (рис. 1) по сравнению с его количеством в сердцевине шлифа. Это может указывать на химико-термическую обработку (ХТО) изделия. Исследование микроструктуры поверхностного слоя говорит о наличии механической обработки, связанной с процессом изготовления корпуса клапана налива.

Для обработки аустенитных нержавеющей сталей лучше всего подходит ионно-плазменная ХТО (ионная цементация, плазменное азотирование), так как она позволяет получить упрочненный слой, обладающий высокой поверхностной твердостью, износостойкостью и минимальными дефектами [1, 2].

При плазменной ХТО в разреженной атмосфере, содержащей углерод/азот, создается перенасыщенный углеродом/азотом слой аустенита (расширенный аустенит, S-фаза) [1, 2], который обладает небольшой толщиной (несколько десятков мкм), но отличается высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью. Примером данного процесса является формирование упрочненного слоя при ионном азотировании (рис. 2).

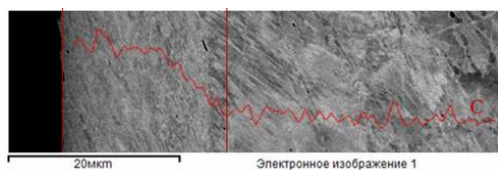


Рис. 1. Распределения углерода в поверхностном слое

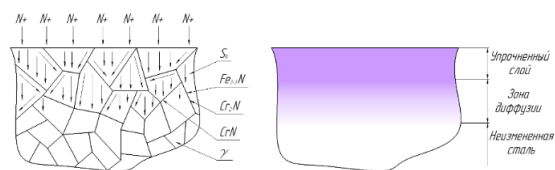


Рис. 2. Модель образования поверхностного упрочненного слоя

Ионная цементация дает твердость 800...1000 HV и толщину слоя 5...45 мкм, с плавным профилем твердости. Плазменное азотирование обеспечивает твердость 950...1300 HV и 2...25 мкм упрочненного слоя, но перепад твердости вглубь детали резкий. Комбинирование этих методов позволяет совместить их положительные качества.

При анализе научных работ [1, 2, 3] выявлено, что наилучшим методом для упрочнения стали AISI 316 является плазменная цементация с последующим азотированием при температуре 450 °С и общим временем обработки 4 часа.

### Список литературы

1. Беген Н. Н., Каракулов Р. А. Повышение механических характеристик поверхности нержавеющей сталей // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. – 2022. – Т. 2. – С. 14-18.
2. Adachi S., Ueda N. Wear and corrosion properties of cold-sprayed AISI 316L coatings treated by combined plasma carburizing and nitriding at low temperature // Coatings. – 2018. – Т. 8. – №. 12. – С. 456.
3. Tsujikawa M. et al. Surface material design of 316 stainless steel by combination of low temperature carburizing and nitriding // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Т. 200. – №. 1-4. – С. 507-511.



БИ ДУНСЮЭ<sup>1,2</sup>, У МЭНЮАНЬ<sup>1,2</sup>, Д.А. ГАВРИЛОВЕЦ<sup>2</sup>, А. КАРАДЖИЧ<sup>2</sup>, В.В. ФИЛАТОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## РЕЗОНАНС ФАНО ПОЛЯРИТОННЫХ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ ВАН ХОВА НА КРАЯХ СТОП-ЗОНЫ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Установлено, что широкополосное оптическое возбуждение фотонного кристалла в области запрещённой фотонной зоны приводит к формированию на её краях поляритонных сингулярностей типа ван Хова с резонансной плотностью оптических состояний (поляритонного конденсата Бозе-Эйнштейна). Исследован резонанс Фано данных сингулярностей. Результаты имеют важное значение для прикладной низкочастотной спектроскопии гиперкомбинационного рассеяния света.

BI DONGXUE<sup>1,2</sup>, WU MENGYUAN<sup>1,2</sup>, D.A. GAVRILOVETS<sup>2</sup>, A. KARADZIC<sup>2</sup>, V.V. FILATOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## FANO RESONANCE ARISES FROM VAN HOVE SINGULARITIES OF POLARITONS AT THE PHOTONIC CRYSTAL BANDGAP EDGE

The paper reports that broadband optical excitation of a photonic crystal in the bandgap region results to formation of the van Hove polariton singularities with a resonant density of optical states (Bose-Einstein condensation of polaritons) at the photonic bandgap edges. This can be used to get Fano resonance. The results are important for low frequency hyper-Raman investigations.

Фотонный кристалл – оптический метаматериал с периодической сверхструктурой, образованной правильным чередованием слоёв различной оптической плотности. Моделирование распространения электромагнитных волн уже в простейшем одномерном двухкомпонентном (образованном двумя регулярно чередующимися слоями толщинами  $a_1$  и  $a_2$  и оптическими плотностями  $n_1$  и  $n_2$ ) фотонном кристалле отчётливо выявляет зонную структуру его поляритонного спектра. Действительно, закон дисперсии поляритонных волн в метаматериале [1]

$$k(\omega) = (a_1 + a_2)^{-1} \times \arccos\{\cos[(\omega n_1/c) \times a_1] \times \cos[(\omega n_2/c) \times a_2] - 1/2 \times (n_1/n_2 + n_2/n_1) \times \sin[(\omega n_1/c) \times a_1] \times \sin[(\omega n_2/c) \times a_2]\}, \quad (1)$$

предсказывает наличие в спектре решений «запрещённых» областей – запрещённых фотонных зон (стоп-зон). На краях стоп-зон (точки  $\Gamma$  и  $X$  зоны Бриллюэна) групповая скорость поляритонных волн

$$v = d\omega/dk = \{dk(\omega)/d\omega\}^{-1}, \quad (2)$$

обращается в нуль, что соответствует резонансной плотности оптических состояний

$$\rho \propto v^{-1} = (v \rightarrow 0) = \infty, \quad (3)$$

– поляритонной сингулярности типа ван Хова [2]. Таким образом, фотонный кристалл способен поверхностно (на расстояниях порядка длины световой волны, см. (2)) гиперусиливать внешнее электромагнитное поле на частотах, соответствующих краям стоп-зоны ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ). В этом случае возникает резонанс Фано

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \cos(\omega_1 t) + E_{02} \cos(\omega_2 t), \quad (4)$$

который в практически важном частном случае симметричного резонанса, реализующегося при  $\rho_1 = \rho_2$ , формирует поверхностное электромагнитное поле

$$E = E_0 \cos(\omega_1 t) + E_0 \cos(\omega_2 t) = 2E_0 \cos(\omega_1 t) \times \cos(\omega_H t), \quad (5)$$

гиперусиленное ( $E \propto \rho \rightarrow \infty$ ) как в высокочастотной  $\omega_H = 1/2 (\omega_1 + \omega_2)$ , так и в низкочастотной  $\omega_L = 1/2 |\omega_1 - \omega_2|$  областях спектра. Последнее представляет особенный интерес для широкого круга прикладных низкочастотных гиперкомбинационных исследований [3-7].

### Список литературы

1. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах (пер. с англ.). М.: Мир, 1987. 616 с.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела (пер. с англ.). М.: Наука, 1978. 791 с.
3. Shevchenko M.A., Chaikov L.L., Kirichenko M.N. et al. Stimulated Low-Frequency Raman Scattering in Albumin // J. Russ. Laser Res. 2019. Vol. 40. P. 71-75. <https://doi.org/10.1007/s10946-019-09771-x>
4. Karpova O.V., Arkhipenko M.V., Pershin S.M. et al. Stimulated Low-Frequency Raman Scattering in Brome Mosaic Virus // J. Russ. Laser Res. 2021. Vol. 42. P. 106-113. <https://doi.org/10.1007/s10946-020-09935-0>
5. Nims C., Cron B., Wetherington M. et al. Low frequency Raman spectroscopy for micron-scale and in vivo characterization of elemental sulfur in microbial samples // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. Art.No. 7971. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44353-6>
6. Kārlis Bērziņš, Sara J. Fraser-Miller, Keith C. Gordon. Recent advances in low-frequency Raman spectroscopy for pharmaceutical applications // International Journal of Pharmaceutics. 2021. Vol. 592. Art.No.120034. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.120034>
7. Bi DongXue, Vladimir Filatov, Anna Karadzic, Wu MengYuan. Photonic Crystals for Hyper-Raman Technique to Fast Diagnose of COVID-19 Even in Traces and to Break Down Coronavirus Activity Through a Destroying Natural Oscillations of SARS-CoV-2 Ribonucleic Acid. viXra:2209.0143. <https://vixra.org/abs/2209.0143>

Г.И. БИКБАЕВА, А.А. ВАСИЛЬЕВА, А.А. МАНЬШИНА  
*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*  
**ЛАЗЕРНОЕ ОСАЖДЕНИЕ НАНОСТРУКТУР РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИИ НА  
ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

Впервые продемонстрировано получение плазмонных наноструктур различной морфологии из наночастиц серебра методом лазерного осаждения. Исследована морфология и состав наноструктур при вариации параметров лазерного излучения. Проведена оценка усиления сигнала гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) для серебряных плазмонных наноструктур различных типов.

G.I. BIKBAEVA, A.A. VASILEVA, A.A. MANSHINA  
*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*  
**LASER DEPOSITION NANOSTRUCTURES OF VARIOUS MOPHOLOGIES BASED  
ON SILVER NANOPARTICLES FOR SENSOR APPLICATIONS**

For the first time, the production of plasmonic nanostructures of various morphology from silver nanoparticles by the of laser deposition method has been demonstrated. The morphology and composition of nanostructures under variation of laser radiation parameters are investigated. The amplification of the Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) signal for silver plasmon nanostructures of various types has been evaluated.

Плазмонные наноструктуры представляют фундаментальный и практический интерес для широкого спектра применений в фотонике, нанооптике, солнечной энергетике, сенсорике и т.д [1]. Благодаря эффекту плазмонного резонанса наноструктуры проявляют новые оптические, а также электрические свойства, не присущие данному материалу в его объёмном состоянии. Управление свойствами с целью разработки функциональных и высокоэффективных материалов часто требует организации металлических наноструктур в метаповерхности [2]. Было обнаружено, что периодические плазмонные наноструктуры, а также нановолокна могут быть применены для усиления спектроскопических сигналов, а также при разработке биочипов и биосенсоров. Целью данного исследования является разработка метода лазерного осаждения для серебряных плазмонных наноструктур различного типа (равномерные, периодические наноструктуры и нановолокна) в качестве ГКР-активных подложек.

В качестве подхода для получения наноструктур из наночастиц серебра был выбран метод лазерного осаждения [3]. Для получения наноструктур было выбрано соединение  $C_7H_5AgO_2 \cdot xH_2O$  в качестве прекурсора, в качестве растворителя использовались вода и метанол. Источниками лазерного излучения являлись лазеры с длиной волны 266 нм – для равномерных и периодических наноструктур и 448 нм для нановолокон. Для получения периодических структур наночастиц серебра лазерное осаждение проводилось в 2 интерферирующих пучках.

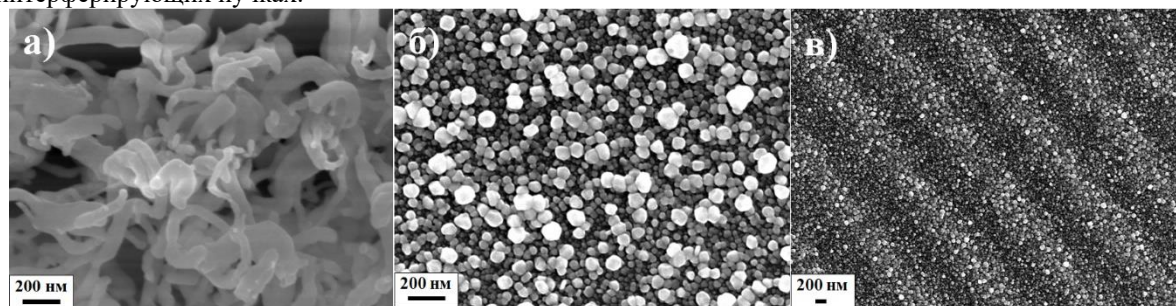


Рис. 1. СЭМ - изображения осажденных наноструктур серебра: а) нановолокна; б) равномерная наноструктура; в) периодическая наноструктура

Сканирующая электронная микроскопия показала пространственное распределение наночастиц и нановолокон серебра на подложке. Было обнаружено, что морфологией, размером наночастиц и нановолокон и их пространственной локализацией можно управлять, изменяя длину волны лазерного излучения и его параметры, а также концентрацию комплекса в растворителе. В работе продемонстрировано усиление сигнала ГКР от R6G (от равномерных и периодических плазмонных серебряных наноструктур) и Метиленового синего от нановолокон.

Оптические измерения проводились при помощи оборудования ресурсного центра «Оптические и лазерные методы исследования вещества», морфология и состав исследовались в Междисциплинарном Ресурсном Центре по направлению «Нанотехнологии» СПбГУ. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ (проект №-23-49-10044).

*Список литературы*

1. Fan Mo, Qixing Zhou // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 829, 154644
2. J. Sievers, M. Below, C. Reinhardt and others // J.Appl.Phys. 2021. Vol.130, 223104.
3. Daria V. Mamonova, Anna A. Vasileva, Yuri V. Petrov and others// Nanomaterials.2022. Vol.12 (1), P. 146.



К.А. БОРОДАКО, М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, Д.А. АБИН, С.В. ВЕСЕЛОВА, И.А. РУДНЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ВТСП ЛЕНТ И СБОРОК

Проведено исследование деформационной стойкости ВТСП лент иборок при различных параметрах намотки. С помощью четырехконтактного метода измерялся критический ток в образцах, деформированных на инденторах диаметрами 8-20 мм с усилиями до 200 Н. Исследованы морфология сверхпроводящего слоя и локальные сверхпроводящие свойства подвергнутых механическим воздействиям образцов при помощи сканирующей электронной микроскопии и холловской магнитометрии.

K.A. BORODAKO, M.A. OSIPOV, S.V. POKROVSKII, D.A. ABIN, S.V. VESELOVA, I.A. RUDNEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INFLUENCE OF MECHANICAL DEFORMATION ON SUPERCONDUCTING PROPERTIES OF HTS TAPES AND TAPES STACKS

Deformation stability of HTS tapes and tapes stacks for different winding parameters was studied in the work. Critical current was measured in samples deformed on 8–20 mm size indenters with forces up to 200 N by 4-point probes method. Morphology of the superconducting layer and the local superconducting properties of mechanically affected samples were studied by scanning electron microscopy and Hall magnetometry.

Одной из актуальных областей использования высокотемпературных сверхпроводящих материалов в виде композитных лент (ВТСП лент) является создание индукционных и кинетических накопителей энергии, обмоток двигателей, генераторов, соленоидов и магнитолевитационных подшипников [1-3]. Как правило, в такого рода системах ВТСП ленты используются в качестве обмотки. Для предотвращения потери сверхпроводящих свойств из-за механических нагрузок при производстве таких систем была исследована деформационная стойкости ВТСП лент.

С помощью прямых измерения критического тока четырехконтактным методом было установлено, что в образцах ВТСП лент, деформированных на инденторе диаметром 20 мм, нагрузки до 10 Н не приводили к значительному изменению критического тока. При приложении нагрузки  $F = 20-25 Н$  критический ток  $I_c$  стремился к 0 А, а при  $F > 25Н$  сверхпроводимость в образце пропадала. Было уставлено, что деформация индентором диаметром 15 мм лент с толщиной подложки 60 мкм с усилием 200 Н вызывает падение критического тока до 30-35 А. В то время как для образца с толщиной подложки 30 мкм сверхпроводящие свойства пропали после  $F = 92 Н$  (Рис. 1).

С помощью сканирующей электронной микроскопии и холловской магнитометрии показано, что деформация на инденторе с диаметром 8 мм, приводит к потере сверхпроводящих свойств в деформированной области вне зависимости от интенсивности воздействия (без натяжения). При деформации на инденторе диаметром 20 мм наблюдается локальное падение сверхпроводимости в области воздействия и наличие трещины в сверхпроводящем слое.

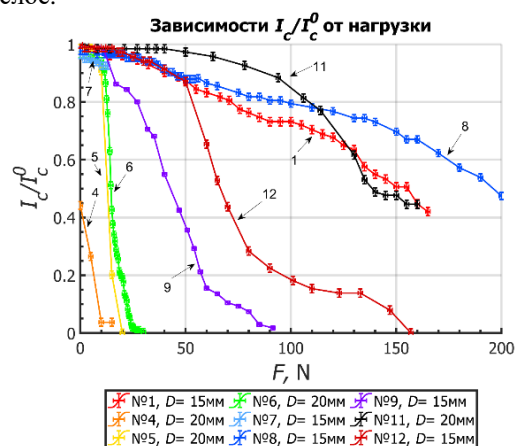


Рис. 1. Зависимость нормированного критического тока от нагрузки для различных образцов. В легенде указаны номера образцов и соответствующий диаметр изгиба индентора. Нормировка для каждого образца проводилась на начальное значение критического тока. Стрелочками на графике указаны номера образцов.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Список литературы

1. Supreeth D.K. and others // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. Vol. 32, № 3.
2. Zhang H., Mueller M. // Supercond. Sci. Technol. 2021. Vol. 34, № 4. 045018.
3. Zimmermann A.W., Sharkh S.M. // Energy Reports. 2020. Vol. 6, P. 180–188.

## **СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТОЙКОСТЬ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ ИТРИЙ СОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ MoSiB**

В работе были получены покрытия Mo-Si-B-Y методами магнетронного распыления на постоянном токе и высокоомощного импульсного магнетронного распыления с использованием мозаичной мишени. Исследовано влияние Y на структуру, механические свойства и стойкость покрытий Mo-Si-B к высокотемпературному окислению.

R.A. VAKHRUSHEV, A.D. SYTCHENKO, F.I. CHUDARIN, Ph.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV  
*University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

## **STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, AND RESISTANCE TO HIGH- TEMPERATURE OXIDATION OF YTTRIUM CONTAINING MoSiB COATINGS**

In this work, Mo-Si-B-Y coatings were obtained by DC magnetron sputtering and high-power pulsed magnetron sputtering using a mosaic target. The effect of Y on the structure, mechanical properties, and resistance of Mo-Si-B coatings to high-temperature oxidation has been studied.

Одними из наиболее распространённых защитных покрытий для высокотемпературных применений являются покрытия на основе MoSi<sub>2</sub>. Активно проводятся поиски легирующих элементов, позволяющих дополнительно повысить свойства покрытий. Для того чтобы выровнять коэффициенты термического расширения (покрытие-подложка) и повысить способность покрытия к самозалечиванию, в состав вводится бор. Улучшить свойства MoSi<sub>2</sub> и MoSiB можно также путем легирования редкоземельными металлами (РЗМ) и их соединениями. В работе [1] было показано, что введение ~20 ат.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в покрытие на основе MoSi<sub>2</sub> приводит к росту адгезионной прочности и стойкости к окислению при температуре 1300-1500°C за счёт образования плотного оксидного слоя на основе SiO<sub>x</sub> с частицами Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Известно, что покрытия на основе Mo-Si-B, легированные Y, обеспечивают эффективную защиту от газовой коррозии при T = 1800–2100 °C [2].

Целью данной работы являлось исследование влияния добавки иттрия на структуру, механические свойства и стойкость к высокотемпературному окислению покрытий Mo-Si-B, полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе (DCMS) и высокоомощного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS).

Покрытия Mo-Si-B-Y были получены методами DCMS и HIPIMS с использованием вакуумной установки на базе откачивающей системы УВН-2М. В качестве подложек применялись пластины из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При нанесении покрытий применялась композиционная мишень MoSi<sub>2</sub>+10%MoB, в зону эрозии которой помещались пластины Y площадью 2.5 см<sup>2</sup>. Для исследования структуры, элементного и фазового составов использовались методы сканирующей электронной микроскопии, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда, энергодисперсионной спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгенофазового анализа. Механические характеристики определялись методом наноиндентирования при нагрузке 4 мН. Для исследования кинетики окисления были проведены отжиги покрытий на воздухе в муфельной печи SNOL-7.2/1200 при температуре 1000 °C. Длительность изотермических выдержек составляла 10, 30, 60 и 180 мин. Высокотемпературные отжиги покрытий проводились на воздухе в печи марки ТК 15. 1800.ДМ.1Ф при температуре 1300°C и выдержке 10 мин.

Результаты показали, что все покрытия характеризовались плотной мало-дефектной структурой. Толщина покрытий составила 8–13 мкм. Базовое покрытие Mo-Si-B характеризовалось столбчатым ростом зерен h-MoSi<sub>2</sub> с преимущественной ориентацией (110). Введение иттрия способствовало аморфизации базового покрытия. Покрытия Mo-Si-B-Y при отжиге на 1000°C показали рост адгезионной прочности по сравнению с покрытиями Mo-Si-B. Высокотемпературные отжиги при 1300°C показали, что в покрытиях Mo-Si-B-Y оксид иттрия заполняет поры в не окислённом слое, тем самым герметизируя дефекты и оказывая положительное влияние на стойкость покрытий к окислению.

При переходе от режима DCMS к HIPIMS наблюдалось снижение скорости роста покрытий Mo-Si-B-Y на 38% и размера зерна на 36%. Результаты исследования кинетики окисления показали, что в случае покрытий Mo-Si-B-Y переход от DCMS к HIPIMS привел к снижению значения удельного изменения массы в 4,5 раза. Высокотемпературные отжиги показали, что переход от DCMS к HIPIMS способствовал снижению толщины оксидного слоя на 50–65%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № 0718–2020–0034).

### *Список литературы*

1. Wang C., Li K., He D., Shi H. // Journal of the European Ceramic Society. Vol. 40. 2020. P. 4419-4427.
2. Terent'eva V.S., Zhestkov B.E. // Russian Journal of Physical Chemistry. Vol. 3. 2009. P. 391-396.

С.В. ВЕСЕЛОВА<sup>1,2</sup>, И.А. РУДНЕВ<sup>1,2</sup>, С.В. ПОКРОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, Д.С. УВИН<sup>2</sup>,  
С.А. ХОХОРИН<sup>2</sup>, Р.Г. БАТУЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

## ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ КОМПОЗИТОВ MgB<sub>2</sub> ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Измерена намагниченность промышленного сверхпроводящего провода на основе MgB<sub>2</sub> при помощи метода вибрационной магнитометрии в диапазоне температур 5 К – 45 К и в полях до 5 Тл. Исследования проведены с различной ориентацией магнитного поля относительно оси провода. Зависимость значений критической плотности тока и гистерезисные потери были рассчитаны из экспериментальных данных.

S.V. VELELOVA<sup>1,2</sup>, I.A. RUDNEV<sup>1,2</sup>, S.V. POKROVSKI<sup>1,2</sup>, D.S. UVIN<sup>2</sup>,  
S.A. HOHORIN<sup>2</sup>, R.G. BATULIN

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

## MAGNETIZATION AND HYSTERESIS LOSSES OF MgB<sub>2</sub> ROUND COMPOSITES AT DIFFERENT ORIENTATION OF APPLIED MAGNETIC FIELD

The magnetization of an industrial superconducting wire based on MgB<sub>2</sub> was measured by a vibrating sample magnetometer in the temperatures range of 5 K – 45 K and in magnetic fields up to 5 T. The studies were carried out with different orientation of the magnetic field relative to the axis of the wire. Dependencies critical current density and hysteresis losses were obtained from the data.

Высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП) MgB<sub>2</sub> привлекает большое внимание за счет его невысокой стоимости, относительно высокой критической температуры T<sub>c</sub> [1], достаточно высокого рабочего тока [2] и отсутствия необходимости его охлаждения при помощи жидкого гелия. Хорошо известно, что соотношение H<sub>c2||</sub>/H<sub>c2</sub> имеет значения порядка 2.7 для объемных кристаллов и колеблется от 1.6 до 2.0 для тонких пленок и плоских кристаллов. Тем не менее, в литературе отсутствуют данные об анизотропии намагниченности промышленных проводов диборида магния. Влияние анизотропии на значения критического тока и гистерезисных потерь важно для практических применений.

В данной работе была измерена намагниченность промышленного провода MgB<sub>2</sub> Columbus Superconductors при помощи метода вибрационной магнитометрии в температурных диапазонах 5 К – 45 К и магнитных полях до 5 Тл. Ориентация линий магнитного поля находилась под углами 0, 15, 30, 45 и 90 градусов по отношению к оси провода и были получены соответствующие им петли гистерезиса. Ферромагнитный вклад Fe и Ni (оболочка из никелевого сплава) был вычтен, таким образом получены петли намагничивания, обусловленные диамагнитным вкладом сверхпроводящей фазы MgB<sub>2</sub>. Зависимости плотности критического тока от поля J<sub>c</sub>(H), а также значения гистерезисных потерь были рассчитаны из экспериментальных петель гистерезиса для различных температур. Полученные данные описаны с точки зрения анизотропии сверхпроводящих свойств MgB<sub>2</sub> и влияния геометрического размагничивающего фактора на величину намагниченности.

Исследование было проведено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта 22-72-10088

### Список литературы

1. J. Nagamatsu et al., Nature 410, 63-64 (2001)
2. W.B.K. Putri et. al., Thin Solid Films 590, 80-83 (2015)
3. D.A. Abin et. al., J. Phys.: Conf. Ser. 747, 012023 (2016)

В.В. ВОРОНОВА<sup>1,2</sup>, Ю.А. МИТЯГИН<sup>1,3</sup>, М.П. ТЕЛЕНКОВ<sup>1,2</sup>, П.С. КЛЕММЕР<sup>1,2</sup>, С.А. САВИНОВ<sup>1</sup>, Д.А. ПАШКЕЕВ<sup>1</sup>, В.П. МАРТОВИЦКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПЕРЕСТРОЙКА ЭНЕРГИЙ ПОДЗОН В СТРУКТУРАХ ИЗ КВАНТОВЫХ ЯМ ПРИ ВВЕДЕНИИ В ЯМЫ ТОНКИХ ТУННЕЛЬНО-ПРОЗРАЧНЫХ БАРЬЕРОВ

В работе представлены результаты экспериментального исследования метода управления положением нижней энергетической подзоны в широких квантовых ямах посредством введения в них тонких туннельно-прозрачных барьеров и продемонстрирована возможность управления положением нижних подзон в широких пределах вплоть до непрерывного спектра.

V.V. VORONOVA<sup>1,2</sup>, YU.A. MITYAGIN<sup>1,3</sup>, M.P. TELENKOV<sup>1,2</sup>, P.S. KLEMMER<sup>1,2</sup>, S.A. SAVINOV<sup>1</sup>,

D.A. PASHKEEV<sup>1</sup>, V.P. MARTOVITSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## REARRANGEMENT OF SUBBAND ENERGY IN QUANTUM WELL STRUCTURES WITH THE INTRODUCTION OF THIN TUNNEL-TRANSPARENT BARRIERS

Herein, the experimental research of the method of changing of the lower subband energy in quantum well structures with the introduction of thin tunnel-transparent barriers was presented and the possibility of controlled arrangement of the position of the lower subband in a wide range up to continuous spectrum was demonstrated.

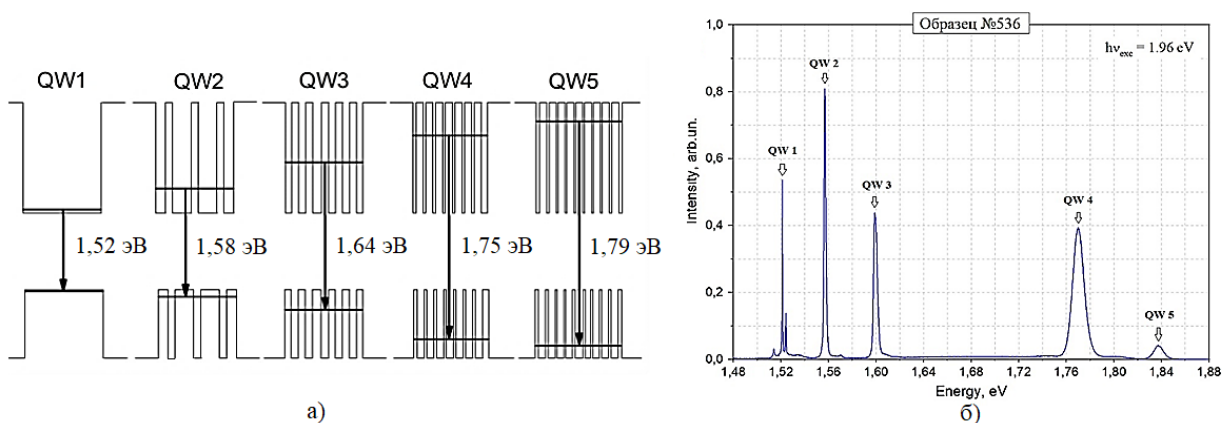


Рис. 3. а) - Потенциальный профиль выращенных структур с квантовыми ямами  $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  с различной конфигурацией введенных барьеров и теоретическими рассчитанными энергиями переходов; б) - Спектр низкотемпературной фотолюминесценции квантовых ям с введенными барьерами.

Экспериментально исследован ранее предложенный метод управления положением нижней подзоны в квантовых ямах и, соответственно, эффективной ширины запрещенной зоны посредством введения в квантовую яму серии тонких туннельно-прозрачных барьеров [1,2]. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии была выращена структура с квантовыми ямами  $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  с различной конфигурацией введенных барьеров (Рис. 1а). Измеренный спектр фотолюминесценции выращенной структуры приведены на Рис. 1б. По мере увеличения числа вводимых барьеров наблюдаемые линии фотолюминесценции, соответствующие отдельным квантовым ямам структуры, смещаются в сторону высоких частот. Принимая во внимание невозможность точного определения параметров выращенной структуры, получено хорошее согласие между рассчитанными и измеренными величинами энергий переходов.

### Список литературы

1. К. К. Nagaraja, М. Р. Telenkov, I. Р. Kazakov, S. А. Savinov and Yu А. Mityagin, Materials Today: Proceedings 3 (2016) 2744.
2. М. Р. Telenkov, P. S. Klemmer, Yu. А. Mityagin, Superlattices and Microstructures 140, 106472 (2020).

С.А. ВОТЯКОВ, А.В. ОСАДЧИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ОБЪЕМНО-ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ПОЛЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛАХ**

Объектами исследования являются положительно заряженные углеродные наноматериалы, имеющие внутреннюю полость, такие как одностенные углеродные нанотрубки. Основной идеей работы является изучение объемно-локализованных состояний с электронными волновыми функциями с максимумом, расположенными в данной полости. Метастабильные состояния появляются в результате того, что потенциал заряженной структуры можно представить в виде суммы кулоновского потенциала и потенциала атомов, составляющих стенку исследуемой полости. Было рассчитано время жизни этих метастабильных состояний.

S.A. VOTYAKOV, A.V. OSADCHY

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **LIFETIME RESEARCH OF METASTABLE VOLUME-LOCALIZED ELECTRONIC STATES IN HOLLOW CARBON NANOMATERIALS**

The objects of research are positively charged carbon nanomaterials with an internal cavity, such as single-walled carbon nanotubes. The main idea of this work is the study of volume-localized states with electronic wave functions with a maximum located in a given cavity. These metastable states appear as a result of the fact that the potential of a charged structure can be represented as the sum of the Coulomb potential and the potential of the atoms that make up the wall of the cavity under study. The lifetime of metastable states was calculated.

Объемно-локализованные электронные состояния или суператомные молекулярные орбитали (SAMO), отличающиеся от известных  $\sigma$  и  $\pi$  орбиталей, впервые были обнаружены с помощью низкотемпературного сканирующего электронного микроскопа [1]. Они образуются при гибридизации атомных  $s$  и  $p$  орбиталей на ядрах углерода [2]. С использованием теории функционала электронной плотности (DFT) были подробно изучены факторы, влияющие на гибридизацию энергии и волновой функции [3].

При исследовании общего потенциала полый структуры, состоящего из кулоновского потенциала и потенциала атомов, рассчитано, что в центре появляется яма, глубина которой увеличивается при увеличении положительного заряда [4]. Соответственно, аналогично классическому случаю электрона в потенциальной яме, должны появиться квантовые электронные состояния, локализованные в данной полости и которые можно рассматривать, как квазиатомные объемно-локализованные энергетические уровни.

Особый интерес представляют одностенные углеродные нанотрубки из-за их неравномерного распределения заряда, где большая часть концентрируется на концах, что подтверждается как классической электростатикой, так и квантово-механическими методами [5]. Для расчета структур и времени жизни через дипольные моменты перехода применялся DFT метод.

Данные материалы можно рассматривать в качестве основы для нелинейно-оптических элементов [6]. При этом, поскольку глубина потенциальной ямы варьируется при различных зарядах, появляется потенциальная возможность создания устройств с заданными спектральными характеристиками, недоступными для реализации с помощью классических подходов.

### *Список литературы*

1. Zhao J., Feng M., Yang J., Petek H. The Superatom States of Fullerenes and Their Hybridization into the Nearly Free Electron Bands of Fullerites // ACS Nano. – 2009. – V. 3, N. 4. – P. 853-864.
2. Johansson J.O., Henderson G.G., Remacle F., Campbell E.E.B. Angular-resolved Photoelectron Spectroscopy of Superatom Orbitals of Fullerenes // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V. 108, N. 17. – P. 173401.
3. Li H., Mignolet B., Wang Z., Betsch K.J., Carnes K.D., Ben-Itzhak I., Cocke C.L., Remacle F., Kling M.F. Transition from SAMO to Rydberg State Ionization in C60 in Femtosecond Laser Fields // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2016. – V. 7, N. 22. – P. 4677-4682.
4. Arutyunyan R.V., Vasiliev A.D., Obukhov Y.N., Osadchy A.V. Metastable One-Electron Excited States of Charged Fullerenes // Journal of Nanomaterials. – 2019. – V. 2019. – P. 1-4.
5. Keblinski P., Nayak S.K., Zapol P., Ajayan P.M. Charge Distribution and Stability of Charged Carbon Nanotubes // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 89, N. 25. – P. 255503.
6. Osadchy A.V., Savin V.V., Savina L.A., Chaika V.A. Volume-localized electronic states in charged single-walled carbon nanotubes // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2021. – V. 23, N. 7-8. – P. 327-330.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ<sup>1</sup>, П.М. САЙПУЛАЕВ<sup>1</sup>, Р.М. ЭМИРОВ<sup>1</sup>, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ<sup>1,2</sup>,  
А.Э. РАБАДАНОВА<sup>1</sup>, Ш.П. ФАРАДЖЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия  
<sup>2</sup>Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

## СИНТЕЗ НАНОПОРОШКОВ ЦИРКОНАТА БАРИЯ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ

Изготовлены нанопорошки с максимальным содержанием стехиометрической фазы BaZrO<sub>3</sub> в один этап. Показано, что для формирования заданной структуры и высокой доли основной фазы необходима соответствующая термическая обработка порошков. Установлено, что средние размеры кристаллитов в порошках после синтеза и обработки при температуре 500°C, составляют ~ 22.5 и 21.5 нм, а насыпная плотность – примерно 0.0276 и 0.025 г/см<sup>3</sup> соответственно.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV<sup>1</sup>, P.M. SAIPULAEV<sup>1</sup>, R.M. EMIROV<sup>1</sup>, N.M.-R. ALIKHANOV<sup>1,2</sup>,  
A.E. RABADANOVA<sup>1</sup>, SH.P. FARADJEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State University, Makhachkala, Russia  
<sup>2</sup>Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

## SYNTHESIS OF BARIUM ZIRCONATE NANOPOWDERS WITH A HIGH CONTENT OF THE STOICHIOMETRIC PHASE

Nanopowders with the maximum content of the BaZrO<sub>3</sub> stoichiometric phase were prepared in one stage. It is shown that for the formation of a given structure and proportion of the main phase, an appropriate thermal treatment of the powders is necessary. It has been established that the average sizes of crystallites in powders after synthesis and treatment at a temperature of 500°C are ~22.5 and 21.5 nm, and the bulk density is approximately 0.0276 and 0.025 g/cm<sup>3</sup>, respectively.

Соединения на основе цирконата бария (BaZrO<sub>3</sub>) рассматривают как перспективные материалы [1,2] для практического применения, проявляющие интересные свойства и стабильность.

В работе методом золь-гель изготовлены нанопорошки BaZrO<sub>3</sub>. Водный раствор нитрата бария и цирконила с глицином выпаривался при непрерывном перемешивании магнитной мешалкой. Процесс испарения завершается формированием геля и последующим его горением, в результате которого образуется агломерированный нанопорошок (рис. 1). При этом глицин играл роль органического топлива, обеспечивающего платформу для окислительно-восстановительных реакций между реагентами в процессе горения. Насыпная плотность у исходных нанопорошков BaZrO<sub>3</sub> после синтеза равна ~ 0.0276 г/см<sup>3</sup>. Термообработку порошков проводили в течение 30 минут при температуре 500°C (рис. 1в). Как и ожидалось, такая обработка агломерированных порошков не привела к существенной рекристаллизации и, соответственно, к повышению насыпной плотности.

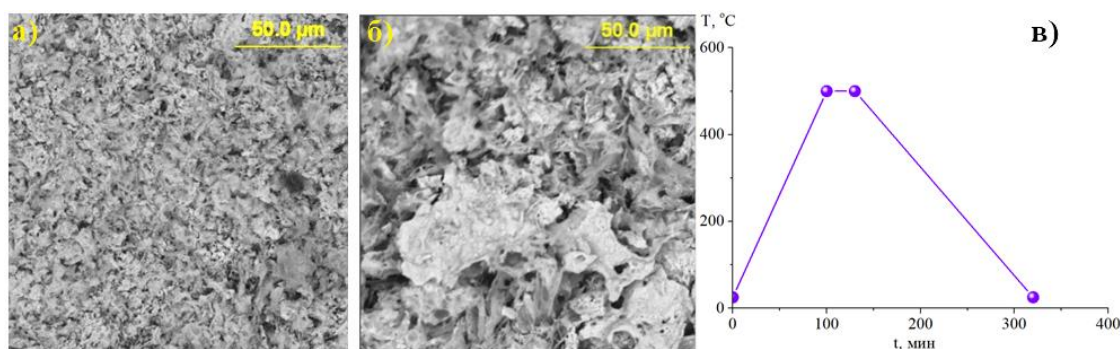


Рис. 1. Морфология исходного синтезированного порошка до (а) и после (б) обработки при 500 °С и режим термической обработки (в).

Согласно исследованиям структуры, синтезированные нанопорошки содержали, преимущественно, фазу BaZrO<sub>3</sub> со структурой перовскита (Pm-3m) и побочную фазу BaC<sub>2</sub>. Максимальное содержание основной фазы BaZrO<sub>3</sub> после обработки при 500 °С достигало ~ 90%. Средний размер кристаллитов в порошках, определенный по формуле Шеррера, после синтеза и обработки при температуре 500°C составлял ~ 22.5 и 21.5 нм, а насыпная плотность – примерно 0.0276 и 0.025 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Работа выполнена в рамках проекта УМНИК (Договор 16504ГУ/2021 от 31.05.2021) и, частично, Гос. задания FZNZ-2020-0002. Исследования выполнены с использованием оборудования НОЦ «Нанотехнологии» ДГУ.

### Список литературы

1. P. Manju et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. Vol. 39. – Issue 13, p. 3756-3767
2. Tsvetkov D. S. et al. // Chimica Techno Acta. – 2020. V.7. № 2. – Т. 7. – №. 2. – P. 42-50.



С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ<sup>1</sup>, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ<sup>1,2</sup>, М.Х. РАБАДАНОВ<sup>1</sup>, Р.М. ЭМИРОВ<sup>1</sup>,  
М.Х. ГАДЖИЕВ<sup>3</sup>, М.В. ИЛЬИЧЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

<sup>2</sup>Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

<sup>3</sup>Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $\text{BiFeO}_3$ ПУТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ

Показана возможность изготовления градиентной керамики состава  $\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3$ . Приведены результаты исследования структуры поверхности керамики после воздействия плазменным потоком аргона, создаваемым плазматроном постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода. Установлено, что после воздействия, наряду с плотным каркасом, на поверхности керамики наблюдается образование крупных пор размером до  $\sim 120$  мкм. Показано уплотнение приповерхностного слоя образца примерно на  $\sim 30\%$ .

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV<sup>1</sup>, N.M.-R. ALIKHANOV<sup>1,2</sup>, M. KH. RABADANOV<sup>1</sup>, R.M. EMIROV<sup>1</sup>,  
M.KH. GADZHIEV<sup>3</sup>, M.V. ILYICHEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State University, Makhachkala, Russia

<sup>2</sup>Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

<sup>3</sup>Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## MANUFACTURE OF GRADIENT NANOSTRUCTURED CERAMICS BASED ON $\text{BiFeO}_3$ BY EXPOSURE TO A PLASMA FLOW

The possibility of manufacturing gradient ceramics with composition  $\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3$  is shown. The results of a study of the ceramic surface structure after exposure to an argon plasma flow generated by a direct current plasma torch with an expanding output electrode channel are presented. It has been established that after exposure to ceramics, along with a dense framework, the formation of large pores with a size of up to  $\sim 120$   $\mu\text{m}$  is observed on the surface. The compaction of the near-surface layer up to  $\sim 30\%$  of the sample thickness is shown.

Градиентная керамика со структурой, изменяющей от поверхности к объему, изготовлена с использованием плазменной среды аргона, обладающей достаточной энергией. Исходная керамика состава  $\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3$  была получена из нанопорошка того же состава, термообработанного при температуре  $\sim 450^\circ\text{C}$  в течение 30 минут. Нанопорошки синтезировались золь-гель методом, согласно рекомендациям [1,2]. Спекание керамики проводилось при температуре  $\sim 600^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Обработка плазмой осуществлялась в течение  $\sim 20$  секунд на расстоянии  $\sim 25$  мм при удельном тепловом потоке  $\sim 0.05$  кВт/см<sup>2</sup>. Согласно структурным исследованиям [1] установлено, что для керамики  $\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3$  характерна искаженная ромбоэдрическая структура с пространственной группой симметрии  $R3c$ .

На рисунке приведена морфология керамики до и после обработки плазменным потоком при различных увеличениях. Видно, что термическая обработка вызвала значительные изменения пористости из-за фазовых превращений, рекристаллизации и дополнительного спекания зерен. После воздействия плазмой, наряду с уплотнением каркаса, на поверхности керамики наблюдается образование крупных пор (до  $\sim 120$  мкм). Как видно, уплотнение происходит, в основном, за счет приповерхностного слоя. Толщина этого слоя достигает до  $\sim 300$  мкм. Т.е. воздействие привело к уплотнению до  $\sim 30\%$  от толщины образца. Зерна приповерхностного слоя, в отличие от объема, образуют монолитно сопряженную структуру.

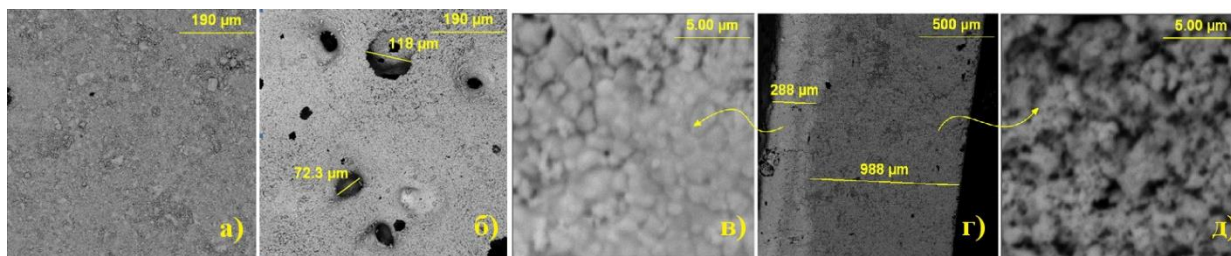


Рис. Морфологии при различных увеличениях до (а), после (б) плазменной обработки и скола (в, г и д) керамики.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 20-08-00242А и частично ГЗ FZNZ-2020-0002.

### Список литературы

1. Алиханов Н. М.-Р. и др. Способ получения нанопорошка феррита висмута, № 2641203, 2018.
2. Rabadanova A. E. et al. // *Ferroelectrics*. – 2021. – 576(1). P.1-7.

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СЕРЫ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ $WSe_xS_y$ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

Исследовано поведение нанопокровтий  $WSe_xS_y$  при трибоиспытаниях в осложнённых условиях в зависимости от концентрации серы, внедрённой в покрытия при реакционном осаждении в сероводороде из мишени  $WSe_2$ . Проведены исследования структуры, морфологии, химического состава и трибологических свойств покрытий при трении скольжения стального контртела. Выявлено влияние наночастиц W на структурообразование покрытий и характер трибохимических процессов.

M.D. GRITSKEVICH, D.V. FOMINSKI, V.N. NEVOLIN, V.Yu. FOMINSKI  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EFFECT OF SULFUR CONCENTRATION ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF $WSe_xS_y$ COATINGS UNDER COMPLICATED FRICTION CONDITIONS

The behavior of nanocoated  $WSe_xS_y$  during tribological tests under complicated conditions is studied depending on the concentration of sulfur introduced into the coating at a scientific content in hydrogen sulfide from the  $WSe_2$  target. The structure, morphology, chemical composition and tribological properties of coatings under sliding friction of a steel counterbody have been studied. The effect of W nanoparticles on surface structure formation and the nature of tribochemical processes was revealed.

Снижение износостойкости деталей в осложнённых условиях является одной из проблем при работе пар трения. Твердосмазочные покрытия используются там, где обычные смазки не работают – осложненные условия трения, например, высокая температура, влажность, давление, окисления [1,2]. Покрытия на основе халькогенидов переходных металлов нашли широкое применение в качестве антифрикционных материалов в разных областях промышленности. В настоящей работе изучено влияние структурных характеристик и состава покрытий на основе  $WSe_2$  с повышенной концентрацией наночастиц вольфрама на трибо-поведение покрытий в осложнённых условиях. Данные покрытия получены за счет лазерной абляции мишени  $WSe_2$  в реакционном газе (сероводороде) различного давления. Состав полученных покрытий представлял собой плёнку  $WSe_2$  с внедрёнными в неё наночастицами вольфрама и атомами серы -  $WSe_xS_y/NP-W$ . Ранее было показано положительное влияние смеси различных халькогенов на антифрикционные свойства покрытий [3].

Трибологические испытания проводились методом трения-скольжения стального шарика при температуре  $-100^\circ\text{C}$  в атмосфере азота с нагрузкой 1 Н. На рисунке 1 приведены результаты триботестирования, которые демонстрируют качественные антифрикционные свойства покрытий  $WSe_xS_y/NP-W$  с высокой концентрацией атомов халькогенов. Из рисунка видно, что покрытие, полученное при давлении  $H_2S \sim 9$  Па, то есть, с самым высоким значением концентрации серы, обладало самым низким и устойчивым значением коэффициента трения  $\sim 0.06$ , которое установилось после приработки (500 циклов).

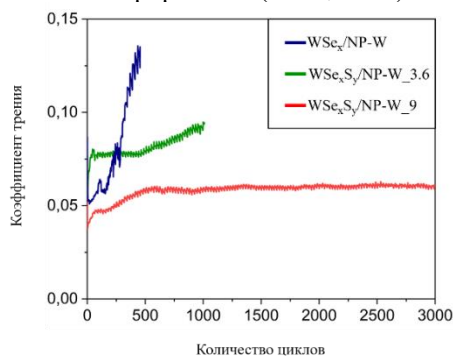


Рис. 1. Коэффициенты трения покрытий  $WSe_x/NP-W$ ,  $WSe_xS_y/NP-W_{3.6}$  и  $WSe_xS_y/NP-W_9$ , измеренные при температуре  $-100^\circ\text{C}$  в атмосфере  $N_2$ , с приложенной нагрузкой 1 Н. Цифры указывают давление  $H_2S$  при осаждении покрытий.

### Список литературы

1. Александров Д.А., Артеменко Н.И. // Труды ВИАМ. 2016. № 10 (46). С. 65–72.
2. Lince J.R. // Lubricants. 2020. 8(7), 74. С.1-57
3. Hu J. J., Wheeler R., Zabinski J. S., Shade P. A., Shiveley A., Voevodin A. A. // Tribol. Lett. 2008. 32:49–57.



К.С. ГРИШАКОВ<sup>1,2</sup>, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи, Москва, Россия

## УСТОЙЧИВОСТЬ ТВЕРДЫХ АТОМАРНЫХ АЗОТНЫХ СТРУКТУР В ОТСУТСТВИИ ДАВЛЕНИЯ

В рамках расчетов с использованием теории функционала плотности исследована устойчивость твердых атомарных фаз азота к формированию вакансий, а также изучены вопросы устойчивости поверхности азотных кристаллов при отсутствии давления. Показано, что ряд азотных структур, которые предсказываются теорией динамически устойчивыми при нулевом давлении, могут быть неустойчивы к формированию вакансий. Поверхность также может быть существенным фактором неустойчивости азотных кристаллов.

K.S. GRISHAKOV<sup>1,2</sup>, N.N. DEGTYARENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Research Institute for the Development of Scientific and Educational Potential of Youth, Moscow, Russia

## STABILITY OF SOLID ATOMIC NITROGEN STRUCTURES IN THE ABSENCE OF PRESSURE

Within the framework of the density functional theory, the stability of solid atomic phases of nitrogen to the formation of vacancies is calculated, and the stability of the surface of nitrogen crystals in the absence of pressure is studied. It is shown that a number of nitrogen structures, which are predicted by the theory to be dynamically stable at zero pressure, may be unstable to the formation of vacancies. The surface can also be a significant factor in the instability of nitrogen crystals.

Азотные структуры с одинарными (или двойными) связями между атомами представляют интерес как материалы с высокой плотностью запасаемой энергии. Причем процесс энерговыделения в таких структурах является экологически безвредным, так как продуктом их распада являются двухатомные молекулы азота с тройной ковалентной связью, которые являются основным компонентом атмосферы Земли.

В настоящее время экспериментально было получено множество различных твердых атомарных фаз азота при высоких давлениях, больших 150 ГПа [1-3]. Среди всех этих структур выделяется гош фаза азота, которую удавалось сохранять в стабильном состоянии при декомпрессии до давлений порядка 50 ГПа. На сегодняшний день не существует синтезированных азотных кристаллов, устойчивых при давлениях ниже 50 ГПа. При этом теоретически в рамках *ab initio* расчетов предсказывается динамическая устойчивость вплоть до нулевого давления для структур с симметриями кристаллической решетки  $P2_1$ ,  $R-3$ ,  $R3c$ ,  $P-62c$  и  $I2_13$  [4]. Структура с симметрией  $I2_13$  соответствует экспериментально наблюдаемой гош фазе азота. Выполнение критерия динамической устойчивости в рамках теории функционала плотности свидетельствует о существовании устойчивого состояния структуры при нулевой абсолютной температуре. Однако данный критерий ничего не говорит об устойчивости системы при конечных температурах. Обычно оценка времени жизни структуры проводится на основе большой статистики, полученной из молекулярно-динамических расчетов при различных температурах, с использованием формулы Аррениуса. Однако такой подход требует очень больших вычислительных ресурсов и может быть корректно выполнен только с использованием упрощенных моделей, например, модели сильной связи. Для оценки степени устойчивости твердых атомарных фаз азота важным также является вопрос о устойчивости идеальной структуры к образованию точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов), как термодинамически равновесных ветвей возбуждения кристалла. Поэтому для оценки степени устойчивости твердых атомарных фаз азота в данной работе мы использовали подход, основанный на создании структурных отклонений от идеальной кристаллической решетки (вакансии и поверхность), которые играют роль «возмущений», призванных вывести систему из метастабильного состояния.

В результате проведенных расчетов нам удалось показать, что фазы  $P-62c$  и  $R3c$  оказываются неустойчивыми к формированию вакансий при нулевом давлении. Также показано, что поверхность твердых атомарных фаз азота может быть существенным фактором их неустойчивости и может являться причиной сложности экспериментального удержания стабильного состояния азотных кристаллов при снижении давления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00017. К.С. Гришаков выражает благодарность Автономной некоммерческой организации Научно-исследовательскому институту Проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи за предоставленные вычислительные ресурсы и всестороннюю поддержку исследования.

### Список литературы

1. Eremets M. I., Gavriluk A. G., Trojan I. A. and others // Nat. Mater. 2004. Vol. 3. P. 558–563.
2. Laniel D., Winkler B., Fedotenko T. and others // Phys. Rev. Lett. 2020. Vol. 124. P. 216001.
3. Tomasino D., Kim M., Smith J. and others // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113. P. 205502.
4. Grishakov K.S., Degtyarenko N.N. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2022. Vol. 24. P. 8351–8360.

Д.С. ДАЙБАГЕ<sup>1,2,3</sup>, Л.И. КАРМАЗИН<sup>1,2,3</sup>, А.В. ОСАДЧЕНКО<sup>1,2,3</sup>, И.А. ЗАХАРЧУК<sup>1,2</sup>,  
С.А. АМБРОЗЕВИЧ<sup>1,2</sup>, М.Л. СКОРИКОВ<sup>2</sup>, Р.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>4</sup>, А.С. СЕЛЮКОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В УЛЬТРАТОНКИХ КОЛЛОИДНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ CdSe

В данной работе исследованы оптические свойства ультратонких нанопластинок CdSe при различных значениях толщины. Обнаружено смещение полос поглощения и фотолюминесценции в низкоэнергетическую область спектра при увеличении средней толщины. Наблюдаемое смещение обусловлено квантово-размерным эффектом.

D.S. DAIBAGYA<sup>1,2,3</sup>, L.I. KARMAZIN<sup>1,2,3</sup>, A.V. OSADCHENKO<sup>1,2,3</sup>, I.A. ZAKHARCHUK<sup>1,2</sup>,  
S.A. AMBROZEVICH<sup>1,2</sup>, M.L. SKORIKOV<sup>2</sup>, R.B. VASILEV<sup>4</sup>, A.S. SELYUKOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## QUANTUM CONFINEMENT EFFECT IN ULTRATHIN COLLOIDAL CdSe NANOSTRUCTURES

The optical properties of ultrathin CdSe nanoplatelets with different thicknesses were studied. A red shift of absorption and luminescence spectra was detected when the average thickness was increased. These results were explained by the quantum confinement effect.

В последнее десятилетие в светодиодах, наряду с органическими и металлоорганическими люминофорами, начали использовать коллоидные наночастицы различной геометрии [1,2]. Это обусловлено тем, что варьирование размера наноструктур позволяет управлять как межзонными переходами, так и рекомбинационной люминесценцией, связанной с поверхностными состояниями [3,4].

Данная работа посвящена исследованию квантово-размерного эффекта в нанопластинах CdSe, средняя толщина которых составляет примерно 2.5 монослоя (МС), по отношению к более толстым нанопластинам [5].

Спектры поглощения (рис. 1) обладают двумя особенностями, которые связаны с переходами  $1S_{hh}-1S_e$  и  $1S_{hh}-1S_e$  между подзонами легких и тяжелых дырок в валентной зоне и зоной проводимости.

Смещение полос поглощения (рис. 1) и фотолюминесценции (рис. 2) в высокоэнергетическую область спектра при уменьшении средней толщины нанопластинок CdSe вызвано квантово-размерным эффектом.

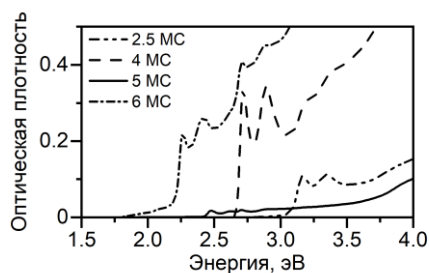


Рис. 1. Спектры поглощения нанопластинок CdSe

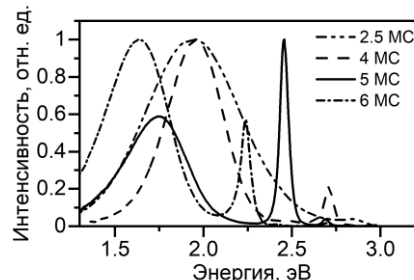


Рис. 2. Спектры люминесценции нанопластинок CdSe

### Список литературы

1. Vashchenko A.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., et al. Electroluminescence of Coumarin-Based Dyes. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2022. Vol. 49, P. 74-77.
2. Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Перепелица А.С., и др. Спектральные и кинетические свойства квантовых точек сульфида серебра во внешнем электрическом поле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1098–1103.
3. Kondratenko T.S., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., et al. Size-dependent optical properties of colloidal CdS quantum dots passivated by thioglycolic acid // Semiconductors. 2018. Vol 52. no. 9. P. 1137–1144.
4. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag<sub>2</sub>S quantum dots // Journal of Luminescence. – 2020. Vol. 227. – С. 117526.
5. Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., и др. Электролюминесценция коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. Т. 147. №. 4. С. 687–701.

П.Н. ДЕГТЯРЕНКО<sup>1,2</sup>, В.А. СКУРАТОВ<sup>3</sup>, В.К. СЕМИНА<sup>3</sup>, М.С. НОВИКОВ<sup>4</sup>,  
С.Ю. ГАВРИЛКИН<sup>5</sup>, А.Ю. ЦВЕТКОВ<sup>5</sup>, А.В.ОВЧАРОВ<sup>6</sup>, А.М. ПЕТРЖИК<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «С-Инновации», Москва, Россия

<sup>3</sup>Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup>Лаборатория физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>5</sup>Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук, Москва, Россия

<sup>6</sup>НИИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия

<sup>7</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Bi С ЭНЕРГИЕЙ 670 МЭВ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Проведены исследования сверхпроводящих свойств ВТСП лент 2-го поколения облученных ионами висмута (Bi) с энергией 670 МэВ. Обнаружено повышение критического тока в 1.4 раза при флюенсе  $1 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> при одновременном снижении температуры сверхпроводящего перехода на 3К по сравнению с необлученным образцом. Сопоставлены результаты ПЭМ-исследований морфологии и микроструктуры с данными электрофизических исследований для всех исследованных образцов. Полученные результаты будут использованы при проектировании сверхпроводящих магнитных систем ускорителей нового поколения.

P.N. DEGTYARENKO<sup>1,2</sup>, V. SKURATOV<sup>3</sup>, V. SEMINA<sup>3</sup>, M. NOVIKOV<sup>4</sup>, S. GAVRILKIN<sup>5</sup>,  
A. TSVETKOV<sup>5</sup>, A. OVCHAROV<sup>6</sup>, A.M. PETRZHİK<sup>7</sup>

<sup>1</sup>JIHT RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>S-Innovations, LLC, Moscow, Russia

<sup>3</sup>FLNR, JINR, Dubna, Russia

<sup>4</sup>LHEP, JINR, Dubna, Russia

<sup>5</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>6</sup>NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia

<sup>7</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow, Russian

## THE EFFECT OF Bi-ION IRRADIATION ON THE SUPERCONDUCTING PROPERTIES OF 2G HTS WIRE

The superconducting properties of 2G HTS tapes irradiated by Bi with energy of 670 MeV have been studied. An increase of the critical current by 1.4 times at a fluence  $1 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-2</sup> was obtained with a simultaneous decrease of the critical temperature by 3 K in comparison with a non-irradiated sample. The results of TEM studies of the morphology and microstructure are compared with the data of electrophysical study for all samples. The obtained results will be used in the design of superconducting magnetic systems for new generation accelerators.

В некоторых приложениях с сильным магнитным полем, например, в ускорителях и установках термоядерного синтеза, ВТСП ленты 2-го поколения могут подвергаться облучению тяжелыми заряженными частицами. В нашей предыдущей работе мы сообщали об увеличении плотности критического тока ВТСП лент 2-го поколения производства компании Superpower Inc. после облучения высокоэнергетическими ионами Хе [1]. В настоящей работе изучалось влияние облучения на сверхпроводящие свойства коммерческих ВТСП лент 2-го поколения на основе YBCO производства компании «С-Инновации». Образцы лент с серебряным покрытием облучали при комнатной температуре ионами Bi с энергией 670 МэВ на циклотроне У-400 ЛЯР ОИЯИ. Петли магнитного гистерезиса и кривые магнитной восприимчивости были измерены на установке PPMS в диапазоне магнитных полей от 0 до 9 Тл и в диапазоне температур от 4,2 до 77 К для исходных и облученных образцов. Отчетливо наблюдается увеличение критического тока с увеличением дозы облучения и снижение его анизотропии при увеличении внешнего магнитного во всем диапазоне температур. Проведен анализ и сопоставлены результаты ПЭМ-исследований морфологии и микроструктуры ВТСП лент 2-го поколения, облученных ионами Bi, с результатами электрофизических исследований.

### Список литературы

1. Elena I. Suvorova, Pavel N. Degtyarenko, Igor A. Karateev, Alexey V. Ovcharov, Alexander L. Vasiliev, Vladimir A. Skuratov, and Philippe A. Buffat / Energy dependent structure of Xe ion tracks in YBCO and the effect on the superconductive properties in magnetic fields // J. Appl. Phys. 126, 145106, 2019.

А.И. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, А.В. КОЧУРА<sup>2</sup>, А.П. КУЗЬМЕНКО<sup>2</sup>, О.А. НОВОДВОРСКИЙ<sup>3</sup>, Л.С. ПАРШИНА<sup>3</sup>, О.Д. ХРАМОВА<sup>3</sup>, Б.А. АРОНЗОН<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черногоровка, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Россия

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК InMnSb, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Исследованы магнитные свойства пленок InMnSb, полученных методом импульсного лазерного осаждения. Анализ полученных магнитных данных в совокупности со структурными данными показал, что пленки состоят из двух магнитных подсистем: ферромагнитная подсистема нановключений MnSb и парамагнитная подсистема диспергированных ионов  $Mn^{2+}$  в матрице InSb. Проведена детальная характеристика обеих магнитных систем в сравнении с аналогичными данными, полученными другими авторами для подобных образцов.

A.I. DMITRIEV<sup>1</sup>, A.V. KOCHURA<sup>2</sup>, A.P. KUZMENKO<sup>2</sup>, O.A. NOVODVORSKY<sup>3</sup>, L.S. PARSHINA<sup>3</sup>,

O.D. KHRAMOVA<sup>3</sup>, B.A. ARONZON<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

<sup>2</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

<sup>3</sup>Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Russia

<sup>4</sup>Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

## MAGNETIC PROPERTIES OF InMnSb FILMS PRODUCED BY LASER DEPOSITION

The magnetic properties of InMnSb films obtained by pulsed laser deposition have been studied. The analysis of the obtained magnetic data together with the structural data showed that the films consist of two magnetic subsystems: the ferromagnetic subsystem of MnSb nano-inclusions and the paramagnetic subsystem of dispersed  $Mn^{2+}$  ions in the InSb matrix. A detailed characterization of both magnetic systems is carried out in comparison with similar data obtained by other authors for similar samples.

Поиск высокотемпературных ферромагнитных разбавленных магнитных полупроводников в первую очередь ведется среди соединений с наименьшими параметрами решетки и самыми широкими запрещенными зонами. Среди полупроводников семейства III-Mn-V таковыми являются GaMnAs, GaMnN и InMnN, которые имеют самые высокие температуры Кюри. Несмотря на большое число публикаций, посвященных в первую очередь GaMnAs, многие вопросы остались открытыми, и даже основной механизм ферромагнетизма в III-Mn-V понимается зачастую лишь качественно. В этих условиях мы считаем, что многое можно узнать, изучив противоположный край семейства III-Mn-V, обратившись к соединению InMnSb, которое имеет самую большую постоянную решетки и наименьшую запрещенную зону.

В настоящей работе исследованы магнитные свойства пленок InMnSb, полученных методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО), обладающих высокотемпературным ферромагнетизмом. Метод ИЛО с использованием механической сепарации капель позволяет при напылении многокомпонентных веществ получать тонкие пленки состава исходной мишени [1], а благодаря высокой энергии осаждаемых частиц обеспечивать неравновесную растворимость компонентов в пленках сложного состава. Цель настоящей работы состоит в изучении механизмов, приводящих к высокотемпературному ферромагнитному состоянию, а также в разделении вкладов различных магнитных подсистем в суммарную намагниченность.

Разделены вклады в суммарную намагниченность пленок InMnSb от ферромагнитной подсистемы нановключений MnSb и парамагнитной подсистемы диспергированных ионов  $Mn^{2+}$  в матрице InSb. Определены намагниченность насыщения и температура Кюри нановключений MnSb, которые оказались заметно ниже, чем в массивных монокристаллических образцах. Величина коэрцитивной силы нановключений MnSb близка к соответствующему значению как для пленок MnSb, так и для наночастиц MnSb, полученных ранее различными методами, и заметно ниже поля магнитной анизотропии нановключений MnSb. Оценено значение константы магнитной анизотропии, которое оказалось близко к соответствующей величине, определенной ранее для монокристаллов  $Mn_xSb_{1-x}$  нестехиометрического состава  $x = 52.8\%$ . Из магнитометрических данных было оценено среднее значение диаметра нановключений MnSb, которое оказалось заметно ниже соответствующей величины, определенной из данных по атомно-силовой микроскопии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания № АААА-А19-119092390079-8 и в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

### Список литературы

1. Маренкин С.Ф., Новодворский О.А., Шорохова А.В. и др. // Неорганические материалы. 2014. Т. 50, № 9. С. 973–978.
2. Oveshnikov L.N., Nekhaeva E.I., Kochura A.V. et al. // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. Vol. 9. P. 2457–2465.

Т.Э. ЖУРАБОВЕВ<sup>1</sup>, Э.В. БАКИРОВ<sup>1</sup>, У.Б. УЛЬЯЕВ<sup>1</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан.

<sup>2</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ РОСТА ГРАФЕНА

В этой работе стадия зародышеобразования роста графена исследуется с использованием моделирования молекулярной динамики. Мы обнаружили, что образование димера и тримера является первым этапом образования углеродной цепи и кольца соответственно.

T.E. JURABOEV<sup>1</sup>, E.V. BAKIROV<sup>1</sup>, U.B. ULJAEV<sup>1</sup>, U. KHALILOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan.

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## SIMULATION OF THE INITIAL STAGES OF GRAPHENE GROWTH

In this work, the nucleation stage of graphene growth is investigated using molecular dynamics simulations. We found that the formation of a dimer and a trimer is the first step in the formation of a carbon chain and a ring, respectively.

Graphene is a carbon structure that is rapidly developing in nanotechnology [1]. Although graphene is being synthesized experimentally, since the nucleation processes are not yet fully understood. In this research, molecular dynamics (MD) simulations of the initial stages of graphene formation by CVD [2] were performed using the LAMMPS programming package [3]. In the simulations, Ni (111) surface was selected as a substrate. Subsequently, carbon atoms with thermal energy were deposited on the surface at temperatures of 600, 900, and 1200 K with a time interval of 1 ps (Fig. 1)

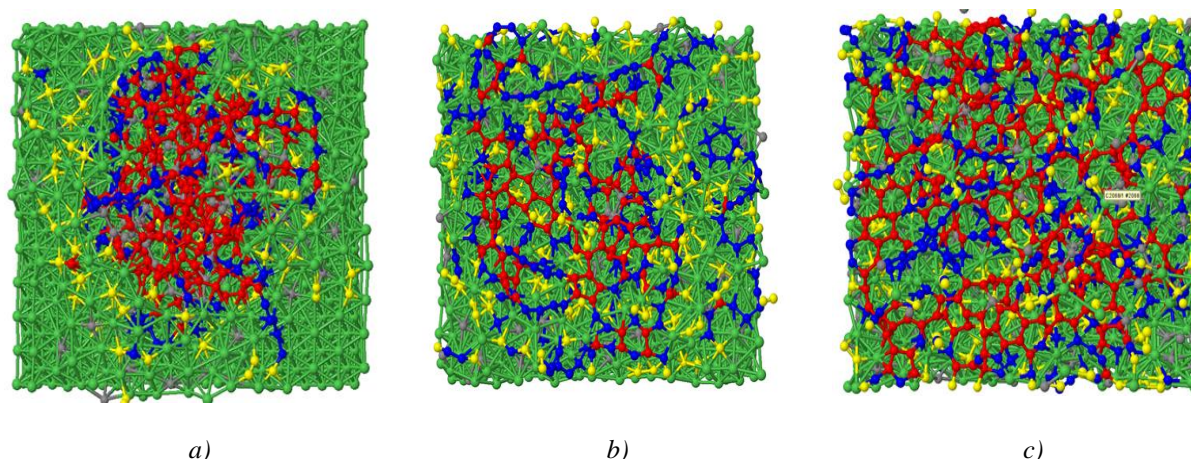


Figure 1. Graphene nucleation from C atoms on Ni (111) surface at temperatures of (a) 600 K, (b) 900 K, and (c) 1200 K.

We found that the formation of a carbon dimer on the metal surface leads to the formation of a carbon chain. Furthermore, the results showed that the formation of a carbon trimer leads to the formation of a carbon ring, which is the first step in graphene formation. Overall results showed that the temperature increase in the formation of graphene leads to a reduced number of defects (pentagon, heptagon, etc.) and subsequently turned into of hexagonal graphene rings.

In general, the obtained results allow understanding of the mechanisms of graphene nucleation, which can provide useful information to experimenters.

### Список литературы

1. K.S. Novoselov, et al., Nature Materials, 2007, 6, 183.
2. Z Xu, et al., Nanoscale, 2016, 8, 921.
3. S. Plimpton, P. Crozier, and A. Thompson, "LAMMPS-Large-Scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator", Sandia National Laboratories 18, 43 (2007).

В.В. ЗАЛЕТКИНА, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТОВ ЗАХВАЧЕННОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ВТСП**

Проведены измерения захваченного поля для различного числа лент в сборке магнита и диаметрах МЗП. Показано наличие порогового значения амплитуды внешнего магнитного поля, а также влияние частоты поля на амплитуду намагничивания кольцевых магнитов захваченного потока. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами расчетов.

V.V. ZALETKINA, I.V. MARTIROSYAN, S.V. POKROVSKIY  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODELS OF TRAPPED FLUX MAGNETS BASED ON HTS**

The trapped field was measured for a different number of tapes in the magnet assembly and TFM (trapped field magnets) diameters. The presence of a threshold value of the amplitude of the external magnetic field is shown, as well as the influence of the field frequency on the magnetization amplitude of the ring trapped flux magnets. The experimental data obtained agree with the calculation results.

Генераторы и вращающиеся машины на основе ВТСП элементов представляют большой интерес в технической сфере. Один из вариантов использования сверхпроводников в энергетических установках (генераторах, накопителях энергии) - замена постоянных магнитов на магниты захваченного магнитного потока (МЗП). Целесообразность такого решения обусловлена способностью сверхпроводников захватывать большой по величине магнитный поток, при этом достигается лучшее отношение мощности к крутящему моменту, что улучшает эффективность работы вращающейся машины. В конечном итоге это позволяет снизить вес и размер устройства. Кроме того, за счет совместного использования МЗП со сверхпроводящими обмотками могут быть снижены тепловые потери. Все это приводит к существенному увеличению мощности установок по сравнению с обычными, даже с учетом наличия охлаждающих систем [1].

В качестве МЗП перспективно использование композитных ВТСП лент второго поколения в виде набора замкнутых колец [2]. Кольцевые магниты захваченного потока на основе ВТСП лент обладают следующими преимуществами: отсутствие несверхпроводящих соединений, которые являются источниками резистивных потерь, высокие токонесущие и прочностные характеристики, а также простота масштабирования устройств. В работе представлены результаты численного анализа магнитов захваченного потока на основе ВТСП лент. Были разработаны расчетные модели магнитов захваченного потока, реализованные с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программной среде Comsol Multiphysics. С их помощью выполнены расчеты захваченного поля магнитов и распределения токов при импульсном намагничивании переменным однородным полем и локальным источником поля. Выполнен качественный анализ тепловых потерь и оценка эффективности использования сверхпроводящей системы. Выполнены экспериментальные исследования намагничивания кольцевых замкнутых элементов магнитов захваченного потока. Проведены измерения захваченного поля для различного числа лент в сборке магнита и диаметрах МЗП. Показано наличие порогового значения амплитуды внешнего магнитного поля, а также влияние частоты поля на амплитуду намагничивания кольцевых магнитов захваченного потока.

Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами расчетов. (Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ).

### *Список литературы*

1. Zhou D., Izumi M. and others// Supercond. Sci. Technol. 2012. Vol. 25. P. 103001.
2. Sheng J., Zhang Min and others// Supercond. Sci. Technol. 2017 Vol. 30. P. 094002.



А.А. ЗАСЫПКИНА<sup>1</sup>, Д.Д. СПАСОВ<sup>1,2</sup>, Р.М. МЕНШАРАПОВ<sup>1</sup>, Н.А. ИВАНОВА<sup>1</sup>, О.К. АЛЕКСЕЕВА<sup>1</sup>, В.Н. ФАТЕЕВ

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

## S-МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНОГО НОСИТЕЛЯ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ КАТАЛИЗАТОРА ТВЕРДОПОЛИМЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Рассмотрено влияние модификации серой углеродного носителя катализаторов на основные характеристики каталитического слоя водородного топливного элемента с твердым полимерным электролитом. Модификация осуществлялась при помощи метода магнетронного распыления. Было показано, что применение серы в качестве добавки приводит к повышению эффективности и стабильности работы электрокатализатора, а также к улучшению характеристик топливного элемента.

A.A. ZASYPKINA<sup>1</sup>, D.D. SPASOV<sup>1,2</sup>, R.M. MENSCHARAPOV<sup>1</sup>, N.A. IVANOVA<sup>1</sup>, O.K. ALEKSEEVA<sup>1</sup>, V.N. FATEEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research University MPEI, Moscow, Russia

## S-MODIFICATION OF A CARBON SUPPORT BY MAGNETRON SPUTTERING FOR CATALYST OF POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL

The influence of the carbon support S-modification on the main characteristics for the catalytic layer of a hydrogen polymer electrolyte membrane fuel cell of is considered. Modification was carried out using the method of magnetron sputtering. It has been shown that the use of sulfur as an additive lead to an improvement in the efficiency and stability of the electrocatalyst, as well as to an improvement in the performance of the fuel cell.

В состав водородных топливных элементов (ТЭ) с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) входят различные углеродные материалы, в том числе носители электрокатализаторов [1]. Преимущественно применяется аморфная сажа, однако развитие технологии требует улучшения ее свойств, в том числе с помощью имплантации модификаторов [2]. Модификация серой приводит к изменению спиновой плотности и созданию дополнительных структурных дефектов, что позволяет получить более эффективные и стабильные катализаторы [3]. Метод магнетронного распыления (МР) является технологически простым и эффективным способом, позволяющим внедрить частицы различных добавок (элементов) в структуру углеродного носителя.

В данной работе исследовалось влияние модифицирующей добавки серы в состав углеродного носителя на характеристики работы платинового электрокатализатора, а также на характеристики лабораторной ячейки ТЭ. Модифицирование углеродного носителя осуществлялось при помощи катодного распыления S-графитовой мишени в плазме магнетронного разряда в установке МИР-1 (НИЦ «Курчатовский институт») в режиме распыления с постоянным током (DC). В качестве носителя была использована сажа Vulcan XC-72, в структуру которой были успешно включены гетероатомы серы [4]. На полученном углеродном носителе был синтезирован платиновый катализатор, который в последствии исследован различными электрохимическими методами. В целях определения рабочих характеристик ТЭ с ТПЭ был собран мембранно-электродный блок, в состав которого был включен газодиффузионный слой (ELAT LT 1400W) с нанесенным электрокатализатором на S-модифицированном носителе. Показано, что для S-модифицированного катализатора выше значение электрохимически активной поверхности. Сильное взаимодействие частиц Pt с S-модифицированным углеродным носителем стабилизирует свойства катализаторов и повышает их долговечность (рис. 1).

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» в рамках выполнения приказа №89 от 20.01.2023 по пункту 3 п. 4.1. «Исследование механизмов деградации в электрокаталитических слоях, разработка методов ингибирования деградационных процессов для компонентов (катализаторов, каталитических слоев) электрохимических устройств с ТПЭ».

### Список литературы

1. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S., et al. // Materials Today. 2020. V. 32. P. 178-203.
2. Ott S., Bauer A., Du F., et al. // ChemCatChem. 2021. V. 13. № 22. P. 4759-4769.
3. Tian Y., Mei R., Xue D. et al. // Electr. Acta. 2016. V. 219. P. 781-789.
4. Кудинова Е.С., Иванова Н.А., Тишкин В.В. и др. // Сборник тезисов «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». 2020. С. 136-138.

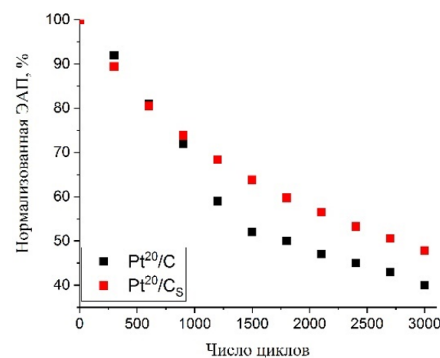


Рис. 1. Зависимость нормализованной электрохимически активной поверхности от числа циклов ускоренного стресс-тестирования для стандартного катализатора Pt<sup>20</sup>/C и S-модифицированного катализатора Pt<sup>20</sup>/CS.

В.В. ЗУБКО<sup>1,2</sup>, Н.С. ИВАНОВ<sup>2</sup>, К.Л. КОВАЛЕВ<sup>2</sup>, С.С. ФЕТИСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности ВНИИКП, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ В УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ ВТСП-2 ЛЕНТ

Приведена модель на основе метода конечных элементов для расчета гистерезисных потерь в ВТСП-2 устройствах. В модели учтены особенности и свойства ВТСП-2 лент.

V.V. ZUBKO<sup>1,2</sup>, N.S. IVANOV<sup>2</sup>, K.L. KOVALEV<sup>2</sup>, S.S. FETISOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Scientific R&D Cable Institute VNIKIP, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University) MAI, Moscow, Russia

## MODELING OF HYSTERESIS LOSSES IN DEVICES BASED ON SECOND GENERATION HTS TAPES

A model based on the finite element method for calculating hysteresis losses in 2G HTS devices is presented. The model takes into account the features and properties of 2G HTS tapes.

Так как ВТСП-2 ленты имеют высокую токонесущую способность, их начинают применять в компактных и мощных электромагнитных устройствах, таких как кабели, магниты, двигатели, генераторы и т.д. Если вышеприведенные устройства работают на переменном токе, то необходим расчет гистерезисных потерь в ВТСП-2 лентах для определения нагрузки на криогенную систему. Так, ВТСП-2 ленты имеют значительную нелинейность сопротивления от плотности тока ( $\rho(J)$ ), неоднородность критической плотности тока ( $J_c$ ), высокое значение соотношения длины к толщине ВТСП слоя, – это превращает расчет гистерезисных потерь в сложную задачу, особенно для устройств, состоящих из сотен или тысяч лент, так как требуется большое вычислительное время.

Модель на основе метода конечных элементов (МКЭ) разработана с помощью ANSYS (EMAG software, A/A-V формулировка) для расчета потерь на переменном токе в кабелях и в стопках ВТСП-лент, моделирующих обмотки устройств [1-4]. Для реализации возможности расчета гистерезисных потерь в ВТСП-2 лентах в численной модели использован итерационный алгоритм: устанавливается начальное значение удельного сопротивления ( $\rho_{0i}$ ) для каждого (i)-го элемента сетки ВТСП слоя, затем вычисляется плотность тока ( $J_{0i}$ ) в каждом элементе. После этого удельное сопротивление  $\rho(J)$  в каждом элементе итеративно обновляется в соответствии с выражением:

$$\rho_i^0 = 10^{-17}, \rho_i^{k+1} = f(\rho_i^k) = \frac{E_0}{J_{c,i}} \left( \frac{J_i^k}{J_{c,i}} \right)^{n-1}$$

где  $E_0 = 1$  мкВ/см – напряженность электрического поля при достижении,  $J_c$ ,  $n$  – степенной показатель,  $J_{c,i}$  – плотность критического тока в каждом элементе сетки, где учтена зависимость от тока от магнитного поля  $J_c(\vec{B})$  и неравномерность по ширине ленты. После всех итераций  $\frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\rho_i^k} < 10^{-4}$ , гистерезисные потери в ВТСП-слое ленты (с поперечным сечением  $S$ ) за цикл равны:

$$Q = 4 \int_0^{T_m} \int_S J^2 p ds d\tau = 4 \sum_{i_1}^{N_1} \Delta\tau \sum_i^N J_i^2 \rho_i s_i$$

где  $N_1$  – номер шага по времени от 0 до  $T_m$  ( $T_m = 1/4$  полного периода транспортного тока),  $N$  – количество элементов сетки в ВТСП слое,  $s_i$  – поперечное сечение элемента ВТСП слоя,  $\Delta\tau$  – шаг по времени.

Если имеется постоянное внешнее магнитное поле, то оно моделируется приложением магнитного векторного потенциала на границе расчетной области. Однородное переменное магнитное поле предложено моделировать внешней катушкой.

Для сокращения вычислительного времени, используется «Модель Бина», и, так как потери в ВТСП слоях являются гистерезисными и не зависят от частоты, это дает возможность проводить расчеты по одному временному интервалу ( $\Delta\tau = 1/4$  полного периода) для амплитудного значения тока ( $I_m$ ). Тогда потери в ВТСП-слое за один период транспортного тока могут быть представлены в виде:

$$Q = 4 \sum_i^N J_i (A_{z,i} - A_{z,0})$$

$A_{z,i}$  – магнитный векторный потенциал в узле i-го элемента сетки ВТСП-слоя, а  $A_{z,0}$  – магнитный векторный потенциал в узле сетки в центре ВТСП-слоя. Дополнительно для ускорения сходимости используется метод Вегстейна.

### Список литературы

1. Zubko V., Fetisov S., Vysotsky V. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26, № 3. P. 8202005.
2. Zubko V., Fetisov S., Zanev S., Vysotsky V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1559, N1, P. 012081.
3. Zubko V.V., Fetisov S.S., Zanev S.Y. // J. Phys., Conf. Ser. 2021, V. 2043, P. 012004.
4. Zanev S. Yu, Zubko V.V., Ivanov N.S., Kovalev K.L., Podguzov V.A. // Russian Electr. Engin. 2022. V. 93, № 6. P. 424.



Н.А. ИВАНОВА<sup>1</sup>, А.А. СТУКАЛО<sup>3</sup>, М.В. СИНЯКОВ<sup>1,2</sup>, Д.Д. СПАСОВ<sup>1,3</sup>, Р.М. МЕНШАРАПОВ<sup>1</sup>, Б.В. ИВАНОВ<sup>1</sup>, В.Н. ФАТЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ МЕМБРАН НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОДОРОДНОГО КОМПРЕССОРА/КОНЦЕНТРАТОРА

Рассмотрено влияние ионизационного излучения на состав и структуру протонпроводящих мембран марки Nafion<sup>®</sup> и на параметры работы электрохимического водородного компрессора/концентрактора (ЭВК/К) с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) на их основе. Облучение мембран проводилось на ускорителе частиц в НИЦ «Курчатовский институт». Мембранно-электродные блоки (МЭБ) ЭВК/К на основе облученных мембран исследовались в составе экспериментального стенда в диапазоне температур 20–50 °С и давлений 0.1–1 атм. в стационарном режиме (постоянное давление).

N.A. IVANOVA<sup>1</sup>, A.A. STUKALO<sup>3</sup>, M.V. SINYAKOV<sup>1,2</sup>, D.D. SPASOV<sup>1,3</sup>, R.M. MENSCHARAPOV<sup>1</sup>, B.V. IVANOV<sup>1</sup>, V.N. FATEEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian University of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research University MPEI, Moscow, Russia

## THE EFFECT OF PROTONCONDUCTING MEMBRANES IRRADIATION ON THE ELECTROCHEMICAL HYDROGEN COMPRESSOR/CONCENTRATOR OPERATION PARAMETERS

The effect of ionization radiation on the composition and structure of Nafion<sup>®</sup> proton-conducting membranes and on the operation parameters of an electrochemical hydrogen compressor/concentrator (EHC/C) with a proton exchange membrane (PEM) is considered. Membrane-electrode assemblies (MEAs) of EHC/C based on irradiated membranes were studied as part of an experimental facility in the temperature range from 20 to 50 °C and pressures range from 0.1 to 1 atm. in constant pressure-mode.

Увеличение мощности и количества топлива (смесь трития и дейтерия) в термоядерных установках приводят к повышению производительности систем топливного цикла (ТЦ), что вызывает необходимость находить и разрабатывать новые системы на основе эффективных технологий извлечения изотопов водорода из газовых смесей. Одной из таких технологий является электрохимический водородный компрессор/концентрактор (ЭВК/К). Преимуществом использования данного устройства в составе элементов ТЦ является объединение трех процессов: выделение/очистка, концентрирование, перекачка/компрессия водорода. На основании проведенного анализа возможности применения ЭВК/К [1] в системах ТЦ термоядерных реакторов было выявлено две характерные задачи, решение которых обеспечит возможность использования данной технологии: поддержка высокого уровня влагоемкости и радиационная стойкость ТПЭ.

Ионизирующее излучение оказывает существенное воздействие на полимерные материалы (ТПЭ), приводя к разрушению химических связей, изменению их структуры и свойств [2], [3]. Приведенные работы свидетельствуют о значимом влиянии радиационного облучения на эффективность работы электрохимических устройств с ТПЭ, однако даже при значительном уровне облучения ТПЭ сохраняет протонпроводящие и другие свойства, что позволяет их использование в системах ТЦ ТЯР с относительно низким уровнем ионизирующего излучения. Настоящее исследование посвящено изучению влияния облученной мембраны в составе ЭВК/К на параметры его работы.

Облучение мембран проводилось на установке РС-20 (НИЦ «Курчатовский институт»). Анализ энерговклада электронного пучка на ускорителе РС-20, а также доз тормозного рентгеновского излучения показал, что оптимальной для экспериментов является схема, в которой облучаемый образец будет защищён от прямого контакта с электронным пучком и будет облучаться только рентгеновским излучением и рассеянными электронами, что является подходящими условиями для имитации воздействия трития на мембрану. В этом случае интегральная доза облучения может достигать 105 рентген при вкладе тормозного рентгеновского излучения порядка 103 рентген.

Мембранно-электродные блоки (МЭБ) ЭВК/К на основе облученных мембран исследовались в составе экспериментального стенда в диапазоне температур 20–50 °С и давлений 0.1–1 атм. в стационарном режиме (постоянное давление). Показано изменение параметров работы ЭВК/К на основе облученной мембраны.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22–29–01367.

*Список литературы*

1. Иванов Б. В. и др. О возможности применения электрохимического водородного насоса в топливном цикле ТЯР. - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 105-119
2. Перевезенцев А. Н. и Розенкевич М. Б., Технология трития для термоядерного реактора. Долгопрудный: ООО "Издательский дом "Интеллект," 2018.
3. Tsao C. S., Chang H. L., Jeng U. S., Lin J. M., and Lin T. L., SAXS characterization of the Nafion membrane nanostructure modified by radiation cross-linkage. — Polymer (Guildf.), 2005, vol. 46, № 19 SPEC. ISS., p. 8430–8437.

П.А. ИВАНОВА, К.В. СМИРНОВА, А.А. ИГНАТЬЕВ, А.Н. ИВАНОВ, В.В. РЫБКИН, Д.А. ШУТОВ

*Ивановский государственный химико-технологический университет ИГХТУ, Иваново, Россия*

## **ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФЕРРИТОВ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НИТРАТОВ**

В данной работе исследован процесс образования нерастворимых соединений ферритов кобальта и никеля. С помощью разряда постоянного тока происходило воздействие на водные растворы нитратов кобальта, никеля и железа. Выявлено, что воздействие тлеющего разряда на водные растворы нитратов кобальта и никеля приводит к синтезу порошков в приповерхностном слое жидкого анода. Образовавшаяся твердая фаза представляла собой промежуточные нерастворимые соединения в виде гидроксонитратов кобальта, никеля и железа. Воздействие высокой температуры (~1000 °С) на порошки, изменения которых протекает в несколько стадий, приводит к образованию черной смеси кристаллических оксидов соответствующих металлов.

P.A. IVANOVA, K.V. SMIRNOVA, A.A. IGNATEV, A.N. IVANOV, V.V. RYBKIN, D.A. SHUTOV  
*Ivanovo State University of Chemistry and Technology ISUCT, Ivanovo, Russia*

## **PLASMA-CHEMICAL SYNTHESIS OF COBALT AND OF NICKEL FROM AQUEOUS SOLUTIONS OF NITRATE**

In this work, the process of formation of insoluble compounds of cobalt and nickel ferrites has been studied. With the help of a direct current discharge, aqueous solutions of cobalt, nickel and iron nitrates were affected. It was revealed that the effect of a glow discharge on aqueous solutions of cobalt and nickel nitrates leads to the synthesis of powders in the near-surface layer of the liquid anode. The resulting solid phase was insoluble intermediate compounds in the form of cobalt, nickel, and iron hydroxonitrates. Exposure to high temperature (~1000 °С) on powders, the changes of which proceed in several stages, leads to the formation of a black mixture of crystalline oxides of the corresponding metals.

Получение твердофазных соединений из растворов под действием плазмы газового разряда - один из простых и эффективных методов получения микро и нано материалов. В настоящее время функциональные материалы на основе ферритов кобальта и никеля используются в качестве сенсоров, регистрирующих устройств, а также находят широкое применение в различных областях промышленности, в технике, физических приборах. С другой стороны, интерес представляет достижение практических результатов в части перехода к новым материалам, индустрии наносистем и технологиям получения функциональных материалов [1].

Целью настоящей работы являлось получение порошков ферритов кобальта и никеля в процессе плазменно-растворимого синтеза нитратов, при воздействии тлеющего разряда на их водные растворы в среде воздуха.

Для обработки растворов использовалась экспериментальная установка, схема которой подробно описана в работе [2]. Ток разряда варьировался в пределах 30-70 мА. Под действием неравновесной низкотемпературной плазмы в приповерхностном слое А-ячейки (анод) образовался коллоидный раствор, который в дальнейшем выпадал в осадок. Полученная фракция (А-ячейка) собиралась пипеткой, центрифугировалась и промывалась дистиллированной водой. Промытый золь сушился при температуре 60 °С в течение 24 часов. Для получения ферритов NiO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CoO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, синтезированные порошки гидроксонитратов подвергались термической обработке при 1000 °С. Для исследования морфологии, состава и структуры получаемых порошков использовали следующие методы: рентгеноструктурный анализ (РСА), который проводился с помощью дифрактометра ДРОН 3М. Изображения поверхности порошков, качественный и количественный состав исследуемых образцов получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan VEGA3 с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС). Применение такого подхода позволило определить содержание Fe, Ni, Co и O в смесях: FeOH(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NiOHNO<sub>3</sub>, CoOHNO<sub>3</sub>, а также составы порошков после прокаливании. Эффективный радиус полученных частиц определяли методом динамического рассеяния света (ДРС) на анализаторе размеров частиц и дзета-потенциала Photocor Compact-Z, получаемые частицы имеют два характерных размера один 90 нм другой 1.5 мкм.

Полученные высокотемпературной обработкой порошки представляют собой ферриты соответствующих металлов с структурой типа шпинель. При этом данная обработка не приводит к укрупнению или изменению морфологии поверхности.

Реактивы приобретены за счет гранта РФФИ № 22-22-00372 (rscf.ru/project/22-22-00372/). К.В. Смирнова благодарит за финансовую поддержку грант Президента Российской Федерации (МК-2607.2022.1.2).

Исследование выполнено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научной аппаратурой ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, № 075-15-2021-671).

### *Список литературы*

1. Миргород Ю.А., Борщ Н.А., Федосюк В.М., Юрков К.Ю. Магнитные свойства наночастиц феррита никеля, полученных флотоэкстракционным методом /Ю. А. Миргород, Н. А. Борщ, В. М. Федосюк, Г. Ю. Юрков // Неорганические материалы. - 2012. - Т. 48. - № 12. - С. 1375–1380.
2. Shutov D., Ivanov A., Anna V., Rakovskaya A., Smirnova K., Manukyan A., Rybkin V. 2020 J. Phys. D: Appl. Phys. 53 445202.

З.А. ИСАХАНОВ<sup>1</sup>, Ф.Ё. ХУДАЙКУЛОВ<sup>2</sup>, Б.Е. УМИРЗАКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

## СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ WO<sub>3</sub>/W(111)

Получены зависимости упругого отражения электронов (УОЭ)  $R$  и его первой производной  $-dR/dE_p$  от энергии первичных электронов  $E_p$  ( $E_p=1-30$  эВ). Зависимость  $R(E_p)$  имеет немонотонный характер, это связано с зонно-энергетическим строением WO<sub>3</sub>. Первое резкое уменьшение  $R$  наблюдается, при  $E_p \approx 3,2$  эВ, можно полагать, что это связано с переходом электронов с потолка валентной зоны  $E_v$  на дно зоны проводимости  $E_c$ , что приблизительно равно ширине запрещенной зоны  $E_g = E_p = E_v - E_c$ .

Z.A. ISAKHANOV<sup>1</sup>, F.Y. XUDAYKULOV<sup>2</sup>, B.E. UMIRZAKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

## SPECTROSCOPY OF THE WO<sub>3</sub>/W(111) SYSTEM SURFACE

The dependences of the elastic electron reflection (EER)  $R$  and its first derivative  $-dR/dE_p$  on the primary electron energy  $E_p$  ( $E_p=1-30$  eV) are obtained. The dependence  $R(E_p)$  has a nonmonotonic character, which is related to the energy band structure of WO<sub>3</sub>. The first sharp decrease in  $R$  is observed at  $E_p \approx 3.2$  eV, it can be assumed that this is due to the transition of electrons from the top of the valence band  $E_v$  to the bottom of the conduction band  $E_c$ , which is approximately equal to the band gap  $E_g = E_p = E_v - E_c$ .

В области мелкодисперсных порошков особое место занимают металлические кластеры [1], а среди неорганических наноматериалов особо выделяются оксиды переходных металлов, одним из них является триоксид вольфрама (WO<sub>3</sub>). Известно, что WO<sub>3</sub> стимулирует процессы взаимодействия различных газов и паров на своей поверхности и сам при этом изменяет свои свойства, которые проявляются в электро- и фотохромных эффектах. Изменение оптических свойств систем на основе триоксида вольфрама под воздействием газовых сред представляет интерес в связи с необходимостью создания индикаторов для контроля содержания и утилизации соответствующих газов в реальных условиях.

В данной работе представлено определение параметров энергетических зон поликристаллических пленок WO<sub>3</sub>/W(111) с толщиной  $\sim 400$  Å. Пленки WO<sub>3</sub> получены на поверхности монокристаллического вольфрама способом окисления в атмосфере кислорода при температуре выше 5000°C. Все исследования проводились при вакууме не хуже 10<sup>-6</sup> Па с использованием комплекса методов.

Получены спектры характеристических потерь энергии (ХПЭ) электронов чистого вольфрама и вольфрама с пленкой WO<sub>3</sub> толщиной  $\sim 400$  Å. На спектрах четко обнаруживаются пики характерные для поверхностных ( $\hbar\omega_s$ ), объемных ( $\hbar\omega_v$ ) и некоторые особенности, обусловленные возбуждением межзонных переходов. А также нами записывались зависимости упругого отражения электронов (УОЭ)  $R$  и его первая производная  $-dR/dE_p$  от энергии первичных электронов  $E_p$  в области малых энергий ( $E_p=1-30$  эВ). Перед измерением система WO<sub>3</sub>/W(111) обезгаживались при  $T=1300$ К в течении 3-4 часов. Зависимость  $R(E_p)$  имеет немонотонный характер, что непосредственно связано с зонно-энергетическим строением WO<sub>3</sub>. Первое резкое уменьшение  $R$  наблюдается, при  $E_p \approx 3,2$  эВ, можно полагать, что это связано переходом электронов с потолка валентной зоны  $E_v$  на дно зоны проводимости  $E_c$ , что приблизительно равна ширине запрещенной зоны  $E_g = E_p = E_v - E_c$ . Следующее резкое уменьшение  $R$  наблюдается при,  $E_p \approx 5,9$  эВ, что связано с переходом электронов из  $E_v$  на уровень вакуума  $E_{\text{вак}}$  ( $\Delta E = E_v - E_g = 5,9 - 3,2 = 2,7$  эВ). На зависимости  $R(E_p)$  также обнаруживается ряд особенностей, которые могут быть связаны с возбуждением электронов с примесных уровней ( $E_{\text{прим}}$ ) или из максимумов плотности электронных состояний валентной зоны в максимумы зоны проводимости. В немонотонность кривых  $R(E_p)$  также даёт вклад возбуждение коллективных (плазменных) колебаний валентных электронов. Однако особенности, связанные с возбуждением плазменных колебаний (плазмонов), на зависимостях  $R(E_p)$  выделить очень трудно.

Для определения параметров энергетических зон, плотности энергетических состояний валентных электронов и для интерпретации пиков, наблюдаемых в спектре  $-dR/dE_p$ , нами получены спектры (кривые энергетического распределения (КЭР)) фотоэлектронов чистого W(111) и при энергии фотонов  $h\nu=15,6$  эВ W(111) с пленкой WO<sub>3</sub> толщиной 400 Å. Структура спектров фотоэлектронов хорошо отражает плотность состояния электронов валентной зоны. В спектре W(111) хорошо обнаруживается пики при энергиях связи  $E_{\text{св}} = -2,2$  и  $-4$  эВ, наличие которых объясняется возбуждением электронов из  $6s$  и  $5f$  уровней W. В случае пленки WO<sub>3</sub> ширина, форма и структура спектра резко изменяется. В нем появляются особенности при  $E_{\text{св}} = -0,6; -2,4$  и  $5,2$  эВ. В работе приведена интерпретация основных особенностей, наблюдаемых на спектрах УОЭ и ФЭ. Показано, что основные особенности обусловлены возбуждением электронов из гибридных состояний –  $6s, 5f$  уровней вольфрама и  $2p$  уровня кислорода.

### Список литературы

1. Смирнов Б.М. Кластерная Плазма// УФН. – 2000. Т. 170, No.5. С. 495- 534.

## ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

В данной работе исследовались изменение элементного и химического состава поверхности Cu при очистке прогревом в сочетании ионной бомбардировкой. Для элементного анализа меди и химических состояний атомов примесных элементов использовали метод ВИМС. С помощью полученных результатов можно корректировать технологические процессы по получению меди с улучшенной чистотой.

Z.A. ISAKHANOV, I.O. KOSIMOV, A.S. KHALMATOV, A.A. AKHMEDOV, Z.E. MUKHTAROV  
Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

## FEATURES OF CLEANING THE SURFACE OF SINGLE-CRYSTAL COPPER

In this work, we studied the change in the elemental and chemical composition of the Cu surface during cleaning by heating in combination with ion bombardment. For elemental analysis of copper and chemical states of impurity element atoms, the SIMS method was used. With the help of the results obtained, it is possible to correct technological processes for obtaining copper with improved purity.

Cu имеет особый интерес при создании МДП-структур для разработки новых видов СВЧ приборов (транзисторов, больших и ультрабольших ИС, дисплеев и запоминающих устройств, оптических и оптоэлектронных приборов). Эти системы, в частности, содержат контактные, барьерные и токопроводящие слои на основе Al, Cu, Au и Ag. При этом барьерный слой может являться и контактным слоем [1]. При этом во многих случаях Cu может использоваться в качестве подложки. Это требует повышение чистоты поверхности Cu путем снижения вредных примесей, особенно газов (углерод, кислород, водород, азот и т.д.) и щелочных металлов, в результате чего медь становится ломкой и хрупкой. Основной целью данной работы является исследование изменение элементного и химического состава поверхности Cu при очистке прогревом в сочетании ионной бомбардировкой.

Для элементного анализа и химических состояний атомов примесных элементов в меди мы использовали методы вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС).

На рис.1 представлена масс-спектрограмма отрицательно заряженных распыленных частиц, полученная при бомбардировке мишени из меди пучком ионов цезия  $Cs^+$  с начальной энергией  $E_1 = 6,7$  кэВ.

Видно, что в масс-спектрограмме наряду с пиками других примесных элементов обнаруживаются пики (максимумы) примесного элемента водорода, и его соединений с кислородом в виде,  $HO$  и  $H_2O$ .

Пары воды, могут, залегая между кристалликами и кристаллическими зернами, ослаблять межкристаллические связи и в результате чего медь становится ломкой и хрупкой.

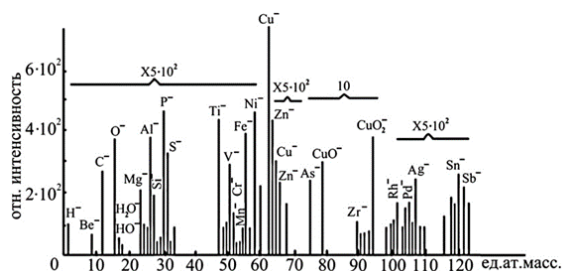


Рис. 1. Масс-спектрограмма отрицательно заряженных, распыленных частиц, полученных при бомбардировке пучком ионов  $Cs^+$  с  $E_0=6,3$  кэВ.

В масс-спектрограмме наблюдаются пики примесных элементов: Mg, Mn, Si, K, Cr, V, Zn, As, Zr, Pd, Ag, Sn, Sb, и др., что связано высокой чувствительностью метода масс-спектрометра. При ионной бомбардировке температура  $T \approx 1000$  К оказалась наиболее оптимальной. Дальнейшая очистка поверхности проводилась имплантацией ионов активных металлов с последующим отжигом при  $T \approx 1000$  К. Для этого Cu очищалась сначала прогревом до  $T \approx 1200$  К. Затем на очищенную поверхность направлялись ионы  $Cs^+$  с  $E_0=1$  кэВ при дозе насыщения  $D=D_{нас} \approx 6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Выбор Cs обусловлено высокой активностью и малой температурой десорбции (600-700 К). После прогрева ионно-имплантированной Cu, при  $T \approx 1000$  К в течение 30 мин. поверхность максимально очищалась. На основании вышеизложенного, можно заключить, что с помощью таких результатов можно корректировать технологические процессы по получению меди с улучшенной чистотой.

### Список литературы

1. Dosmukhamedov N.K., Zholdasbay E.E. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2016. Section 3, № 3 Materials Science. P. 20–22.

А.А. КАЗЬМИН, С.А. НУРЕТДИНОВ

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь*

## **РОСТ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ УГЛЕРОДА**

Показано, что введение наночастиц в лакокрасочный материал приводит к изменению характера формирования структуры лакокрасочного покрытия за счет взаимодействия алкидных и меламиноформальдегидных смол с наночастицами. Введение в эмаль МЛ-12 наночастиц углерода в количествах ~0,25 % приводит к росту коррозионной стойкости эмали до 20 %, а износостойкости до 50 %.

A. A. KAZMIN, S. A. NURETDINOV

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus*

## **GROWTH OF CORROSION RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE OF PAINTS COATINGS MODIFIED WITH CARBON NANOPARTICLES**

It is shown that the introduction of nanoparticles into a paintwork material leads to a change in the nature of the formation of the paintwork structure due to the interaction of alkyd and melamine-formaldehyde resins with nanoparticles. The introduction of carbon nanoparticles into ML-12 enamel in amounts of ~0.25% leads to an increase in the corrosion resistance of enamel up to 20%, and wear resistance up to 50%.

В настоящее время наблюдается рост требований к эксплуатационным свойствам лакокрасочных покрытий (ЛП). Для удовлетворения возросшим требованиям известные ЛП подвергаются модификации подобно полимерным и композиционным материалам [1]. В них добавляют различные вещества, которые улучшают их эксплуатационные свойства. Одними из таких эффективных модификаторов являются наноструктуры [2]. Интерес представляет модификация ЛП наноструктурами углерода. Наноструктуры углерода отличаются многообразием форм, обладают развитой поверхностью, имеют большое число активных центров, высокую плотность поверхностного заряда. В литературе сообщалось о положительном влиянии наноструктур углерода на эксплуатационные свойства ЛП, однако о коррозионной стойкости и износостойкости сведения не представлены [3-4].

Наноструктуры углерода используемые для модификации лакокрасочных материалов синтезируются электровзрывными и плазмохимическими методами, которые используют плазменное состояние вещества [5-7].

Сравнительные исследования коррозионной стойкости модифицированных ЛП проводились в камере соляного тумана. Были приготовлены пять групп пластин. Первая группа эталонная – покрыта не модифицированной эмалью МЛ-12. Остальные 4 группы пластин были покрыты модифицированной эмалью МЛ-12 с массовой долей наноструктур 0,05%, 0,075%, 0,1% и 0,25% соответственно. ЛП на поверхности пластин было прорезано резцом шириной 0,5 мм до металла. Общая длина прорезов на одной пластине ~1100 мм, число пересечений прорезов 64.

С ростом массы наномодификатора количество точек вспучивания и суммарная площадь вспучиваний внутри квадратов прорезов уменьшается. Наиболее сильное коррозионное воздействие обнаруживается вдоль линий прорезов, а также на их пересечениях. Это связано с тем, что в местах прорезов металл не защищен и непосредственно контактирует с соляным туманом. Коррозия идет со стороны металла под ЛП и поднимает его. С ростом массы наномодификатора количество очагов отслаивания ЛП вдоль линий прорезов уменьшается. Также снижается суммарная длина отслаиваний ЛП вдоль линий прорезов. Увеличение коррозионной стойкости обусловлено ростом адгезии модифицированного лакокрасочного покрытия к металлу и стойкости к соляному туману. Введение в эмаль МЛ-12 наночастиц углерода в количествах 0,25 % приводит к росту коррозионной стойкости эмали до 20 %.

Износостойкость модифицированных лакокрасочных покрытий исследовалась на машине трения УМТ-200. Измерялось время в течение которого истиралось лакокрасочное покрытие до оголения металлической подложки (пластины). С ростом массы наномодификатора время истирания лакокрасочного покрытия возрастает. Введение в эмаль МЛ-12 наночастиц углерода в количествах 0,25 % приводит к росту времени истирания до 50 %.

Введение наноструктур в лакокрасочный материал приводит к изменению характера формирования структуры ЛП за счет взаимодействия алкидных и меламиноформальдегидных смол с ними. Образуются связи полимер – наночастица, которые при деформации разрушаются и снова восстанавливаются в новых конфигурациях.

### *Список литературы*

1. Верхоланцев В. В. // Лакокрасочные материалы и их применение. 2004. № 10. С. 20-23.
2. Anufrik S.S.; Kurian, N.N., Zhukova, I.I. and others // [Journal of Applied Spectroscopy](#). 2016. Vol. 83, No 5. P. 764–770.

3. Жданок, С.А., Крауклис А.В., Борисевич К.О. и другие. // Инженерно-физический журнал. 2011. № 6. С. 1158–1161.
4. Глоба А.И., Прокопчук Н.Р., Лаптик И.О. и другие. // Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2020. № 2. С. 92–99.
5. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка. 2017. Т.7, № 1. С. 56-65.
6. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка. 2018. Т.8, № 1. С. 50-61.
7. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Лещик С.Д. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка. 2017. Т.7, № 2. С. 47-57.

## РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ БОГОЛЮБОВА-ДЕ-ЖЕНА ДЛЯ ТРЕУГОЛЬНОЙ РЕШЕТКИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Численно решены уравнения Боголюбова-де-Жена для треугольной решетки во внешнем магнитном поле. Получено пространственное распределения параметра порядка.

A.V. KALASHNIKOV, A.V. KRASAVIN, V.D. NEVEROV  
 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SOLUTION OF BOGOLIUBOV-DE GENNES EQUATIONS FOR A TRIANGLE LATTICE IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

The Bogoliubov-de Gennes equations are solved numerically for a triangular lattice in an external magnetic field. The spatial distribution of the order parameter is obtained.

Метод Боголюбова-де-Жена широко используется в теории сверхпроводимости для исследования локальной электронной структуры сверхпроводников.

Уравнения Боголюбова-де-Жена имеют вид:

$$\begin{pmatrix} H & \Delta \\ \Delta^+ & -H^+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}.$$

Здесь операторы  $H$  и  $\Delta$  определяются своими матричными элементами

$$H_{ij} = t_{ij} e^{-\frac{2\pi i}{\Phi_0} \int_i^j \vec{A} dl} + U_i \delta_{ij}; \quad \Delta_{ij} = \Delta_i \delta_{ij},$$

$t_{ij}$ - амплитуда туннелирования электронов между соседними узлами  $i$  и  $j$ ,  $\vec{A}$  – векторный потенциал магнитного поля,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока, а параметры порядка  $\Delta_i$  и потенциал Хартри  $U_i$  определяются из самосогласованных уравнений

$$\Delta_i = g \langle c_{i\uparrow} c_{i\downarrow} \rangle; \quad U_i = -\frac{g}{2} \sum_{\sigma} \langle c_{i\sigma}^+ c_{i\sigma} \rangle,$$

где  $g$  – амплитуда спаривания БКШ.

Эти уравнения были решены для двумерной треугольной решетки. Получены пространственные распределения параметра порядка (рис.1) и магнитного поля в образце; Исследовано поведение длины когерентности и решетки вихрей от параметров модели.

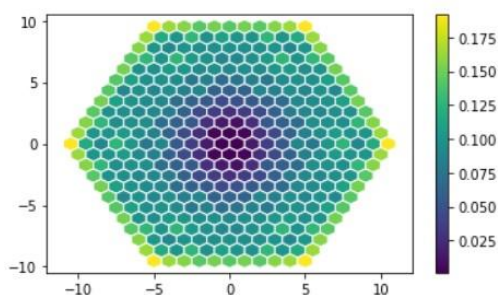


Рис.1. Пространственное распределение сверхпроводящего параметра порядка для треугольной решетки из 397 узлов. Напряженность магнитного поля соответствует прохождению одного элементарного кванта магнитного потока через систему.

Результаты работы будут использованы для моделирования низкоразмерных разупорядоченных сверхпроводящих материалов.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Д. СЫТЧЕНКО, С.И. РУПАСОВ, Е.А. ЛЕВАШОВ  
*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*

### **ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ Me-Si-B (Me: Mo, Zr, Hf), ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ DCMS**

Представлены результаты исследования структуры и свойств покрытий на основе легированных бором дисилицидов молибдена, гафния и циркония, полученных методом магнетронного напыления на постоянном токе (DCMS – direct current magnetron sputtering).

PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, A.D. SYTCHENKO, S.I. RUPASOV, E.A. LEVASHOV  
*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

### **OXIDATION-RESISTANT Me-Si-B (Me: Mo, Zr, Hf) COATINGS DEPOSITED BY DCMS TECHNOLOGY**

The results of the study of the structure and properties of coatings based on boron-doped molybdenum, hafnium and zirconium disilicides obtained by direct current magnetron sputtering (DCMS) are presented.

Объёмные керамические материалы, а также покрытия на основе силицидов тугоплавких металлов (MoSi<sub>2</sub>, ZrSi<sub>2</sub>, HfSi<sub>2</sub>) нашли применение в различных ответственных узлах и деталях современной техники, благодаря комплексу уникальных свойств, среди которых можно отметить высокие значения температуры плавления, жаростойкости, прочности и твёрдости. Легирование бором за счёт управления химическими и физическими свойствами формирующихся на поверхности защитных оксидных плёнок, способствует дополнительному повышению стойкости к высокотемпературному окислению. Среди распространённых технологий модификации поверхности одно из лидирующих мест занимает метод магнетронного напыления на постоянном токе DCMS (direct current magnetron sputtering), обеспечивающий получение качественных, плотных, малодефектных покрытий с низкой шероховатостью при относительно высокой производительности. Применительно к осаждению жаростойких покрытий, на основе ZrSi<sub>2</sub> и HfSi<sub>2</sub> он малоизучен. Целью данной работы является комплексное исследование покрытий (Mo, Zr, Hf)-Si-B, осаждённых методом DCMS.

Катоды MoSi<sub>2</sub>-MoB, ZrSi<sub>2</sub>-ZrB<sub>2</sub>-MoSi<sub>2</sub>, HfSi<sub>2</sub>-HfB<sub>2</sub>-MoSi<sub>2</sub> были изготовлены методом горячего прессования измельчённых продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Перед осаждением покрытий производилась предварительная ионная очистка подложек. В качестве подложек использовались Si и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Для нанесения покрытий в режиме DCMS применялся блок питания Advanced Energy Pinnacle Plus 5x5. Параметры осаждения были следующими: задаваемый постоянный ток 2 А, постоянное напряжение 500 В, время нанесения 40 мин, давление Ar ~0.1 Па.

Для исследования жаростойкости были проведены отжиги полученных покрытий на воздухе в интервале температур 1000-1700°C. Структура исходных и подвернутых термической обработке покрытий исследовалась с использованием методов РЭМ, ЭДС, РФА и ОЭСР. Механические свойства были измерены с помощью наноиндентирования. Была оценена трещиностойкость покрытий, а также исследовано поведение покрытий в условиях трибологического контакта по схемам «pin-on-disk» (трение скольжения), и «ball-on-plate» (циклические ударно-динамические испытания, абразивные испытания).

Установлено, что основной структурной составляющей покрытий являлись наноразмерные кристаллиты соответствующих силицидных фаз (h-MeSi<sub>2</sub>), атомы бора участвовали в формировании аморфных прослоек или областей (a-MeB). Твёрдость покрытий составляла от 20 до 30 ГПа в зависимости от концентраций Si и B. Покрытия оптимального состава кратковременно сопротивлялись окислению при нагреве на воздухе до температур 1500-1700°C. Установлено, что слои a-SiO<sub>2</sub> (покрытия Mo-Si-B), a-SiO<sub>2</sub>/nc-ZrO<sub>x</sub> (покрытия Zr-Mo-Si-B) и a-SiO<sub>2</sub>/nc-HfO<sub>x</sub> (покрытия Hf-Mo-Si-B), формирующиеся на поверхности покрытий в процессе выдержки на воздухе, обуславливают высокую жаростойкость покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-49-00141.



А.В. КЛАУЗ, С.В. РОГОЖКИН, А.А. ХОМИЧ, А.А. БОГАЧЁВ, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт», Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ

Исследовано влияние облучения на наноструктуру трёх ДУО сталей методом атомно-зондовой томографии и просвечивающей электронной микроскопии: Eurofer ODS, 10Cr ODS и KP-3 ODS с различными системами легирования. Наиболее стабильные оксидные частицы типа Y-O наблюдается в Eurofer ODS при облучении при 350 °C и 500 °C в пределах доз до 100 сна.

A.V. KLAUZ, S.V. ROGOZHNIKIN, A.A. KHOMICH, A.A. BOGACHEV, A.G. ZALUZHNYI  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## STUDY OF THE INFLUENCE OF Fe ION IRRADIATION ON THE NANOSTRUCTURE OF OXIDE DISPERSION-STRENGTHENED STEELS WITH ULTRAMICROSCOPY METHODS

The radiation stability of the nanostructure of three ODS steels was studied by atom-probe tomography and transmission electron microscopy: Eurofer ODS, 10Cr ODS and KP-3 ODS with different alloying systems. The most stable Y-O type oxides are observed in Eurofer ODS when irradiated at 350°C and 500°C up to 100 dpa.

В перспективных ядерных и термоядерных реакторах материалы активной зоны должны обладать высокой радиационной стойкостью и жаропрочностью при температурах до 700 °C и дозах до 200 сна (смешений на атом). Перспективными материалами, способными удовлетворить эти требования, являются дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, содержащие в своей матрице однородно распределенные термически стабильные наноразмерные оксиды [1-4].

Основной тенденцией современного развития разработок ДУО сталей, является создание модельных сплавов, отличающихся друг от друга легирующими добавками и их содержанием, попытка установить различного рода корреляции между исходным составом и поведением структурно-фазового состояния в условиях облучения.

В данной работе рассматривались три ДУО стали 10Cr ODS, KP-3 ODS и Eurofer ODS в исходном состоянии и после облучения ионами Fe<sup>2+</sup> с энергией 5,6 МэВ при температурах 350°C и 500°C и повреждающих дозах до 100 сна. Исследование проводилось с использованием современных методов ультрамикроскопии: просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии [5].

В исходном состоянии сталей обнаружены оксидные включения и кластеры. Средний размер оксидов варьировался от 3 до 8 нм, их объёмная плотность составляла от  $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$  до  $13 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Объёмная плотность кластеров варьировалась от  $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$  до  $4 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$  [6].

Обнаружено, что оксидные включения в стали Eurofer ODS более стабильны к ионному облучению до дозы 30 сна при 350°C, чем включения в сталях 10Cr ODS и KP-3 ODS. При этом объёмная плотность кластеров уменьшилась во всех трёх сталях.

Исследование, облучённых до 100 сна при 500°C образцов, существенное уменьшение объёмной плотности оксидных частиц в сталях 10Cr ODS (в ~ 5 раз) и KP-3 ODS (в ~ 4 раза) [7]. При этом в Eurofer ODS объёмная плотность оксидных частиц сохранилась в пределах погрешности. При этом объёмная плотность кластеров резко уменьшилась только в Eurofer ODS, а в 10Cr ODS и KP-3 ODS наоборот выросла. Предположительно это связано с взаимодействием кластеров с подсистемой оксидных частиц.

Комплекс исследований показал, что сталь Eurofer ODS имеет стабильные частицы не только в области нижней границы температурного интервала эксплуатации, но и для промежуточных температур эксплуатации.

### Список литературы

1. B. Mouawad, X. Boulnat, D. Fabrègue, M. Perez, Y. de Carlan // Journal of Nuclear Materials. 2015. Vol. 465. P. 54-62.
2. Xu S., Zhou Z., Jia H., Yao Z. // Steel research int. 2018. Vol. 90. P. 1800594.
3. Wharry J.P., Swenson M.J., Yano K.H. // J. Nucl. Mater. 2017. Vol. 486. P. 11.
4. Liu X., Miao Y., Wu Y., Maloy S.A., Stubbins J.F. // Scripta Mater. 2017. Vol. 138. P. 57.
5. Michael K. Miller. Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008, Building 4500S, Mississippi 6136, Oak Ridge, Tennessee 37831-6136 "Atom probe tomography", Review of Scientific Instruments 78, 031101 (2007),
6. С. В. Рогожкин, А.А. Хомич, А.А. Богачев, А.А. Никитин, В.В. Хорошилов, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, А.Л. Васильев, М.Ю. Пресняков // Ядерная физика и инжиниринг, 2020, том 11, № 1, с. 22–31.
7. S. V. Rogozhkin, A. V. Klauz, A. A. Bogachev, A. A. Khomich, P. A. Fedin, and O. A. Raznitsyn // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85, No. 12, P. 1998-2006.

П.С. КЛЕММЕР<sup>1,2</sup>, Ю.А. МИТЯГИН<sup>1</sup>, М.П. ТЕЛЕНКОВ<sup>1,2</sup>, П.Ф. КАРЦЕВ<sup>3</sup>, С.А. САВИНОВ<sup>1</sup>,  
В.В. ВОРОНОВА<sup>1,2</sup>, Д.А. ПАШКЕЕВ<sup>1</sup>, В.П. МАРТОВИЦКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## СПЕКТРЫ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ СО ВСТРОЕННОЙ СЕРИЕЙ ТОНКИХ ТУННЕЛЬНО-ПРОЗРАЧНЫХ БАРЬЕРОВ

Рассмотрены спектры экситонов в квантовой яме со встроенной серией тонких туннельно-прозрачных барьеров. Проведен расчет спектров и энергии связи экситонов методом прямого численного решения уравнения Шредингера.

P.S. KLEMMER<sup>1,2</sup>, YU.A. MITYAGIN<sup>1</sup>, M.P. TELENKOV<sup>1,2</sup>, P.F. KARCEV<sup>3</sup>, S.A. SAVINOV<sup>1</sup>,  
V.V. VORONOVA<sup>1,2</sup>, D.A. PASHKEEV<sup>1</sup>, V.P. MARTOVITSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

<sup>2</sup> The National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EXCITON SPECTRA IN A QUANTUM WELL WITH A BUILT-IN SERIES OF THIN TUNNEL-TRANSPARENT BARRIERS

The spectra of excitons in a quantum well with a built-in series of thin tunnel-transparent barriers are considered. The spectra and binding energies of excitons are calculated by the direct numerical solution of the Schrödinger equation.

Задача управления положением нижней подзоны в квантовых ямах и, соответственно, эффективной ширины запрещенной зоны структур имеет большое значение в ряде оптических и оптоэлектронных приложений, в частности, в фотовольтаических приложениях квантовых ям. Одним из путей решения этой задачи является предложенный нами ранее метод введения в квантовую яму серии тонких туннельно-прозрачных барьеров [1,2]. Варьирование ширин и положений вводимых барьеров позволяет, согласно модельным расчетам, перестраивать энергию нижней подзоны в широких пределах [3].

Для описания оптических свойств таких структур необходимо понимание поведения экситонов в таких системах, в частности, энергии связи экситонов. Задача эта осложняется тем, что, наличие тонких барьеров в квантовых ямах делает невозможным использование стандартных приближений для расчета экситонных спектров, и требует прямого численного решения уравнения Шредингера.

Были рассчитаны спектр экситонов и энергии связи в квантовых ямах с введёнными барьерами, представленными на рисунке 1 А. Обнаружена немонотонная зависимость энергии связи экситонов от числа введённых барьеров (Рис. 1 Б). На поведение энергии связи экситонов существенное влияние оказывает также различие диэлектрических проницаемостей материалов ям и барьеров. Наблюдается достаточно неплохое согласие между рассчитанными значениями и экспериментальными величинами энергий переходов экситонов в данной структуре.

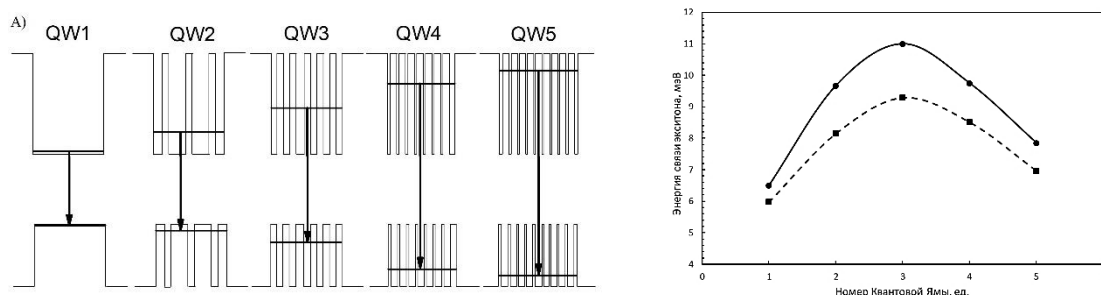


Рис. 1. Потенциальный профиль выращенных МЛЭ методом структур с квантовыми ямами  $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  с различной конфигурацией введенных барьеров (А). Энергии связи экситона (абс. величина) в квантовых ямах с учетом различия диэлектрических проницаемостей материалов ям и барьеров (сплошная кривая), и без учета (пунктирная кривая).

### Список литературы

1. M.P. Telenkov, Yu. A. Mityagin, Bull. Lebedev Phys. Inst. 40 (2013) 346.
2. K. K. Nagaraja, M. P. Telenkov, I. P. Kazakov, S. A. Savinov and Yu A. Mityagin, Bull. Lebedev Phys. Inst. 44 (2017) 72
3. M. P. Telenkov, P. S. Klemmer, Yu. A. Mityagin, Superlattices and Microstructures 140, 106472 (2020).

## МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КВАЗИ-2D ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И УГЛЕРОДА ДЛЯ СВЕРХНИЗКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

Методом импульсного лазерного осаждения созданы покрытия, содержащие наноразмерные слои  $WS_2$ , графеноподобного углерода и каталитического металла-никеля. Исследованы структурные изменения в слоях, происходящие как при формировании покрытия, так и в процессе трибовоздействия. Выявлена роль подслоя каталитического металла. Для покрытий, содержащих слой каталитического металла с островковой морфологией получено значение коэффициента трения характерное для суперсмазки (0,013).

E.V. KLIMOVA, D.V. FOMINSKI, R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKI  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MULTILAYER COATINGS BASED ON QUASI-2D TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES AND CARBON FOR ULTRA-LOW COEFFICIENT OF FRICTION

Coatings containing nanoscale layers of  $WS_2$ , graphene-like carbon and catalytic metal-nickel were created by pulsed laser deposition. Structural changes in the layers occurring both during the formation of the coating and in the process of tribo-action are investigated. The role of the catalytic metal sublayer is revealed. For coatings containing a layer of catalytic metal with insular morphology, the value of the friction coefficient characteristic of a super-lubricant (0.013) was obtained.

Одним из перспективных подходов к улучшению антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий является создание многослойных структур, в которых чередуются слои из разных дихалькогенидов переходных металлов, обладающих формулой  $MX_2$  (где М-Мо, W, X-S, Se), либо слои  $MX_2$  чередуются со слоями других материалов, таких как углерод с графитоподобной или алмазоподобной структурой. Повышенный интерес связан с проявлениями в этих структурах эффекта суперсмазки, при котором коэффициент трения не превышает 0,01. Условием для этого является проявление несоответствия на уровне атомной упаковки [1]. Это может быть достигнуто при самоорганизации в структуре материала на границе покрытия с контртелом или между слоями покрытия.

В работе были созданы покрытия, содержащие два слоя  $WS_2$ , углеродный слой и слой никеля, являющийся катализатором образования графено-подобной структуры на кремниевых подложках (рис. 1а). Толщина каждого слоя не превышала 10 нм. Для создания покрытий использовался метод импульсного лазерного осаждения. Триботесты проводились в атмосфере, обогащенной азотом при напряжении Герца 660 МПа.

С использованием спектроскопии комбинационного рассеяния установлено, что при осаждении верхнего слоя  $WS_2$  в атмосфере  $H_2S$  происходит внедрение атомов Н и S в углеродный слой, вызывая его аморфизацию. Этот эффект проявляется сильнее в присутствии никеля. Аморфизация углерода способствует уменьшению коэффициента трения. Изначально гладкий слой никеля в процессе осаждения верхних слоев образует сетку островков субмикронного размера. Эти островки задерживают верхние слои g-C(H, S) и  $WS_2$ , препятствуя их быстрому удалению из зоны трибоконтакта. При трении нанопластины  $WS_2$  перемещаются относительно слоя аморфного углерода, легированного водородом и серой. В результате такие покрытия проявляют наиболее низкий коэффициент трения (0,013), близкий к значениям, характерным для суперсмазки (рис. 1б).

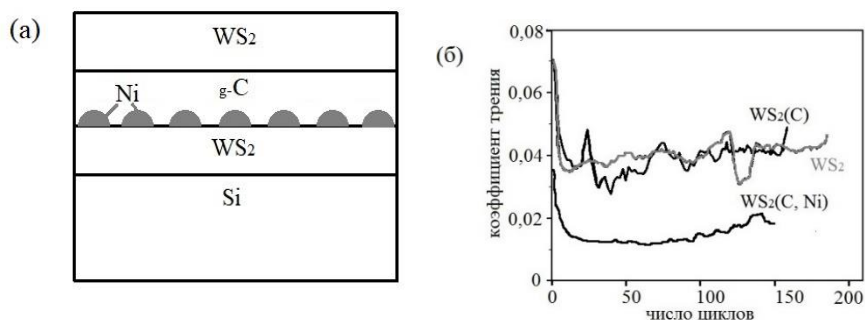


Рис. 1. Схема многослойного покрытия  $WS_2/g-C/Ni/WS_2$  (а) и результаты трибоиспытаний покрытий  $WS_2$ ,  $WS_2/g-C/WS_2$  ( $WS_2(C)$ ) и  $WS_2/g-C/Ni/WS_2$  ( $WS_2(C, Ni)$ ) (б).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №22-29-00197).

### Список литературы

1. Qu C., Shi S., Ma M., Zheng Q. // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 246101.

Т.Н. КОБЕРНИК, А.И. КАРЦЕВ

Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН - обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И АЦЕТОНА 2D-СЛОЕМ $Co_2Te_3$ С ПРИМЕНЕНИЕМ DFT

В рамках метода теории функционала плотности в пакете QUANTUM ESPRESSO проведено моделирование свойств чистого 2D-слоя  $Co_2Te_3$  и процесса адсорбции молекул  $CO_2$  и  $C_3H_6O$  указанной поверхностью. Получены значения энергии Гиббса для различных позиций адсорбции. Найдены и проанализированы наиболее энергетически выгодные позиции.

T.N. KOBERNIK, I.A. KARTSEV

Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS - a separate subdivision of the KhPIC FEB RAS  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## STUDY OF THE ADSORPTION OF CARBON DIOXIDE AND ACETONE BY A 2D-LAYER OF $Co_2Te_3$ USING DFT

Within the density functional theory method in the QUANTUM ESPRESSO package, we simulated the properties of a clean 2D-layer of  $Co_2Te_3$  and the process of adsorption of molecules  $CO_2$  and  $C_3H_6O$  by this surface. The values of the Gibbs energy for various positions of adsorption are obtained. The most energetic advantageous positions are found and analyzed.

В последнее время большой интерес представляет исследование свойств атомарно тонких 2D-материалов. Благодаря превосходным поверхностно-активным характеристикам они нашли применение в области электрохимических сенсоров. В данной работе рассматривался сенсор углекислого газа и ацетона, в основу которого лег 2D-слой теллурида кобальта (III) в качестве сенсора углекислого газа и ацетона [1]. Предлагаемый электрохимический датчик на основе  $Co_2Te_3$  обладает высокими воспроизводимостью, стабильностью и селективностью. Для более детального анализа соответствующих характеристик было необходимо исследовать поведение молекул  $CO_2$  и  $C_3H_6O$  вблизи образца  $Co_2Te_3$  и выяснить природу химических связей между ними.

Был произведен расчет полных энергий исследуемых структур в рамках формализма теории функционала плотности с использованием функционала GGA PBE, PAW метода и базиса плоских волн с максимальной кинетической энергией 400 эВ [2] в программном пакете QUANTUM ESPRESSO. Равновесная структура 2D- $Co_2Te_3$  ( $a=21.3$  а.е.д.,  $c=1.9$  а.е.д.) и энергии адсорбции газов получены с применением метода суперячейки [3], где процесс минимизации сил осуществлялся до остаточной величины не менее чем  $2 \cdot 10^{-6}$  эВ·нм<sup>-1</sup> на каждом атоме. Было рассмотрено несколько наиболее вероятных позиций адсорбируемой молекулы [4, 5]: 2 вершинные позиции, над теллуридом ( $T_{Te}$ ) и над кобальтом ( $T_{Co}$ ), одна мостиковая (Br), соответствующая внедрению атома в область химической связи между теллуридом и кобальтом, а также одна ямочная (Holl). Суммарно для  $CO_2$  были рассчитаны 6 позиций, для  $C_3H_6O$  – 8. Энергия Гиббса вычислялась в соответствие со следующей формулой:

$$E_G = E_{Co_2Te_3}^{CO_2/ace} - (E_{CO_2/ace} + E_{Co_2Te_3})$$

где  $E_{Co_2Te_3}^{CO_2/ace}$  – полные энергии образца с углекислым газом/ацетоном,  $E_{Co_2Te_3}$  – энергия чистого образца,  $E_{CO_2/ace}$  – энергии свободных молекул.

В результате расчетов были определены наиболее выгодные кристаллографические позиции адсорбции. Для углекислого газа это ямочная позиция с углеродом ( $E_G \approx -2,66$  эВ), для ацетона – ямочная позиция с кислородом ( $E_G \approx -2,08$  эВ). Средняя энергия Гиббса по всем позициям для углекислого газа, оказалась больше, чем у ацетона, что позволяет сделать вывод о том, что адсорбция  $CO_2$  происходит более интенсивно, что, в свою очередь, качественно согласуется с экспериментальными данными

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-23-01189).

### Список литературы

1. Negedu S.D., Alexey Kartsev A., et al. // The Journal of Physical Chemistry C 2022 126 (30), 12545-12553. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c02102>
2. Шеляпина М.Г. Структура, стабильность и динамика многокомпонентных гидридов металлов по данным теории функционала плотности и ядерного магнитного резонанса: дис.д.ф.-м.н: 01.04.07. – Санкт-Петербург, 2018. – 278 с.
3. Xia Y., Pan A., et al. // Sensors and Actuators: B. Chemical 2022 357, 131359. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131359>
4. Петрушенко И.К. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022; 12(3): 363-372. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-363-372>
5. Saleev V.A., Shipilova A.V. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. - 2018. - №10. - С. 311 - 313.

А.В. КОРОЛЕВА

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА, С ПОМОЩЬЮ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Проведено исследование композитов  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$ , полученных методом электроспиннинга, с концентрацией атомов цинка от 0,33 моль% методом ИК-спектроскопии. Сделаны выводы относительно структурных особенностей исследуемых композитов.

A.V. KOROLEVA

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## AN INVESTIGATION OF $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$ COMPOSITES OBTAINED BY ELECTROSPINNING USING IR SPECTROSCOPY

An investigation of  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$  composites obtained by electrospinning with a concentration of zinc atoms from 0 to 33 mol% was carried out by IR spectroscopy. Conclusions are drawn regarding the structural features of the studied composites.

В нашей работе проведено исследование композитов  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$  с концентрацией атомов цинка от 0 до 33 моль% с помощью ИК-спектроскопии. Синтез образцов осуществлялся методом электроспиннинга. Полученные ИК-спектры показаны на рис.1. Для оксида кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  в спектре в диапазоне  $370\text{--}770\text{ см}^{-1}$  наблюдаются три полосы поглощения. Две из них (с максимумами при  $565$  и  $662\text{ см}^{-1}$ ) интенсивные. Для третьей полосы (с максимумом при  $390\text{ см}^{-1}$ ) интенсивность мала. Полоса при  $565\text{ см}^{-1}$  соответствует колебаниям связи  $\text{Co}^{3+}\text{-O}$ , полоса при  $662\text{ см}^{-1}$  отнесена к колебаниям связи  $\text{Co}^{2+}\text{-O}$ . Для композитов данная полоса может соответствовать колебанию связи  $\text{Zn}^{2+}\text{-O}$ , в случае если происходит встраивание ионов цинка в решетку шпинели с замещением ионов кобальта [1, 2]. Полоса при  $390\text{ см}^{-1}$  отнесена к колебаниям связей  $\text{Co}^{3+}\text{-O}$  и  $\text{Co}^{2+}\text{-O}$  (или  $\text{Zn}^{2+}\text{-O}$ ) [2]. Данные полосы являются характерными для соединений со структурой шпинели [1, 2]. Указанные три полосы поглощения наблюдаются и в спектре оксида кобальта, и в спектрах композитов. Этот факт свидетельствует о том, что в композитах  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$  присутствует структура шпинели, так же, как и в оксиде кобальта. Начиная с концентрации 20 моль%, в спектрах композитов также наблюдалась полоса с максимумом при  $457\text{ см}^{-1}$  (для концентрации 20 моль%). Данная полоса была отнесена к валентным колебаниям связи  $\text{Zn-O}$  кристаллической решетки  $\text{ZnO}$  [3]. Наличие этой полосы может свидетельствовать о присутствии в образцах кристаллического  $\text{ZnO}$ .

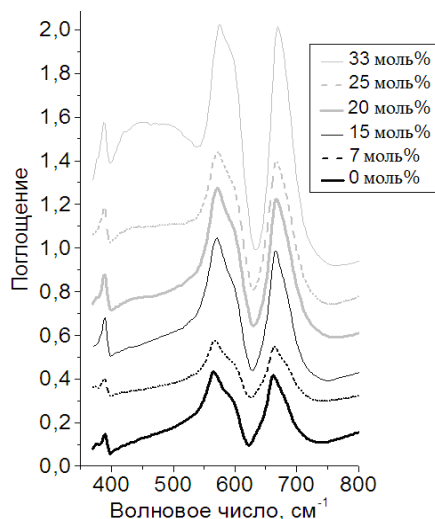


Рис. 1. ИК-спектры композитов  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Zn}$  с концентрацией атомов цинка от 0 до 33 моль%

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 21-32-70038 мол\_а\_мос.

### Список литературы

1. Makhlof S.A., Bakr Z.H., Aly K.I. and others // Superlat. and Microstruc. 2013. Vol. 64. P. 107–117.
2. Preudhomme J., Tarte P. // Spectrochim. Acta Part A: Molec. Spectr. 1971. Vol. 27A. P. 1817–1835.
3. Nandi A., Majumder R., Nag P. and others // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2017. Vol. 28. P. 10885-10892.

## ВЛИЯНИЕ КОЛОНЧАТЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПИННИНГА НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК И НАМАГНИЧЕННОСТЬ СЛОИСТОГО ВТСП СО СЛАБОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Методом Монте-Карло в рамках трехмерной модели слоистого ВТСП исследовано влияние колончатых радиационных дефектов на кривую намагниченности и критический ток ВТСП в магнитном поле. Рассмотрены случаи периодического и квазислучайного расположения центров пиннинга. Показано, что для дефектов с радиусом, близким к радиусу ко́ра вихря, зависимость критического тока от магнитного поля является монотонно спадающей.

A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ, I.A. RUDNEV, V.A. KASHURNIKOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EFFECT OF COLUMNAR RADIATION PINNING CENTERS ON THE CRITICAL CURRENT AND MAGNETIZATION OF LAYERED HTS WITH WEAK ANISOTROPY

The effect of columnar radiation defects on the magnetization curve and the critical current of the HTS in a magnetic field has been studied by the Monte Carlo method within the framework of a three-dimensional model of layered HTS. The cases of periodic and quasi-random pinning centers are considered. It is shown that for defects with a radius close to the radius of the vortex core, the dependence of the critical current on the magnetic field is monotonically decreasing.

Радиационные дефекты в качестве центров пиннинга в ВТСП продолжают активно изучаться и в настоящее время [1-4]. Радиационные дефекты для повышения токонесущих способностей используются и в современных ВТСП на основе FeSe [1]. В нашей работе исследовано влияние различных конфигураций колончатых радиационных дефектов на намагниченность и критический ток. Исследование выполнено методом Монте-Карло в рамках трехмерной модели слоистого ВТСП.

Наши предшествующие расчеты для центров пиннинга в виде магнитных точек показали явную немонотонность зависимости критического тока от магнитного поля. Поэтому целью работы было определить возможность данного эффекта для немагнитных радиационных дефектов. На рис. 1 показаны рассчитанные кривые намагниченности и зависимости критического тока от магнитного поля для периодической и квазислучайной решетки колончатых дефектов.  $N_d$  – количество собственных центров пиннинга,  $N_h$  – количество радиационных дефектов на образец. Видно, что в первом случае при низких полях кривая намагниченности идет существенно выше. Зависимость критического тока от магнитного поля является монотонно спадающей во всех случаях.

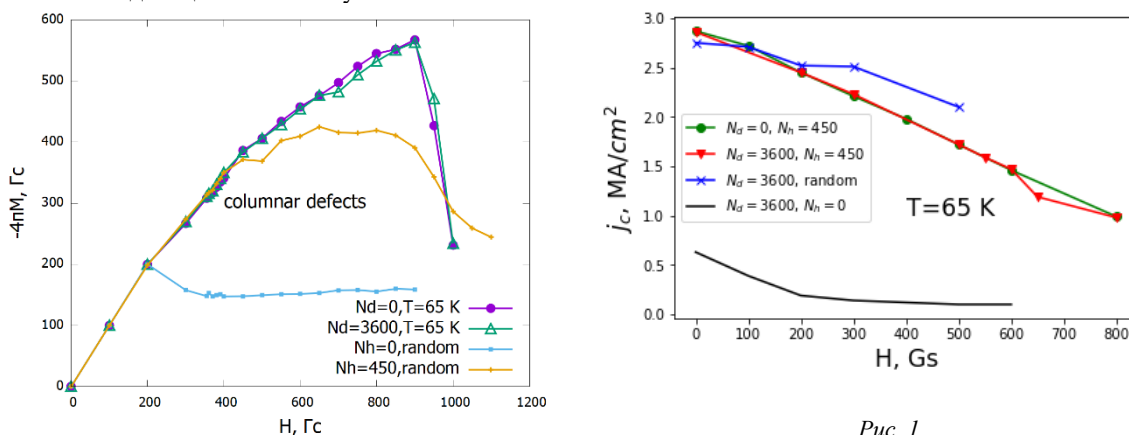


Рис. 1.

Таким образом, из наших расчетов следует, что с помощью радиационных дефектов не удастся добиться немонотонной зависимости критического тока от магнитного поля. В случае регулярного расположения колончатых дефектов (периодическая решетка) величина критического тока оказывается выше, чем в случае квазислучайного. Однако эффекта подстройки вихревой решетки добиться не удалось. Наклон колончатых дефектов к оси анизотропии также снижает плотность критического тока.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Список литературы

1. Ozaki T. et al. // Quantum Beam Science. 2021. М. 5. №. 2. 3. 18.
2. Rudnev I. et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2022. V. 32. №. 4. P. 1-5.
3. Zhang Y. et al. // Scientific Reports. 2020. V. 10. №. 1. P. 14848.
4. Niraula P. M. et al. // MRS Advances. 2019. V. 4. №. 2. P. 119-124.

А.Ю. МАЛЯВИНА, И.В. МАРТИРОСЯН, И.К. МИХАЙЛОВА  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТАХ ПРИ КРИТИЧЕСКИХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ

В данной работе представлены результаты исследований неравновесных состояний в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках при импульсной токовой нагрузке. Для исследования переходных процессов в сверхпроводнике при критических токовых нагрузках разработан экспериментальный стенд, позволяющий выполнять визуализацию тепловых процессов в композите при критических токовых нагрузках с высоким временным разрешением. Исследована динамика тепловых процессов в ВТСП ленте при токовых нагрузках, показаны особенности тепловых процессов, приводящих к смене режимов кипения жидкого хладагента. Детально изучен процесс разрушения ВТСП образца под действием сверхкритической токовой нагрузки.

A.Y. MALYAVINA, I.V. MARTIROSIAN, I.K. MIKHAILOVA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## VISUALIZATION OF THERMAL PROCESSES IN SUPERCONDUCTING COMPOSITES UNDER CRITICAL CURRENT LOADS

This paper presents the results of studies of non-equilibrium states in ribbon high-temperature superconductors under pulse current loading. To study transient processes in a superconductor at critical current loads an experimental stand was developed, which allows to perform visualization of thermal processes in the composite at critical current loads with high temporal resolution. The dynamics of thermal processes in HTS tape under current loads was investigated, the peculiarities of thermal processes leading to the change of liquid refrigerant boiling modes were shown. The process of HTS sample fracture under supercritical current load was studied in detail.

Исследование неравновесных состояний в сверхпроводниках является одной из актуальных задач физики твердого тела. Перспективы применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обусловлены их высокими критическими характеристиками и возможностью применения в качестве хладагента жидкого азота. В настоящее время на смену традиционным объемным ВТСП материалам приходят ленточные ВТСП композиты, обладающие более высокими токнесущими характеристиками, хорошими тепловыми и механическими свойствами. Экспериментальные исследования неравновесных состояний в ВТСП, как правило, связаны с измерением их магнитных и транспортных свойств в различных условиях охлаждения и нагрузки. Наиболее распространенными методами исследования магнитных свойств композитов являются такие методы, как сканирующая холловская магнитометрия [1], низкотемпературная магнитооптика [2], измерение петель намагничивания [3]. Исследование транспортных свойств ВТСП образцов выполняется, как правило, при помощи измерения их вольтамперных характеристик [4]. Такой подход позволяет получить усредненную информацию об общем состоянии образца, но не дает детальную картину происходящего. Исследование локальных тепловых процессов, возникающих в сверхпроводящих лентах при критических токовых нагрузках, может быть выполнено с использованием высокоскоростной съемки.

В данной работе представлена экспериментальная методика, которая позволяет визуализировать локальные тепловые процессы, происходящие в сверхпроводящих композитах при импульсных токовых нагрузках, а также тепловые процессы, связанные с изменениями параметров кипения жидкого хладагента. Экспериментальный стенд включает импульсный источник постоянного тока, нановольтметр, криостат с образцом, расчетно-измерительный комплекс, высокоскоростную камеру, защитное стекло и осветительный прожектор. В качестве объекта исследования была выбрана ВТСП лента производства фирмы SuperOx с размерами 100x4 мм. Сверхпроводящая лента представляет собой слоистую структуру. Критический ток ВТСП ленты составляет 140А в собственном поле при температуре кипения жидкого азота. Охлаждение ВТСП ленты производится с использованием в качестве хладагента жидкого азота. В качестве предварительной характеристики образца проведена бесконтактная диагностика локальных дефектов критического тока ленты с использованием методов сканирующей холловской магнитометрии. Представлены результаты исследований тепловых процессов, происходящих в жидком азоте и в ВТСП ленте при приложении к образцу транспортного подкритического тока, показаны особенности тепловых процессов, приводящих к смене режимов кипения азота, детально изучен процесс разрушения сверхпроводящего образца под действием сверхкритической токовой нагрузки и связанных с ним процессов, наблюдающихся в криогенной жидкости.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### *Список литературы*

1. Fujisawa T., Yamaguchi A., Motoyama G. and others // **Jpn. J. Appl. Phys.** 2015. Vol. 54, P.048001.
2. Baziljevich M., Johansen T.H., Bratsberg H. and others // **Physica C** 1996. Vol. 266, P.127-132.
3. Sanchez A. and Navau C. // **Supercond. Sci. Technol.** 2001. Vol. 14, P.444.
4. Zhukov A.A., Ströbel J.P., Kummeth P. and others // **Physica C** 1993. Vol. 33, P.142-146.



## ВИХРЕВАЯ РЕШЕТКА СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Методом численного расчёта получены петли перемагничивания и средние конфигурации вихревой статистики для высокотемпературного сверхпроводника в неоднородном поле температуры. Произведены сравнения полученных данных для систем с постоянной температурой.

М.М. MARTYANOV, A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ, V.A. KASHURNIKOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## VORTEX LATTICE LAYERED HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR IN INHOMOGENEOUS TEMPERATURE FIELD

Magnetization reversal loops and average configurations of vortex statistics for a high-temperature superconductor in a nonuniform temperature field are obtained by numerical calculation. The obtained data are compared for systems with constant temperature.

Открытая недавно возможность направленного перемещения вихрей с помощью градиента температуры [1,2] является востребованной, например, в устройствах магнитной памяти. При этом в реальности на движение вихрей может влиять величина и форма теплового пятна, особенности центров пиннинга, внешнее магнитное поле и транспортный ток. В общем случае задача не имеет аналитического решения, что делает привлекательным использование численных методов. В нашей работе методом Монте-Карло для двумерной модели слоистого ВТСП [3-5] проанализирована кривая намагниченности в присутствии линейного градиента температуры, направленного от левой к правой границе образца.

Расчеты выполнены для параметров, соответствующих сверхпроводнику  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ . Рассчитанные кривые показаны на рис. 1. Видно, что в неоднородном температурном поле магнитные свойства сверхпроводника близки к свойствам сверхпроводника в нижней границе температурного диапазона, но находятся между нижней и верхней границей температурного диапазона в моделируемом сверхпроводнике. В частности, в присутствии пиннинга градиент температуры увеличивает остаточную намагниченность по сравнению с однородной максимальной температурой.

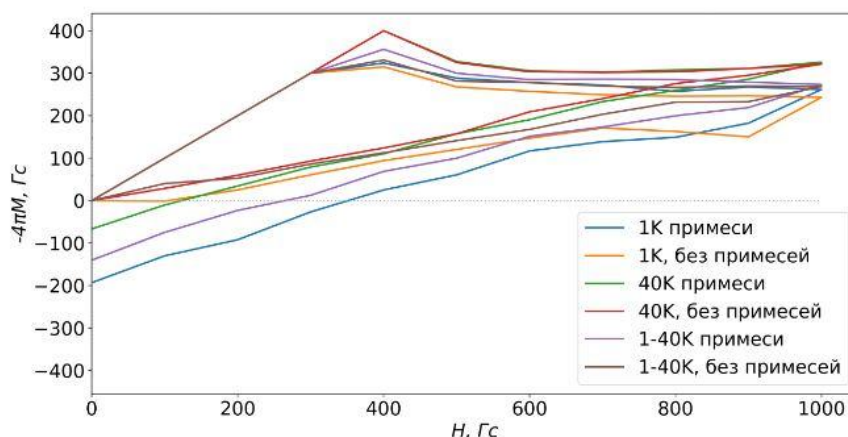


Рис. 1. Петли перемагничивания в сверхпроводнике в бездефектном случае и с дефектами. Исследование выполнено при поддержке программы НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

### Список литературы

1. В.Л. Вадимов и др. // В: Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2018. V. 108. № 4. P. 278—287.
2. Gianni Blatter and others // В: Reviews of modern physics. 1994. V. 66. № 4. P. 1125.
3. В.А. Кашурников и др. // В: Физика твердого тела. 2016. V. 58 № 8. P. 1457—1464.
4. А.Н. Максимова и др. // В: Физика твердого тела. 2021. V. 63. № 11, P. 1830—1836.
5. В.А. Кашурников и др. // ЖЭТФ. 2000. V. 117. № 1. P. 196-206.



Е.С. МАТЮХАНОВ<sup>1</sup>, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН<sup>1</sup>, М.С. НОВИКОВ<sup>1</sup>, А.В. ШЕМЧУК<sup>1</sup>, Е.Н. ИСКОРНЕВ<sup>1</sup>, А.В. МЕРКУРЬЕВ<sup>1</sup>, В.М. ДРОБИН<sup>1</sup>, Г.Л. ДОРОФЕЕВ<sup>1</sup>, Д.О. ПОНКИН<sup>1</sup>, В.А. КАШИРИН<sup>1</sup>, А.В. РЯБОВ<sup>1</sup>, Я.Ю. ВЕКЛИЧЕВ<sup>1</sup>, И.А. РУДНЕВ<sup>2</sup>, С.В. ПОКРОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА ВТСП КАБЕЛЕЙ НУКЛОТРОННОГО ТИПА В ОИЯИ

Разрабатывается технология изготовления кабелей нуклотронного типа из ВТСП 2-го поколения. Создана экспериментальная кабельная установка, методика для измерения криттока ВТСП ленты при перемотке, спроектирована и строится кабельная машина для серийных изделий. Разработаны ВТСП кабели – прототип для модернизации магнитной системы Нуклотрона NICA, кабель для индуктивного накопителя энергии, и прототип гибкого высокопоточного кабеля большого диаметра для крупных магнитных систем и токоподводов.

E.S. MATYUKHANOV<sup>1</sup>, H.G. KHODZHIBAGIYAN<sup>1</sup>, M.S. NOVIKOV<sup>1</sup>, A.V. SHEMCHUK<sup>1</sup>, E.N. ISKORNEV<sup>1</sup>, A.V. MERKURYEV<sup>1</sup>, V.N. DROBIN<sup>1</sup>, G.L. DOROFEEV<sup>1</sup>, D.O. PONKIN<sup>1</sup>, V.A. KASHIRIN<sup>1</sup>, A.V. RYABOV<sup>1</sup>, YA.YU. VEKLCHEV<sup>1</sup>, I.A. RUDNEV<sup>2</sup>, S.V. POKROVSKIY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2</sup>National research nuclear university “MEPHI”, Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF THE NUCLOTRON TYPE HTS CABLES AT JINR

The technology of 2G HTS cables of the Nuclotron type manufacturing is being developed. An experimental cabling device and a technique for reel-to-reel measuring of critical currents of the HTS tape have been created; a cabling machine for serial products has been designed and is being built. HTS cables have been developed – a prototype for upgrading the magnetic system of Nuclotron NICA, a cable for magnetic energy storage, and a prototype of a large-diameter high-current flexible cable for large-scale magnets and flexible bus-bars.

Обмотки новых магнитов синхротрона Нуклотрон могут быть изготовлены из ВТСП кабеля, с охлаждением до 50-65 К. В 24 году должен быть введен в эксплуатацию SMES (индуктивный накопитель энергии) в системе питания Бустера и Нуклотрона, его соленоид будет изготовлен из 1460 м ВТСП кабеля. Создана экспериментальная кабельная установка, управляемая частотными регуляторами, которая обкручивает протягиваемую трубку (формер и канал охлаждения) до 10 ВТСП лентами в 1 или 2 слоя [1]. На рисунке 1 изображен ВТСП кабель: 1 – мельхиоровая трубка, 2 – ВТСП ленты, 3 и 4 (опции) изоляция каптоном и препрегом. Кабель подобен НТ кабелю нуклотронного типа, разрабатываемому и изготавливаемому в ЛФВЭ ОИЯИ около 35 лет, и ВТСП кабелю CORCC [2]. Отлажена система натяжения ВТСП лент и трубки-формера, поддерживающая независимое от скорости натяжение с помощью электроники, также разработанной в ОИЯИ. Тестируется система измерения скорости вращения бобин и обкруточного узла кабельной машины, а также измерения длины намотанного участка кабеля. Разработана методика 3D FEM расчета деформации ВТСП слоя при изготовлении и последующих изгибах кабеля. На ее основе выбираются натяжения, углы и шаги, позволяющие сгибать кабели без деградации, в то же время обеспечивающие нужную плотность массива ВТСП лент для охлаждения и механической устойчивости. Ведется сборка кабельной машины для серийных ВТСП кабелей, изготавливающей кабель за 1 проход, изолирующей, и наматывающей на каркас соленоида SMES (рис. 2).

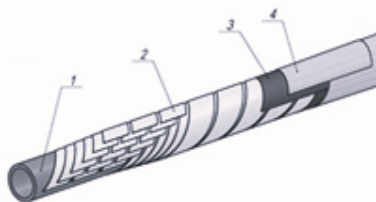


Рис. 1. Конструкция ВТСП кабеля

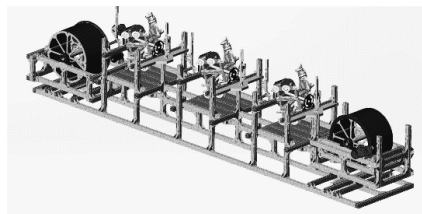


Рис. 2. 3D модель «серийной» кабельной машины

Для контроля ВТСП лент разработана установка для измерения критического тока при перемотке в жидком азоте. Разработаны конструкции кабеля из 18 лент на трубке 5 мм в изоляции, с возможностью изгиба на радиус 40 мм, и кабелей SMES (до 40 лент на трубке 8 мм, изоляция - каптон). Намотан кусок кабеля на трубке 12.7 мм с 7 лентами в каждом слое, сгибаемый на радиус менее 200 мм, он исследуется.

*Список литературы*

1. H Khodzhbagiyan, V Drobin, G Dorofeev, V Karpinskiy, A Shurygin, M Novikov, D Kashaev, M Zaslavskiy, G Kachlishvili, Journal of Physics: Conference Series 1590 (2020) 012057 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1590/1/012057
2. Van der Laan D C et al, 2019 Supercond. Sci. Technol. 32 015002

У.К. МАХМАНОВ<sup>1,2</sup>, Ш.А. ЭСАНОВ<sup>1</sup>, К.Н. МУСУРМОНОВ<sup>1</sup>, А.Х. ШУКУРОВ<sup>1</sup>, Б.А. АСЛОНОВ<sup>1</sup>, Д.Т. СИДИГАЛИЕВ<sup>1</sup>, Т.А. ЧУЛИЕВ<sup>3</sup>, Й.Ш. ДУСОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>3</sup>Гулистанский государственный университет, Гулистан, Узбекистан

<sup>4</sup>Термезский государственный университет, Термиз, Узбекистан

## ПОЛУЧЕНИЕ ФИЛАМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕНОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ

Исследовано образование одномерных наноструктур (нановискеров) при испарении капли раствора фуллеренов на гладкую поверхность стеклянной подложки. Проанализированы механизмы роста фуллереновых наноструктур, определены их морфологические и размерные характеристики.

U.K. MAKHMANOV<sup>1,2</sup>, S.A. ESANOV<sup>1</sup>, K.N. MUSURMONOV<sup>1</sup>, A. SHUKUROV<sup>1</sup>, B.A. ASLONOV<sup>1</sup>,

D.T. SIDIGALIEV<sup>1</sup>, T.A. CHULIEV<sup>3</sup>, Y.SH. DUSOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>3</sup>Gulistan State University, Gulistan, Uzbekistan

<sup>4</sup>Termiz State University, Termiz, Uzbekistan

## OBTAINING FILEMENTS BASED ON FULLERENES ON THE SUBSTRATE SURFACE

The formation of one-dimensional nanostructures (nanowhiskers) during the evaporation of a drop of fullerenes solution on a smooth surface of a glass substrate was studied. The growth mechanisms of fullerene nanostructures were analyzed, as well as their morphological and size characteristics were determined.

В настоящее время для дальнейшего развития современных технологий необходимо разработать недорогие и в то же время эффективные технологии получения полупроводниковых наноструктур [1]. Большой интерес к одномерным фуллереновым наноструктурам обусловлен их практическим применением в качестве быстродействующих оптических устройств, наносенсоров, биочипов и высокопрочных наноструктурированных полупроводниковых чувствительных элементов [2]. В данной работе предложен и реализован капельный метод получения нано- и микроразмерных вискеров из фуллерена, основанный на самоорганизации молекул при термическом испарении растворителей из капель растворов фуллеренов, находящихся на стеклянной подложке. Показано, что геометрическими размерами и морфологией синтезированных вискеров можно управлять как за счет изменения начальной концентрации раствора фуллеренов, так и за счет изменения температуры используемой подложки. Проведен селективный синтез фуллереновых нановискеров. Ниже представлены результаты по получению нановискеров фуллерена C<sub>70</sub>.

В процессе естественного термического испарения органического растворителя из капли раствора с относительно высокой концентрацией C<sub>70</sub> (~5,4·10<sup>-3</sup> моль/л) образуются нитевидные структуры (вискеры) со средней длиной ~40 мкм и шириной ~9 мкм. В тех же условиях при концентрации C<sub>70</sub> ~1,8·10<sup>-3</sup> моль/л на стеклянной подложке были синтезированы фуллереновые нановискеры со средним диаметром ~120÷270 нм (см. Рис.1).

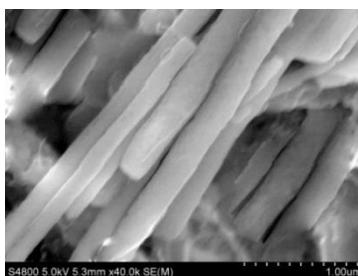


Рис. 1. СЭМ-снимок нановискеров фуллерена C<sub>70</sub>, синтезированных в объеме испаряющейся капли раствора фуллерена на поверхности подложки (T=24±1°C).

При фиксированной концентрации C<sub>70</sub> (~1,8·10<sup>-3</sup> моль/л) в капле рабочего раствора повышение температуры подложки (T=32°C) приводило к заметному увеличению конечных геометрических размеров синтезированных нановискеров C<sub>70</sub>.

Следует отметить, что результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и контроля геометрических размеров наноструктурированных вискеров, имеющих большой потенциал в таких приложениях, как нано- и микроэлектроника, солнечная энергетика, нелинейная оптика и электромеханика

*Список литературы*

1. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhranov S.A., Esanov S.A. // Romanian J. Phys. 2022. V. 67, No. 1-2. P. 601.
2. Park S., Deshmukh M., Kang B., Jeon J., Chen C., and Ha T. // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2020. V.9, P. 071002.

У.К. МАХМАНОВ<sup>1</sup>, Ш.А. ЭСАНОВ<sup>1</sup>, К.Н. МУСУРМООНОВ<sup>1</sup>, А.Х. ШУКУРОВ<sup>1</sup>, З.  
БЕКМУРОДОВ<sup>1</sup>, Д.Т. СИДИГАЛИЕВ<sup>1</sup>, Т.А. ЧУЛИЕВ<sup>2</sup>, С. ЭШБОЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Гулистанский государственный университет, Гулистан, Узбекистан

<sup>3</sup>Термезский государственный университет, Термиз, Узбекистан

## ОСОБЕННОСТИ ФУЛЛЕРЕНА C<sub>60</sub> В БИНАРНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

Представлены результаты экспериментов по формированию нанокластеров фуллерена C<sub>60</sub> в системе гексан/бензол. Установлены эффекты самоорганизации молекул C<sub>60</sub> на оптические свойства раствора, определены размерные и структурные характеристики нанокластеров C<sub>60</sub>.

U.K. MAKHMANOV<sup>1</sup>, S.A. ESANOV<sup>1</sup>, K.N. MUSURMONOV<sup>1</sup>, A. SHUKUROV<sup>1</sup>, Z.  
BEKMURODOV<sup>1</sup>, D.T. SIDIGALIEV<sup>1</sup>, T.A. CHULIEV<sup>2</sup>, S. ESHBOEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Gulistan State University, Gulistan, Uzbekistan

<sup>3</sup>Termiz State University, Termiz, Uzbekistan

## FEATURES OF FULLERENE C<sub>60</sub> IN BINARY SOLVENTS

The results of experiments on the formation of C<sub>60</sub> fullerene nanoclusters in the hexane/benzene system are presented. The effects of self-organization of C<sub>60</sub> molecules on the optical properties of the solution are established, and the dimensional and structural characteristics of C<sub>60</sub> nanoclusters are determined.

Наноразмерная углеродсодержащая молекула фуллерена C<sub>60</sub> привлекает внимание ученых благодаря своим уникальным свойствам, позволяющим использовать их в различных областях науки и техники, включая медицину, современную электронику, материаловедение, нанотехнологии и другие области [1-2]. Растворы фуллерена C<sub>60</sub> в органических растворителях можно рассматривать как коллоидные системы, поскольку известна склонность молекулы фуллерена к образованию кластеров в различных растворителях [3-4]. В этом случае свойства синтезированных наноразмерных кластеров становятся зависимыми от их геометрических размеров и заметно отличаются от аналогичных свойств составляющих их индивидуальных мономеров C<sub>60</sub> [5-7]. В то же время многие вопросы о межмолекулярных взаимодействиях, приводящих к кластеризации молекул фуллерена C<sub>60</sub> в бинарных растворах, остаются дискуссионными.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование оптических свойств (УФ-видимые спектры поглощения и показатель преломления) растворов фуллерена C<sub>60</sub> в бинарных смесях растворителей «гексан+бензол» и размерных характеристик (данные динамического рассеяния света (ДРС) и снимки электронной микроскопии) кластеров C<sub>60</sub> в растворах при комнатной температуре. В экспериментах были использованы кристаллические порошки фуллерена C<sub>60</sub> чистотой >99,8%, а также органические растворители – гексан (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>) и бензол (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) чистотой ~99%. Все используемые реагенты были приобретены от Sigma Aldrich (США).

Методом рефрактометрии экспериментально установлено, что с увеличением концентрации фуллерена C<sub>60</sub> и объемной доли бензола в растворе C<sub>60</sub>/гексан/бензол значения показателя преломления раствора увеличиваются. Такое поведение связано с тем, что увеличение числа связей, образующихся между молекулами «растворенное вещество-растворенное вещество» и «растворенное вещество-растворитель», вызывает больше взаимодействий с фотонами и приводит к увеличению показателя преломления среды.

Увеличение концентрации C<sub>60</sub> в системе C<sub>60</sub>/гексан/бензол приводит к значительным изменениям переноса заряда между C<sub>60</sub> и растворителем, в частности, проявляют как положительный сольватохромный эффект, так и гипохромный эффект в полосе интенсивного оптического поглощения при ~330,2 нм. После замены бензола в бинарном растворе распределение заряда π-электронов фуллерена C<sub>60</sub> в возбужденном электронном состоянии существенно отличается от такового в основном состоянии молекул. При этом происходит реорганизация молекул C<sub>60</sub> в растворе. Этот факт был подтвержден на основании экспериментальных результатов ДРС и электронной микроскопии.

### Список литературы

1. A.R. Kirtane, et al. // Nat. Nanotechnol. 2021. V. 16. P. 369–384.
2. H. Yin, H. Lin, et al. // Org. Electron. 2021. V. 93. P. 106142.
3. N.O. Mchedlov-Petrosyan // Chem. Rev. 2013. V. 113. P. 5149-5193.
4. U.K. Makhmanov, et al. // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 2081-2084.
5. Y. Qu, S. Liang, et al. // Mater. Lett. 2011. V. 65. P. 562–564.
6. A. Cid, O. Moldes, et al. // ACS Omega. 2017. V. 2. P. 2368–2373.
7. U.K. Makhmanov, et al. // Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures. 2022. V. 30. P. 80-84.

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ И РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РЕЛАКСАЦИИ СЛОИСТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

Методом Монте-Карло в рамках двумерной модели слоистого ВТСП в геометрии тонкого диска выполнены расчеты кривых релаксации захваченного магнитного потока и скорости релаксации при различном размере образца и температурах. Изменение размера образца соответствует различному размеру гранул в гранулированном ВТСП.

Получены убывающие зависимости скорости релаксации при увеличении диаметра диска и возрастающие зависимости от роста температуры в пределах критической.

A.A. MIKHAILOV, A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ, V.A. KASHURNIKOV  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

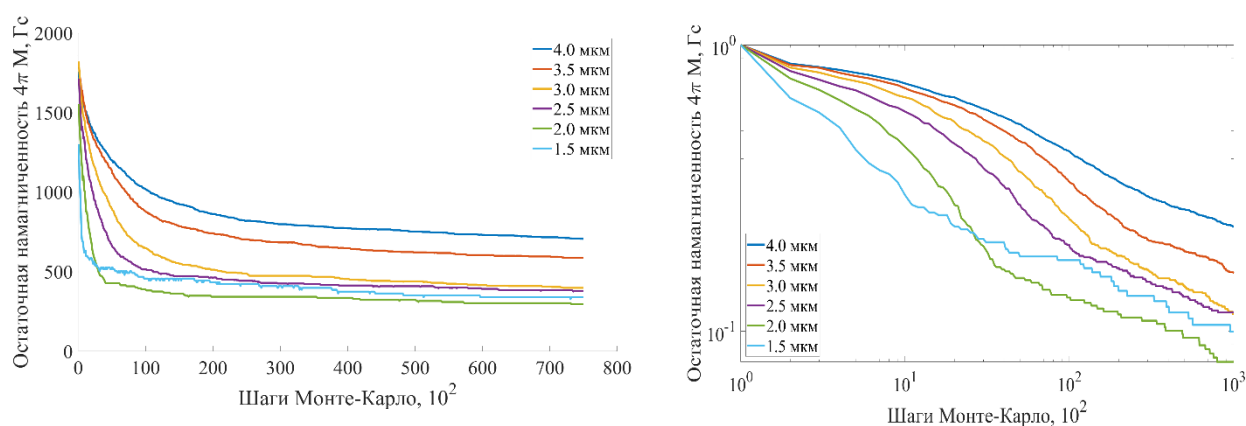
## TEMPERATURE AND DIMENSIONAL DEPENDENCE OF THE RELAXATION RATE OF THE MAGNETIC FLUX IN HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

Calculations of relaxation curves of trapped magnetic flux and relaxation rate for different sample sizes and temperatures were performed within the framework of a two-dimensional model of layered HTSC by using the Monte Carlo method in geometry of a thin disk. The change in the sample size corresponds to the different size of the granules in the polycrystalline HTSC.

Decreasing dependences of relaxation rate on the diameter of the disk and increasing dependences on temperature are obtain.

Фактор релаксации магнитного потока играет роль при работе магнитов. В [1] представлены эксперименты со стопками из сверхпроводящих лент. Интерес представляют в том числе и кривые зависимости от изначально приложенного поля. Подобные устройства находят применение в синхротронных исследованиях [2]. Компактность, гибкость и возможность создавать устойчивые магнитные поля позволяет применять их в спутниках [3].

В ходе нашей работы методом Монте-Карло для вихревой решётки в двумерной модели слоистого ВТСП [4] в геометрии тонкого диска на примере  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-d}$  получены кривые релаксации захваченного магнитного потока и рассчитаны скорости релаксации в диапазоне 1.5 – 5.0 мкм диаметра и при температурах 20 – 40 Кельвин. Выбранные размеры соответствуют средним размерам гранул в гранулированных ВТСП. Температура является постоянной на всей площади образца на протяжении расчёта одной кривой. Плотность точечных дефектов сохранялась постоянной, использовано гауссово распределение глубины центров пиннинга. Скорость релаксации определялась по прямолинейному участку логарифмической зависимости захваченного потока от шагов Монте-Карло, соответствующий депиннингу вихрей. В результате получена убывающая зависимость скорости релаксации магнитного потока от роста диаметра и возрастающая с повышением температуры образца, что соответствует ранее полученным результатам в геометрии тонкой плёнки. Метод расчета может быть использован в предсказательных целях для тех параметров сверхпроводника, при которых эксперименты еще не проводились.



Исследование выполнено при поддержке программы НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

### Список литературы

1. A Baskys // Supercond. Sci. Technol. 2018. 31 065011
2. V. Climente-Alarcon and A. Smara and L. Tomków and B.A. Glowacki and T. Reis // IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2020. V. 30, № 5
3. M.R. Koblishka, A. Koblishka-Veneva, D. Gokhfeld, S. Pavan Kumar Naik, Q. Nouailhetas, K. Berger, and B. Douine // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, V. 32, №. 4
4. I.A. Rudnev, D.S. Odintsov, V.A. Kashurnikov, // Phys. Lett. A 2008 372, P. 3934-3936.

И.К. МИХАЙЛОВА<sup>1</sup>, И.В. МАРТИРОСЯН<sup>1</sup>, С.В. ПОКРОВСКИЙ<sup>1</sup>, И.А. РУДНЕВ<sup>1</sup>, М.С. НОВИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТОВ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Создана модель для сверхпроводящего геликоидального кабеля. Рассмотрено три температурных режима с учетом транспортной нагрузки в режиме для ускорительного комплекса NICA. Проведен анализ механических свойств кабеля при изгибных и осевых нагрузках.

I.K. MIKHAILOVA<sup>1</sup>, I.V. MARTIROSYAN<sup>1</sup>, S.V. POKROVSKIY<sup>1</sup>, I.A. RUDNEV<sup>1</sup>, M.S. NOVIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

## MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SUPERCONDUCTING CABLES BASED ON HTS TAPE COMPOSITES FOR ENERGY STORAGE

Model for superconductive helicoidal cable is developed. Three temperature regimes are regarded with taking into account the transport load in the mode for the NICA accelerator complex. Mechanical properties are assessed with bending and axial loads.

Одной из важнейших проблем XXI века является разработка экологичных и энергоемких источников энергии, которые станут дополнением к классическим источникам. Одной из таких систем является SMES (с англ. «superconducting magnetic energy storage» – сверхпроводящий магнитный накопитель энергии). Для таких систем используются ВТСП композиты, реализованные в различной конфигурации, например, в виде сверхпроводящих кабелей [1]. Их преимуществами перед конвенциональными кабелями являются высокая инженерная плотность тока и способность захватывать сильный магнитный поток. Определение конфигурации кабеля для эксплуатации в конкретной конструкции представляет, как исследовательский интерес, так и прикладной [2]. Необходимо учитывать температурные, магнитные, транспортные и механические параметры при проектировании сверхпроводящих накопительных систем. При проектировании систем с использованием сверхпроводящих кабелей необходимо учитывать конфигурацию криогенной системы.

В работе проводилось численное моделирование влияния температурных, транспортных и магнитных факторов на механические характеристики сверхпроводящего геликоидального кабеля для использования в ускорительном комплексе NICA. На основе модели проведен сравнительный анализ с другими сверхпроводящими кабелями. Для расчета системы был выбран программный пакет COMSOL Multiphysics, использующий для решения задач физического моделирования метод конечных элементов. Модель основана на H-формализме [3,4], что означает использование в качестве зависимой переменной компонент напряженности магнитного поля. Механическое исследование проводилось с целью изучить влияние осевых и изгибных нагрузок, а также представляло интерес определить изменение механики лент на формере под действием токовой нагрузки. Проведен сравнительный анализ механических характеристик с другими типами кабелей [5,6]. Определение температурного режима для стабильной работы геликоидального ВТСП кабеля было проведено на прошлых этапах работы.

При рассмотрении кабеля в отсутствии изгибных нагрузок в условиях протекания тока и нагрева ВТСП лент, ленты плотнее прижимаются к формеру и обеспечивают улучшение теплопередачи и, соответственно, охлаждение ВТСП, так как канал охлаждения проходит через формер. Учет натяжения катушки в режиме токовой нагрузки был выполнен аддитивно путем прибавления тех напряжений, которые возникают за счет протекания транспортного тока. При анализе изгибных нагрузок был определен оптимальный диаметр, не снижающий радикально токонесущих характеристик ВТСП лент. Полученные механические характеристики являются рекомендациями для применения и эксплуатации геликоидальных кабелей для накопительных магнитных систем.

### Список литературы

1. Malozemoff A. P. et al. HTS Wire: status and prospects //Physica C: Superconductivity. – 2003. – Т. 386. – С. 424-430.
2. Van der Laan D. C., Weiss J. D., McRae D. M. Status of CORC® cables and wires for use in high-field magnets and power systems a decade after their introduction //Superconductor Science and Technology. – 2019. – Т. 32. – №. 3. – С. 033001.
3. Shen B., Grilli F., Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 100403-100414.
4. Hu R. et al. Numerical study on mechanical properties of conductors on round core cables //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Т. 31. – №. 5. – С. 1-5.
5. Otten S. et al. Bending properties of different REBCO coated conductor tapes and Roebel cables at T= 77 K //Superconductor Science and Technology. – 2016. – Т. 29. – №. 12. – С. 125003.
6. Barth C. et al. Electro-mechanical analysis of Roebel cables with different geometries //Superconductor Science and Technology. – 2011. – Т. 25. – №. 2. – С. 025007. Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Т. 31. – №. 5. – С. 1-5.

А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ, Р.Г. БАТУЛИН  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВ $MgB_2$ И $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Выполнены расчеты Монте-Карло кривых перемагничивания сверхпроводников  $MgB_2$  и  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , содержащих одинаковое распределение дефектов. Продемонстрировано существенное различие в полях необратимости и остаточной намагниченности, а также ширине и форме петель. Проанализировано влияние характерных длин сверхпроводников на межвихревое отталкивание в них и результирующее взаимодействие вихревой системы с центрами пиннинга.

A.N. MOROZ, I.A. RUDNEV, V.A. KASHURNIKOV, R.G. BATULIN  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

## FEATURES OF THE VORTEX SYSTEM OF $MgB_2$ AND $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ SUPERCONDUCTORS WITH POINT DEFECTS

Monte Carlo calculations of magnetization reversal curves for  $MgB_2$  and  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconductors containing the same distribution of defects have been performed. A significant difference has been demonstrated in the irreversibility fields and residual magnetization, as well as in the width and shape of the loops. The influence of the characteristic lengths of superconductors on the intervortex repulsion in them and the resulting interaction of the vortex system with pinning centers have been analyzed.

Повышенный интерес к дибориду магния ( $MgB_2$ ) вызван его доступностью, низкой стоимостью производства, слабой анизотропией и хорошей связностью зерен – по сравнению с купратными сверхпроводниками, на основе которых изготавливаются современные композитные ленты. Оба типа материалов перспективны для технологий создания сильных магнитных полей, и наиболее выгодно будет применять сверхпроводник, имеющий наилучшую критическую плотность тока, а значит – наилучшие свойства пиннинга. Поскольку транспортные и магнитные характеристики сверхпроводников во многом определяются динамикой вихревой системы, а она в свою очередь зависит от характерных длин материала (глубины проникновения магнитного поля и длины когерентности), возникает необходимость в сравнении вихревой динамики обоих типов сверхпроводников и исследовании эффективности пиннинга в них.

В настоящей работе было проведено численное моделирование петель перемагничивания образцов  $MgB_2$ , содержащих разное количество случайных точечных дефектов, при двух температурах: 4.2 К и 15 К. Аналогичные кривые намагниченности были рассчитаны для сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO), содержащего идентичные распределения дефектов, – для сравнения эффективности пиннинга вихрей в двух материалах и выявления отличий, связанных именно с типом сверхпроводника.

Диборид магния продемонстрировал существенно более широкие петли перемагничивания, более высокую остаточную намагниченность и поле необратимости, чем YBCO, при обеих рассмотренных температурах (рис. 1). Анализ вихревых конфигураций обоих материалов показал, что данные отличия коррелируют с разницей в характерных длинах материалов. Было показано, что в дибориде магния вихревая решетка является более жесткой и лучше удерживается в междефектных промежутках, чем в иттриевом купрате, в то время как в последнем вихри способны удерживаться на близко расположенных дефектах лучше, чем в  $MgB_2$ . Данные отличия были объяснены более сильным межвихревым отталкиванием в дибориде магния на расстояниях меньше или порядка 120 нм, что соответствовало средним расстояниям между дефектами в образцах.

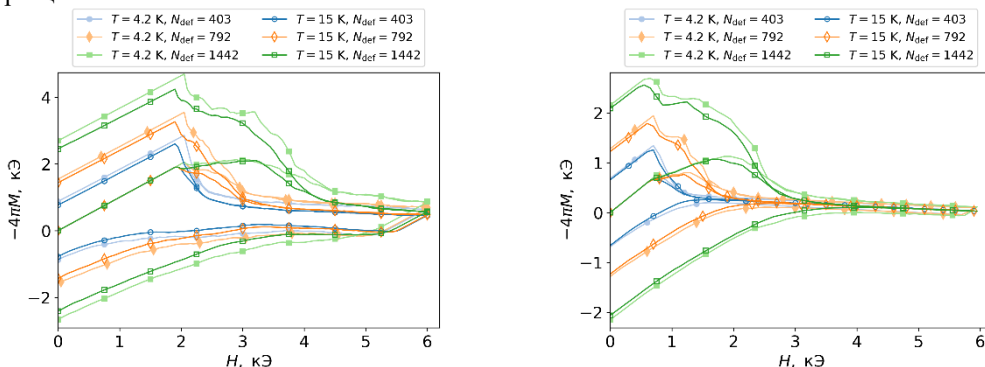


Рис. 1. Петли перемагничивания образцов  $MgB_2$  (слева) и YBCO (справа) с одинаковыми массивами дефектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10088, <https://rscf.ru/project/22-72-10088/>.



Ш.А. МУМИНОВА<sup>1</sup>, Ф.Ф. УМАРОВ<sup>2</sup>, И.Д. ЯДГАРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

## АДСОРБЦИЯ АТОМОВ АЗОТА НА ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Рассмотрена адсорбция атомов азота на поверхности двухслойной углеродной нанотрубки при температурах 300 и 600К. При взаимодействии атомов азота с энергиями 2-2,2 эВ при 300К и 0,2-0,3 эВ при 600К с нанотрубкой атомы азота адсорбируются на ее поверхности. Результаты моделирования показывают, что характер процесса адсорбции зависит от энергии атомов азота и температуры поверхности нанотрубки.

SH.A. MO‘MINOVA<sup>1</sup>, F.F. UMAROV<sup>2</sup>, I.D. YADGAROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

## ADSORPTION OF NITROGEN ATOMS ON A SURFACE OF DOUBLE-LAYER CARBON NANOTUBES

The adsorption of nitrogen atoms on the surface of a two-layer carbon nanotube at temperatures of 300 and 600 K is considered. During the interaction of nitrogen atoms with energies of 2-2.2eV at 300K and 0.2-0.3eV at 600K with a nanotube, nitrogen atoms are adsorbed on its surface. The simulation results show that the nature of the adsorption process depends on the energy of nitrogen atoms and the temperature of the nanotube surface.

Углеродные нанотрубки (УНТ) привлекают особое внимание благодаря своим уникальным свойствам, таким как повышенные электропроводность, оптическая активность и механическая прочность. Этот захватывающий новый класс материалов показал многообещающие применения во многих областях с момента его открытия. Кроме того, УНТ являются хорошим выбором для изучения механизмов адсорбции [1]. Двухслойные углеродные нанотрубки (ДСУНТ) представляют собой развивающийся класс углеродных наноструктур. ДСУНТ состоит ровно из двух концентрических углеродных нанотрубок. Эта структура с двойными стенками делает ДСУНТ простейшей системой для изучения влияния межстенной связи на физические свойства углеродных нанотрубок. ДСУНТ состоит из двух концентрических нанотрубок, эквивалентных ОСУНТ, с межстенным расстоянием 0,33–0,42 нм [2].

В данной работе с использованием потенциала ReaxFF [3] изучено взаимодействие атомов азота с поверхностью двухслойной углеродной нанотрубки при температурах 300 и 600К. Построена модель ДСУНТ с внутренним и внешним диаметрами 0.678 и 1.357 нм, соответственно. ДСУНТ выбраны на основе экспериментальных данных [4-5]. Для проведения модельных экспериментов по взаимодействию атомов азота с поверхностью углеродной нанотрубки был использован программный пакет LAMMPS.

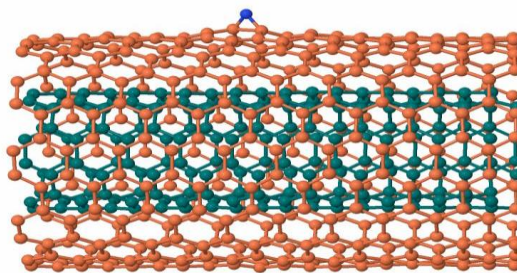


Рис. 1. Процессы адсорбции атомов азота на поверхности ДСУНТ

При взаимодействии атомов азота с энергиями 2-2,2 эВ при 300К и 0,2-0,3 эВ при 600 К с нанотрубкой атомы азота адсорбируются на ее поверхности. Длины связей атомов азота с углеродом составляют при 300К - 1,30–1,34 Å, а при 600К - находятся в пределах 1,4–1,6 Å. Результаты моделирования показывают, что характер процесса адсорбции зависит как от энергии атомов азота, так и от температуры поверхности углеродной нанотрубки.

### Список литературы

1. Bo Pan, Baoshan Xing // Environmental Science & Tech. 2008. Vol. 42, №. 24. P. 23-29.
2. Y. J. Li, K. L. Wang, J. Q. Wei, Z. Y. Gu, Z. C. Wang, J. B. Luo and D. H. Wu, Carbon, 2005, 43, 31.
3. C. Zou, Y.K. Shin, A.C.T. van Duin, H. Fang, Z.-K. Liu, // Acta Materialia 2015. Vol. 83, P. 102-112.
4. Cai Shen, Alexandra H. Brozena and YuHuang Wang // Nanoscale, 2011, 3(2), pp.503-518.
5. V. Zólyomi, J. Koltai, Á. Ruzsnyák, J. Kürti, Á. Gali, F. Simon, H. Kuzmany, Á. Szabados, and P. R. Surján. //Physical review B 2008, 77, 245403

## СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ОБЪЕМНОГО ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $Ti_{67}Al_{33}$ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМООБРАБОТОК

Показано, что в интерметаллиде  $Ti_{67}Al_{33}$ , для которого характерно доминирование и конкуренция металлического и полупроводникового типов проводимости, наблюдается корреляция температурных коэффициентов сопротивления и объемного теплового расширения, независимо от способа термообработки.

ZH.KH. MURLIEVA, D.K. PALCHAYEV, M.E. ISKHAQOV, M.KH. RABADANOV, R.M. EMIROV  
Dagestan State University, Makhachkala, Russia

## RELATIONSHIP OF TEMPERATURE COEFFICIENTS OF ELECTRICAL RESISTANCE AND VOLUME THERMAL EXPANSION OF INTERMETALLIDE $Ti_{67}Al_{33}$ AFTER VARIOUS HEAT TREATMENTS

It is shown that in the  $Ti_{67}Al_{33}$  intermetallic compound, which is characterized by the dominance and competition of metallic and semiconductor types of conductivity, there is a correlation between the temperature coefficients of resistance and volumetric thermal expansion, regardless of the type of heat treatment.

Установлено [1] наличие связи температурных коэффициентов сопротивления  $\alpha_\rho = d\rho/(\rho \cdot dT)$  и объемного расширения, отнесенного к температуре  $\alpha_V/T = dV/V \cdot dT$  для сплава вычитания  $Ti_{67}Al_{33}$  со структурой  $\alpha_2$ -фазы ( $Ti_3Al$ ) в широкой области температур, как при металлическом, так и полупроводниковом характере проводимости (например, рис.1). В настоящей работе приведены результаты исследования этого интерметаллида после закалки и отжига. Измерения электросопротивления и теплового расширения проводились (*in situ*), на одном и том же образце в одних и тех же условиях. Факт одновременности измерений при одних и тех же термодинамических параметрах имеет особое значение для структур, которым характерны диффузионные фазовые переходы. Для образцов, отличающихся термообработкой, получены результаты исследований температурных зависимостей:  $\rho$  и  $\alpha$ ; температурных коэффициентов электросопротивления и теплового расширения, отнесенного к температуре –  $\alpha_\rho(T)$  и  $\alpha_V(T)/T$ ; отношений  $\alpha_\rho/\alpha_V$  и  $\alpha_V/\alpha_\rho$  при первом нагреве (метастабильного образца) и последнем охлаждении образца уже в стабилизированном состоянии. Характер зависимостей  $\alpha_\rho/\alpha_V$  и  $\alpha_V/\alpha_\rho$  указывает на критическое поведение  $\rho(T)$  при температурах, где происходят переходы от металлического к полупроводниковому типу проводимости и, обратно, к металлическому. На рисунке 1 приведены результаты анализа такого поведения для образца  $Ti_{67}Al_{33}$  после закалки от 1200 °С.

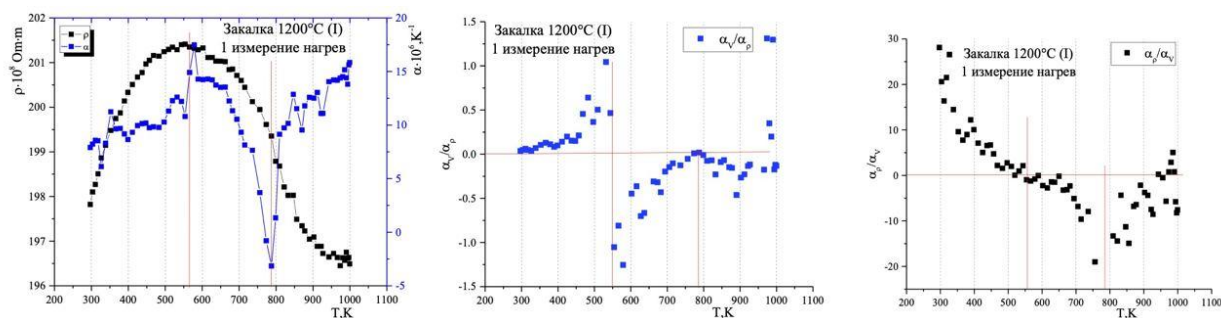


Рис. 1. Температурные зависимости:  $\rho(T)$  и  $\alpha(T)$ ;  $\alpha_\rho/\alpha_V$  и  $\alpha_V/\alpha_\rho$  образца после закалки от 1200 °С. Красными линиями отмечены температуры, при которых изменяется знак производных  $\rho(T)$  по температуре.

На зависимостях  $\rho(T)$  и  $\alpha_V(T)$  для всех образцов с различной термообработкой наблюдаются некоторые особенности при ~550К и в области температур от ~700К до ~800К. Обращает на себя внимание снижение разброса экспериментальных данных при рассмотрении температурных зависимостей отношений  $\alpha_\rho/\alpha_V$  и  $\alpha_V/\alpha_\rho$ . Это указывает на то, что отклонения результатов от средних значений, связаны со структурными изменениями, которые одновременно проявляются на зависимостях  $\alpha_\rho$  и  $\alpha_V$ , полученных по данным одновременных исследований. Рассмотрение и интерпретация корреляции  $\alpha_\rho(T)$  и  $\alpha_V(T)/T$  позволит решить задачу по установлению механизмов формирования и релаксации зарядовых возбуждений в системах со смешанным типом связи, при фазовых превращениях и изменении типа проводимости.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002

### Список литературы

1. Palchayev D. K., Murlieva Z. K., Rabadanov M. K. and others//Journal of Physics: Conference Series. 1686 012051 (2020).



Н.М. МУСТАФОВЕВА<sup>1</sup>, А.К. ТАШАТОВ<sup>2</sup>, Н.М. МУСТАФАЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каршинский институт ирригации и агротехнологий, Карши, Узбекистан

<sup>2</sup>Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СКРЫТЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ NiSi<sub>2</sub>, СОЗДАНЫХ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ Si

Установлено, что границы раздела между слоями Si/NiSi<sub>2</sub> и NiSi<sub>2</sub>/Si (111) резкая и толщина переходных слоев не превышает 4-5 нм. Показано что методом ТФЭ невозможно получить трехслойную систему Si/NiSi<sub>2</sub>/Si (111) с толщиной Si и NiSi<sub>2</sub> менее 20-30 нм.

N.M. MUSTAFOEVA<sup>1</sup>, A.K. TASHATOV<sup>2</sup>, N.M. MUSTAFAYEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karshi Institute of Irrigation and Agrotechnologies, Karshi, Uzbekistan

<sup>2</sup>Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

## ANALYSIS OF THE STATE OF HIDDEN NiSi<sub>2</sub> NANOCRYSTALS CREATED IN THE SUBSURFACE REGION OF Si

It has been established that the interface between the Si/NiSi<sub>2</sub> and NiSi<sub>2</sub>/Si (111) layers is sharp and the thickness of the transition layers does not exceed 4–5 nm. It is shown that it is impossible to obtain a three-layer Si/NiSi<sub>2</sub>/Si (111) system with a thickness of Si and NiSi<sub>2</sub> less than 20–30 nm using the SPE method.

Гетероструктуры типа NiSi<sub>2</sub>/Si имеют больше перспективы в создание новых приборов функциональной электроники, в частности, в создании СВЧ-транзисторов, детекторов излучения, омических контактов и барьерных структур [1]. Большинство силицидных фаз обладают свойствами характерными для металлов. Физико-химические свойства тонких и сверхтонких плёнок хорошо изучены только для силицидов Na, Ba, Pd и Co.

Данная работа посвящена получению нанокристаллических фаз и слоев NiSi<sub>2</sub> на различных глубинах приповерхностной области Si изучению их электронной и кристаллической структуры и параметров зон.

Перед осаждением пленок кремниевые образцы Si (111) очищались прогревом в условиях сверхвысокого вакуума ( $P = 10^{-7}$  Па) при  $T = 1100$  К в течении 2–3 часов и до  $T = 1400$  К в импульсном режиме. При этом поверхность полностью очищается от кислорода (в пределах чувствительности ОЭС). Морфология поверхности изучалась методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии (РЭМ и АСМ). Напыление Ni различной толщины (от 10 Å до 100 Å) проводилась при комнатной температуре, при этом образовались сплошные аморфные пленки и на границе раздела Ni/Si не наблюдалось заметной взаимодиффузии Ni в Si и Si в Ni.

Для создания трехслойной системы на поверхности гетероэпитаксиальной структуры NiSi<sub>2</sub>/Si (111) при  $T=1000$  К напылялась пленки Si с толщиной ~50 нм. Толщина NiSi<sub>2</sub> составляла ~20 нм. Испарение кремния осуществлялось электронной бомбардировкой.

Увеличение  $T$  до 1100-1150 К способствует получению монокристаллической пленки Si. Однако, при этом из-за нарушение сплошности пленки NiSi<sub>2</sub> формируются островковые образования. На рис. 1 представлен Оже профиль сформированной гетероструктуры Si/NiSi<sub>2</sub>/Si (111).

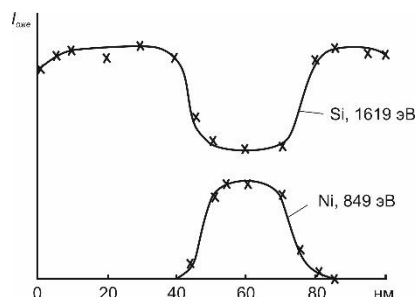


Рис.1. Зависимость интенсивности Оже пиков Si ( $E=1619$  эВ) и Ni ( $E=848$  эВ) для системы Si/NiSi<sub>2</sub>/Si(111);  $d_{Si} = 50$  нм,  $d_{NiSi_2} = 20$  нм

Видно, что граница раздела между слоями Si/NiSi<sub>2</sub> и NiSi<sub>2</sub>/Si (111) резкая и толщина переходных слоев не превышает 4-5 нм. Наши дальнейшие исследования показали, что в случае массивных пленок NiSi<sub>2</sub> толщиной 500-600 нм, островки образуются при  $T \approx 1200$  К.

### Список литературы

1. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Mustafоеva N.M., Muradkabilov D.M. // Effect of the Disordering of Thin Surface Layers on the Electronic and Optical Properties of Si(111) // Semiconductors, 2020, 54(11), стр. 1424–1429

Н.М. МУСТАФОВЕВА<sup>1</sup>, А.К. ТАШАТОВ<sup>2</sup>, С.Н. ЭШБОБОВЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каршинский институт ирригации и агротехнологий, Карши, Узбекистан

<sup>2</sup>Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ Si(111)

Установлено, что в случае чистого Si (111) в области  $h\nu = 0.6-0.9$  эВ значение  $K$  заметно не меняется, в очень короткой области  $h\nu = 0.9-1$  эВ зависимость  $K(h\nu)$  имеет экспоненциальный характер, а в области  $h\nu = 1.0-1.1$  эВ  $K$  резко, почти линейно, с большой крутизной уменьшается до нуля.

N.M. MUSTAFOEVA<sup>1</sup>, A.K. TASHATOV<sup>2</sup>, S.N. ESHBOBOYEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karshi Institute of Irrigation and Agrotechnologies, Karshi, Uzbekistan

<sup>2</sup>Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE FORMATION OF NANOSIZED PHASES IN THE NEAR-SURFACE REGION OF Si(111) SINGLE CRYSTALS

It is established that in the case of pure Si(111) in the region  $h\nu = 0.6-0.9$  eV, the value of  $K$  does not change noticeably, in the very short region  $h\nu = 0.9-1$  eV, the dependence of  $K(h\nu)$  has an exponential character, and in the region  $h\nu = 1.0-1.1$  eV, it is close, almost linear, with a large steepness decreases to zero.

Основной целью данной работы является исследование влияния образования наноразмерных фаз в приповерхностной области монокристаллов Si(111) при бомбардировке ионами  $Ag^+$  с  $E_0 = 0.5-2$  кэВ на параметры и оптические свойства. Были использованы монокристаллические образцы Si(111) с размерами  $10 \times 10 \times 0.5$  мм. Разупорядочение приповерхностного слоя Si(111) приводит к уменьшению коэффициента пропускания света  $K$  во всей исследуемой области энергии фотонов ( $h\nu = 0.4-1.5$  эВ) (рис. 1).

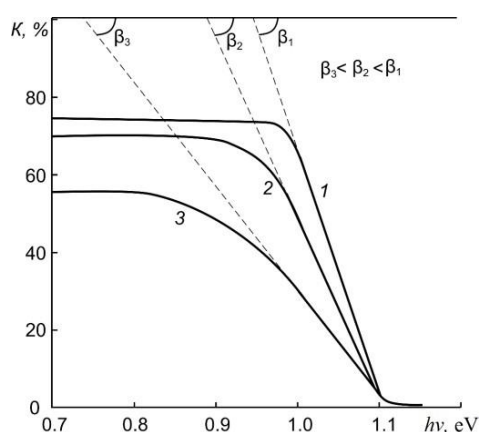


Рис. 1. Зависимости коэффициента пропускания света  $K$  от энергии фотонов для пленки Si(111) бомбардированной ионами  $Ag^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ при дозах  $D$ ,  $cm^2$ : 1-0; 2- $5 \cdot 10^{15}$ ; 3- $10^{16}$ .

Из рис. 1 видно, что в случае чистого Si(111) в области  $h\nu = 0.6-0.9$  эВ значение  $K$  заметно не меняется, в очень малой области  $h\nu = 0.9-1$  эВ зависимость  $K(h\nu)$  имеет экспоненциальный характер, а в области  $h\nu = 1.0-1.1$  В  $K$  резко, почти линейно, с большой крутизной уменьшается до нуля. Известно, что наличие в кристаллах неупорядоченности на атомном уровне приводит к появлению на зависимости коэффициента поглощения от  $(h\nu)^2$  экспоненциальных участков. Ионная бомбардировка приводит к заметному уменьшению коэффициента поглощения во всей исследуемой области  $h\nu$ , увеличению экспоненциального участка и, следовательно, уменьшению крутизны линейного участка кривой  $(h\nu)$  (рис. 1). Эти изменения происходят до дозы  $D = 5-10 cm^2$ , которой соответствует полной аморфизации приповерхностного слоя. В случае поглощения света для экспоненциального участка зависимость коэффициента поглощения и от энергии фотонов можно оценить по формуле, приведенной в [1] для кристалла CdSeS:  $E_g$ .

$$\alpha = \alpha_0 e^{\frac{-(E_g - h\nu)}{E_0}}$$

где  $E_g$  - характеристическая энергия, которая определяет крутизну края и дает информацию о флуктуации величин межатомных расстояний [1]. Учитывая то, что для монокристаллических и аморфных пленок Si коэффициенты отражения света в исследуемой области  $h\nu$  мало отличаются друг от друга и их значение не превышает 46% можно полагать, что для этих пленок зависимости  $K(h\nu)$  и  $(h\nu)$  обратно пропорциональны. Поэтому по крутизне линейных участков кривых  $K(h\nu)$  можно оценить степень разупорядочения поверхности. Видно, что с ростом дозы ионов значение  $\beta$  и, соответственно, крутизна кривых  $tg\beta$  уменьшаются, а значение  $E_0 = 1/tg\beta$  увеличивается, что приводит к росту поглощения света и уменьшению интенсивности проходящего света [2]. Отметим, что при ионной бомбардировке, независимо от дозы ионов, значение  $h\nu$ , при котором  $K$  уменьшается примерно до нуля, не изменяется и лежит в пределах 1.1-1.15 эВ., т.е. при аморфизации не происходит уменьшения ширины запрещенной зоны. Наши дальнейшие исследования показали, что  $E_g$  для аморфизированного слоя Si составляет 1.2 эВ.

### Список литературы

1. П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. ЖТФ, 87(3), 443 (2017).
2. Д.М. Седракан, П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. ЖТФ, 85(5), 94 (2015).

А.А. НАШИВОЧНИКОВ, А.И. КОСТЮКОВ

*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ ЛАЗЕРНОМ СИНТЕЗЕ  
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО НАНОЛЮМИНОФОРА НА ОСНОВЕ МОНОКЛИННОГО  
 $Y_2O_3:Eu^{3+}$**

Установлено влияние добавления кислорода в состав буферной смеси газов во время лазерного синтеза на структурные и люминесцентные свойства наноразмерного  $Y_2O_3:Eu^{3+}$ . Определение оптимальной добавки  $O_2$  позволило добиться рекордного значения квантового выхода люминесценции среди оксидных  $Eu^{3+}$ -содержащих нанолюминофоров (53%).

A.A. NASHIVOCHNIKOV, A.I. KOSTYUKOV

*Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia*

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OXYGEN DURING LASER SYNTHESIS OF A  
HIGHLY EFFICIENT NANOPHOSPHOR BASED ON MONOCLINIC  $Y_2O_3:Eu^{3+}$**

The effect of adding oxygen to the composition of the buffer gas mixture during laser synthesis on the structural and luminescent properties of nanosized  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  has been established. Determining the optimal addition of  $O_2$  made it possible to achieve a record value of the luminescence quantum yield among oxide  $Eu^{3+}$ -containing nanophosphors (53%).

Оксид иттрия, легированный европием, - один из самых высокоэффективных твердотельных красных люминофоров, квантовый выход которого приближается к 100% для порошков микронного размера. В настоящее время стремительно увеличивается спрос на наноразмерные люминофоры, поскольку данные материалы обеспечивают более высокое пространственное разрешение для оптических устройств, биовизуализации и других приложений. Однако обычно квантовый выход нанолюминофоров существенно ниже по сравнению со своими микрокристаллическими аналогами, что затрудняет возможность перехода к их широкому практическому применению. Поэтому разработка высокоэффективных наноразмерных люминофоров и оптимизация их свойств до сих пор остается актуальной задачей.

В данной работе был разработан подход к синтезу нанолюминофоров  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  с высокой эффективностью красной люминесценции методом лазерного испарения. В основе этого подхода лежит испарение в атмосфере с оптимальным содержанием кислорода в испарительной камере. С целью определения оптимальной добавки  $O_2$  к основному буферному газу – аргону – был проведен лазерный синтез образцов с добавками кислорода 10, 15, 20, 30, 35 и 40 об.% при суммарном давлении 0.5 бар в испарительной камере. Также один из образцов был получен в атмосфере аргона без добавления  $O_2$ . Испарение осуществлялось с помощью непрерывного  $CO_2$ -лазера умеренной мощности (100 В) с производительностью нанопорошка около 2 г/час.

Методом РФА установлено, что все полученные образцы представлены преимущественно моноклинной фазой  $Y_2O_3$  с небольшими примесями кубической фазы. С помощью ПЭМВР показано, что размер частиц в серии составляет около  $19 \pm 7$  нм и не зависит от добавки кислорода.

Спектр фотолюминесценции (ФЛ)  $m-Y_2O_3:Eu^{3+}$  представлен сериями полос в области 575-725 нм, обусловленными внутриконтинуальными  $^5D_0-^7F_{1,4}$  переходами в  $Eu^{3+}$ . Максимум интенсивности соответствует полосе ~ 623 нм, относящейся к  $^5D_0-^7F_2$  переходу. Установлено, что добавление  $O_2$  во время синтеза существенно увеличивает интенсивность ФЛ  $m-Y_2O_3:Eu^{3+}$ . Интенсивность образца, полученного при добавке 30 об.%  $O_2$ , более чем в 15 раз выше по сравнению с образцом, приготовленным в аргоне. Однако при добавлении  $O_2$  выше 30 об.% наблюдается спад интенсивности ФЛ, обусловленный техническими ограничениями установки для испарения.

Измеренные значения абсолютного квантового выхода (КВ) демонстрируют ту же тенденцию, что и интенсивность ФЛ. Для образца, полученного в аргоне, КВ не превышает 3%, тогда как добавление 30 об.%  $O_2$  приводит к росту квантового выхода вплоть до 53%. Насколько известно авторам, полученный КВ является одним из самых высоких для оксидных  $Eu^{3+}$ -содержащих нанолюминофоров, измеренном при прямом возбуждении допанта, и по своим значениям приближается к КВ микрокристаллических люминофоров. Предполагается, что такой существенный рост КВ обусловлен уменьшением концентрации кислородных вакансий в матрице  $Y_2O_3$  в кислородосодержащей атмосфере. Измеренные времена жизни ФЛ находятся в диапазоне 2.2-2.6 мс, а рассчитанные цветовые координаты  $m-Y_2O_3:Eu^{3+}$  имеют значение (0.67, 0.33). Полученные цветовые координаты в совокупности с высокими показателями чистоты цвета (> 96%) и КВ указывают на крайне многообещающие перспективы использования, синтезированного нанолюминофора для различных люминесцентных приложений.

Таким образом, показано, что добавление  $O_2$  во время лазерного синтеза позволяет добиться получения нанолюминофоров  $m-Y_2O_3:Eu^{3+}$  с рекордными показателями эффективности люминесценции. Ожидается, что полученные результаты будут способствовать дальнейшей оптимизации люминесцентных свойств наноразмерного  $Y_2O_3:Eu^{3+}$ , а разработанные подходы к синтезу – рассматриваться как эффективный способ управления свойствами функциональных наноматериалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-73-00106.

## БЛИСТЕРИНГ, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ АРГОНА, НА ПОВЕРХНОСТИ ТРИБОРТА ЛИТИЯ

Рассмотрена ионно-кластерная бомбардировка поверхности монокристалла трибората лития при различных удельных энергиях кластеров. Продемонстрировано, что бомбардировка кластерными ионами аргона приводит к формированию «блистеров» при ионной дозе облучения  $\leq 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, а при большей дозе облучения – к формированию кратеров на поверхности монокристалла трибората лития. Показано влияние различной удельной энергии кластеров на результат формирования кратеров.

I.V. NIKOLAEV, N.G. KORBEISHCHIKOV  
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

## BLISTERING INDUCED BY ARGON CLUSTER ION BEAM ON THE SURFACE OF A LITHIUM TRIBORATE

The cluster bombardment of the surface of lithium triborate single crystal is considered at different scaled cluster energy. It has been demonstrated that bombardment with argon cluster ions leads to the formation of "blisters" at an ion fluence  $\leq 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>, and, at a higher ion fluence, to the formation of craters on the surface of a lithium triborate single crystal. The effect of different scaled cluster energy on the result of crater formation is shown.

Триборат лития (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, LBO) является одним из самых востребованных нелинейно-оптических (НЛО) монокристаллов и широко используется для различных приложений с преобразованием частоты лазерного излучения (генерация высших гармоник, оптические параметрические процессы и др.), благодаря высокой лучевой стойкости, широкому диапазону прозрачности и другим оптическим характеристикам [1–3].

Ионно-кластерные пучки обладают уникальными физическими характеристиками, поэтому сегодня активно используются для модификации поверхности различных материалов (малоинвазивная полировка, формирование упорядоченных поверхностных наноструктур и др.), прецизионного анализа поверхности (масс-спектрометрия вторичных ионов, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) и т.д. [4–6]. Взаимодействие газовых кластеров с твердой поверхностью сопровождается коллективными нелинейными эффектами, которые не могут быть описаны известными теоретическими моделями. Ионно-кластерные пучки потенциально позволяют получить сверхгладкую поверхность с минимальным поврежденным слоем при определенных условиях, либо индуцировать блистеринг, который также имеет ряд применений [7,8].

В данной работе проведена обработка поверхности монокристалла LBO ионно-кластерным пучком аргона. На основе результатов наших более ранних работ [9,10], использовался ионно-кластерный пучок с различной энергией, приходящейся на один атом в кластере – 10 и 105 эВ/атом.

Исследовано формирование блистеров и кратеров с диаметром от десятков до сотен нанометров на поверхности трибората лития после ионно-кластерной бомбардировки в различных режимах. С помощью функции спектральной плотности мощности (СПМ) шероховатости проанализирована топография поверхности и получены усредненные характеристики формируемых кратеров. Показано, что после высокоэнергетичного режима (105 эВ/атом) обработки средняя плотность кратеров больше в 1,5 раза, а после низкоэнергетичного режима (10 эВ/атом) средний размер кратеров больше на 11,5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №21-19-00046) в части обработки образцов кластерными ионами с использованием оборудования ЦКП “Прикладная физика” НГУ и Минобрнауки РФ (грант FSUS-2020-0039) в части подготовки и анализа образцов.

### Список литературы

1. Ch. Wu, G. Yang, M.G. Humphrey, C. Zhang // *Coord. Chem. Rev.*, 2018, Vol. 375, p. 459.
2. T.T. Tran, H. Yu, J.M. Rondinelli, K.R. Poeppelmeier, P.S. Halasyamani // *Chem. Mater.*, 2016, Vol. 28, p. 5238.
3. D.N. Nikogosyan, *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*, Springer, NY, 2005, 427 p.
4. А.Е. Иешкин, А.Б. Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш // *УФН*, 2022, Том 192, №7, стр. 722.
5. I. Yamada // *Appl. Surf. Sci.*, 2014, Vol. 310, p. 77.
6. V.N. Popok // *Mater. Sci. Eng. R*, 2011, Vol. 72, p. 137.
7. Y. Kudriavtsev, R. Asomoza, A. Hernandez, D.Yu. Kazantsev, B.Ya. Ber, A.N. Gorokhov // *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2020, Vol. 38, No.5, Article No. 053203.
8. R. Singh, S.H. Christiansen, O. Moutanabbir, U. Gösele // *J. Electr. Mater.*, 2010, Vol. 39, No. 10, p. 2177.
9. N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, V.V. Atuchin, I.P. Prosvirin, A.V. Kapishnikov, A. Tolstogouzov, V. Pelenovich, D.J. Fu // *Mater. Res. Bull.*, 2023, Vol. 158, Article No. 112082.
10. N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, M.A. Roenko // *Nucl. Instr. Meth. B*, 2019, Vol. 438, p. 1.

М.С. НОВИКОВ<sup>1</sup>, П.Н. ДЕГТЯРЕНКО<sup>2</sup>, С.Ю. ГАВРИЛКИН<sup>3</sup>, А.Ю. ЦВЕТКОВ<sup>3</sup>, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН<sup>1</sup>, Д.Н. НИКИФОРОВ<sup>1</sup>, А.В. ШЕМЧУК<sup>1</sup>, Е.С. МАТЮХАНОВ<sup>1</sup>, Г.В. МИЦЫН<sup>1</sup>, В.И. СТЕГАЙЛОВ<sup>1</sup>, В.А. СКУРАТОВ<sup>1</sup>, В.К. СЕМИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук, Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПИННИНГА В ВТСП ЛЕНТАХ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТОВ НОВОГО НУКЛОТРОНА С АЗОТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Проведен цикл облучений на ускорителях ОИЯИ коротких образцов и бобин с ВТСП лентами 2-го поколения, витка кабеля и обмотки соленоида. Получены существенные увеличения критических токов ВТСП лент. Рассмотрены возможности увеличения вплоть до азотного диапазона рабочей температуры магнитов из ВТСП кабеля при помощи облучения обмоток 660 МэВ протонами, и ВТСП лент ионами ксенона, для новой магнитной системы синхротрона Нуклотрон комплекса NICA.

M.S. NOVIKOV<sup>1</sup>, P.N. DEGTYARENKO<sup>2</sup>, S.YU. GAVRILKIN<sup>3</sup>, A.YU. TSVETKOV<sup>3</sup>, H.G. KHODZHIBAGIYAN<sup>1</sup>, D.N. NIKIFOROV<sup>1</sup>, A.V. SHEMCHUK<sup>1</sup>, E.S. MATYUHANOV<sup>1</sup>, G.V. MITSYN<sup>1</sup>, V.I. STEGAJLOV<sup>1</sup>, V.A. SKURATOV<sup>1</sup>, V.K. SEMINA<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2</sup> Joint Institute of High Temperatures, Moscow, Russia

<sup>3</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF RADIATION PINNING CENTERS IN 2G HTS TAPES FOR NEW NITROGEN-COOLED NUCLOTRON MAGNETS CREATION

A cycle of irradiation of short samples and bobbins with 2G HTS tapes, a cable coil and a solenoid winding was carried out at JINR particle accelerators. Significant increases in critical currents of HTS tapes were obtained. The possibilities of increasing up to the nitrogen range of the operating temperature of magnets from the HTS cable by irradiating the windings with 660 MeV protons and HTS tapes with xenon ions, for a new magnetic system of the synchrotron Nuclotron of the NICA complex are considered.

Проводится разработка диполей и квадрупольей с обмотками из ВТСП кабеля типа Нуклотрон для модернизации магнитной системы синхротрона Нуклотрон [1]. ВТСП квадруполь (18 лент в кабеле) испытан при 31 К на токе до 10 кА, при dB/dt до 7 Тл/с. Криогенная система с температурой хладагента 50-65 К на порядок дешевле гелиевой или неоновой. Критический ток ВТСП ленты в поле 1.8 Тл – около 70 А при 65 К, и 200 А при 50 К. С запасом по току в 20%, при 50 К в 10 кА кабеле будет 60 ВТСП лент (на пределе), а при 65 К такой кабель мало реален. Для увеличения критического тока путем создания радиационных дефектов – дополнительных центров пиннинга – на пучке Фазотрона облучены разными флюенсами протонов 12 коротких образцов, и длинномерные вращающиеся образцы: 4 бобины с лентой, соленоид, виток ВТСП кабеля. Критические токи центра одного из коротких облученных образцов, и 3 коротких образцов с бобин при 30 К, представлены на рисунке 1. Максимум пиннинга на протонах пока не найден, есть двукратный рост при 65 К. Ионами ксенона на циклотроне ИЦ-100 облучены короткие образцы, где также достигнуто увеличение критических токов в 2-2.5 раза. Работы продолжаются.

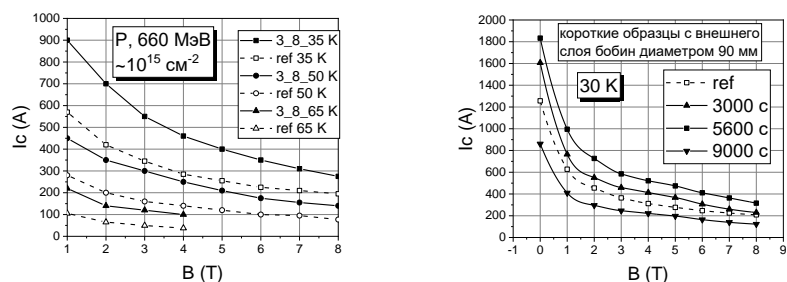


Рис. 1. Критикои облученных 660 МэВ протонами ВТСП лент 2-го поколения в сравнении с необлученными образцами

Для улучшения характеристик магнитов Нового Нуклотрона представляется наиболее удобным использовать пучок Фазотрона, поскольку длина пробега позволяет облучить части обмоток, находящиеся в поле яра, в направлении локального поля. Ионами ксенона на циклотронах возможно облучать только единичные ВТСП ленты при перемотке в вакууме. Удвоение критического тока позволит эффективно применять охлаждение обмоток до 50 К (30 лент в кабеле), утроение – до 60-65 К (45-60 лент в кабеле).

### Список литературы

1. H. Khodzhbagiyani et al., "Quadrupole Superconducting Model for Update of the Nuclotron Synchrotron," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 6, pp. 1-4, Sept. 2022, Art no. 4003704, doi: 10.1109/TASC.2022.3151579.

С.А. НУРЕТДИНОВ, И.Г. СЕРГИЕНКО, В.В. ТАРКОВСКИЙ  
*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь*  
**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР В ПРОЦЕССАХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ**

На примерах алюминия, меди, никеля и графита изучены зависимости компонентного состава синтезированных наноструктур от вложенной энергии, напряжения и числа разрушенных образцов в одном объеме воды. Рассмотрены механизмы основных физико-химических процессов, определяющих компонентный состав и размерность наночастиц.

S.A. NURETDINOV, I.H. SERHIYENKA, V.V. TARKOVSKY  
*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus*  
**REGULARITIES OF THE FORMATION OF NANOSTRUCTURES IN THE PROCESSES OF  
ELECTRIC EXPLOSION OF METAL CONDUCTORS**

Using aluminum, copper, nickel, and graphite as examples, the dependences of the component composition of the synthesized nanostructures on the input energy, stress, and the number of destroyed samples in one volume of water are studied. The mechanisms of the main physicochemical processes that determine the component composition and dimension of nanoparticles are considered.

В последнее время наночастицы металлов, их сплавов, полупроводников и композитов широко используются в электронике, энергетике, производстве новых материалов, биологии, медицине [1]. Это связано с наличием у них квантово-размерных свойств, что и отличает их от макроматериалов. Это приводит к нелинейным эффектам при модификации ими макроматериалов и изменению свойств последних [2]. Перспективным методом синтеза наноразмерных частиц является электрический взрыв тонких проводников в жидкости. Под действием электрического тока проводник превращается в плазму при рекомбинации которой происходит синтез наноразмерных частиц [3].

Синтез наноразмерных частиц осуществлялся на экспериментальном стенде, подобно описанному в [4-5]. Его электрическая часть реализована на базе систем возбуждения эксимерных лазеров [6]. Ее параметры рассчитывались по методике [7]. Диспергированию путем электрического взрыва в дистиллированной воде подвергались образцы алюминия, меди, никеля. Исследовались закономерности образования наноструктур металлов в зависимости от геометрии проводника, энергии электрического взрыва, рабочего напряжения.

В результате получены наносuspензии с характерным для этих проводников отливом и заметно сниженной прозрачностью. Рассмотрены механизмы основных физико-химических процессов, определяющих компонентный состав наночастиц, создаваемых электрическим взрывом проводников в жидкости. Показано, что максимумы размерных распределений смещаются в сторону больших размеров наночастиц с ростом рабочего напряжения, энергии в импульсе, а также с ростом числа разрушенных образцов в одной и той же порции воды.

Методами АСМ микроскопии получены данные о размерных характеристиках и морфологии полученных наноструктур. Полученные наноструктуры обладают схожей морфологией, однако профили их размерных характеристик различаются. Наноструктуры меди в целом имеют меньшие размеры и несколько отличаются по габитусу. Наноструктуры графита обладают более высокой симметричностью. Особенностью электровзрывного диспергирования никеля в виде полосок фольги является зависимость размерного распределения синтезированных наночастиц от ширины фольги. С ростом ее ширины растет доля крупных наночастиц и конгломератов.

Оптическая плотность полученных наносuspензий зависит от вложенной в электрический взрыв энергии и количества разрушенных образцов в одной порции воды. В области коротких длин волн (до 275 нм) оптическая плотность наносuspензий наибольшая. В области длин волн больших 300 нм оптическая плотность наносuspензий никеля практически не зависит от рабочего напряжения. С ростом количества взорванных образцов в одной порции воды она наносuspензий возрастает, что связано с увеличением диспергированной массы.

Расположение максимума размерных распределений также смещается в сторону больших размеров наночастиц. При этом как «среднеобъемный», так и «среднегеометрический» диаметры наночастиц никеля остаются практически на одном уровне, а «среднеобъемный» и «среднегеометрический» диаметры наночастиц углерода с ростом числа диспергированных образцов графита в воде увеличиваются.

*Список литературы*

1. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673–718.
2. Гончарова Д.А., Лапин И.Н., Савельев Е.С., Светличный В.А. // Известия ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 7. С. 99-106.
3. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.б, Тэхніка. 2017. Т.7, № 1. С. 56-65.
4. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Лещик С.Д. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.б, Тэхніка. 2017. Т.7, № 2. С. 47-57.
5. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.б, Тэхніка. 2018. Т.8, № 1. С. 50-61.
6. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.  
Volodenkov A., Anufrik S., Znosko K. // High Temperature Material Processes. 2017. Vol. 21, No 4. P. 377–390.

## ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ДЕГИДРОГАЛОГЕНИРОВАННОГО ПОЛИВИЛИДЕНХЛОРИДА

В работе представлены результаты исследования пленок, полученные методом дегидрогалогенирования поливинилиденхлорида. Методами просвечивающей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния показано, что пленка имеет пористую полиин-полиеновую структуру. Рассмотрены свойства полевого транзистора, в качестве канала проводимости которого использовался дегидрогалогенированный поливинилиденхлорид.

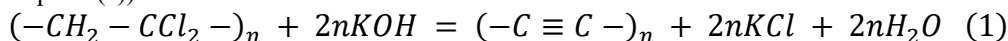
I.F. NURIAKHMETOV, I.A. ZAVIDOVSKIY, O.A. STRELETSKIY  
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON DEHYDROHALOGENATED POLYVILIDENCHLORIDE

This paper presents the results of the study of films obtained by dehydrohalogenation of polyvinylidene chloride. Transmission electron microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy and Raman spectroscopy have shown that film has a porous polyene-polyene structure. The properties of a field-effect transistor which conduction channel is a dehydrohalogenated polyvinylidene chloride are reported.

В настоящее время ведется активная работа по созданию транзисторов на основе полимеров. Полимерные транзисторы значительно легче, а их производство более дешево по сравнению с их кремниевыми аналогами. Поэтому из полимеров можно выпускать гибкие изделия [1]. Одномерные углеродные структуры, основанные на углероде sp-гибридизации, являются привлекательными материалами в качестве основы для создания электронных компонент [2].

В проведенной работе образцы изготавливались в несколько этапов. На первом этапе получали тонкие пленки (толщиной ~100 нм) путем растворения прекурсора поливинилиденхлорида (ПВДХ) в N, N-диметилформамиде с ацетоном с последующим испарением в чашках Петри. На следующем этапе полученные пленки подвергались химической реакции дегидрохлорирования в растворе ацетона и метанола в соотношении 9:1 и перенасыщенного раствора KOH. Реакция проходит в соответствии с формулой (1). В результате химической реакции формировались тонкие пористые пленки на основе полиин-полиеновых цепочек (см. рис1 а).



В дальнейшем при помощи литографии изготавливалась структура, схематически представленная на рис.1б. На поверхности кремния n-типа, выполняющего функцию затвора, формировался слой окисла толщиной 50 нм (подзатворный диэлектрик). Далее на оксидном слое осаждались металлические алюминиевые контакты 1 и 2, которые в дальнейшем служили в качестве истока и стока. Расстояние канала между истоком и стоком составляло 4 мкм. На поверхность изготовленной структуры в растворе ацетона высаживалась приготовленная пленка дегидрогалогенированного ПВДХ толщиной 100 нм.

На рис.1(в). представлены статические вольт-амперные (ВАХ) и передаточные характеристики изготовленного транзистора. По полученным данным оценены значения крутизны вольтамперной характеристики  $S = 3,2 \text{ нА/В}$  и порогового напряжения формирования канала  $U_{пор} = -0,3 \text{ В}$ .

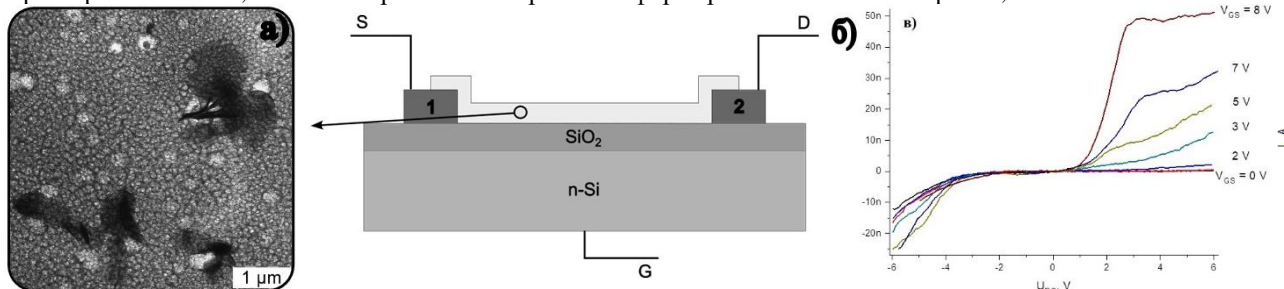


Рисунок 1. Изображение пленки в просвечивающем электронном микроскопе (а), схема транзистора (б), статические ВАХ (в).

### Список литературы

1. Dekker, Cees; Tans, Sander J.; Verschueren, Alwin R. M. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube // Nature, 1998, V. 393, P. 49–52.
2. Scaccabarozzi Alberto D., Milani Alberto, Peggiani Sonia, Pecorario Stefano, Sun Bozheng, Tykwinski Rik R., Caironi Mario, Casari Carlo S. A Field-Effect Transistor Based on Cumulenic sp-Carbon Atomic Wires // The Journal of Physical Chemistry. 2020 – V. 11 – P. 1970–1974



Г.А. ОВСЯННИКОВ, К.И. КОНСТАНТИНЯН, А.А. КЛИМОВ, В.А. ШМАКОВ, Г.Д. УЛЬЕВ,  
А.В. ШАДРИН

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

## СПИНОВЫЙ ТРАНСПОРТ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ ИРИДАТ - МАНГАНИТ-

Использование спинового тока вместо зарядового открывает новые возможности в микроэлектронике из-за существенного уменьшения выделения тепла. Однако детектирование и генерация спинового тока требует совершенно иного подхода к проблеме спинового транспорта. Обычно используется спиновый эффект Холла для преобразования зарядового тока в спиновый и обратно. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спиновой проводимости и угла Холла границы  $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  гетероструктуры в режиме ферромагнитного резонанса.

G.A. OVSYANNIKOV, K.Y.CONSTANTINIAN, A.A. KLIMOV, V.A. SHMAKOV, G.D. ULIEV,  
A.V. SHADRIN

*V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## SPIN TRANSPORT IN IRIDATE- MANGANITE INTERFACE

The use of electron spins opens up new opportunities in microelectronics, especially in the field of heat dissipation from submicron-sized elements. The detection and generation of spin current requires a completely different approach to the spin transport problem. The spin Hall effect is used for the conversion of spin current to charge current and vice versa in paramagnetic metals. We present the results of experimental studies of the spin mixing conductance and magnetoresistance in  $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  heterostructures at the presence of ferromagnetic resonance.

Тонкие эпитаксиальные пленки нанометровой толщины из иридата стронция  $\text{SrIrO}_3$  ( $\text{SIO}_3$ ) и манганита  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) были выращены на монокристаллической подложке  $(110)\text{NdGaO}_3$  с помощью магнетронного распыления при температуре подложки  $770\text{--}800^\circ\text{C}$  в смеси газов аргона (Ar) и кислорода  $\text{O}_2$  с общим давлением  $0.3\text{ mBar}$ .

В режиме ферромагнитного резонанса (ФМР) и взаимно перпендикулярных направленностей магнитных СВЧ и постоянного полей поперек границы возникает спиновый ток. Величина спинового тока определяется амплитудой прецессии намагниченности ферромагнетика и спиновой проводимостью границы (spin mixing conductance), в общем случае имеющей действительную ( $\text{Re } g^{\uparrow\downarrow}$ ) и мнимую ( $\text{Im } g^{\uparrow\downarrow}$ ) части.

Спектр ФМР определялся из зависимости от магнитного поля амплитуды проходящего СВЧ излучения в интервале частот  $F=1\text{--}20\text{ GHz}$ . Из обработки экспериментальных спектров ФМР определялись частотные зависимости резонансного поля  $H_0(F)$  и ширины линии  $\Delta H(F)$  [1]. Параметр спинового затухания Гильберта  $\alpha$  и уширение линии, вызванной неоднородностями  $\Delta H_0$  можно определить, используя выражение  $\Delta H(F)=4\pi\alpha F/\gamma+\Delta H_0$ . Величина реальной части спиновой проводимости определяется увеличением  $\alpha$  после напыления  $\text{SIO}$  пленки поверх LSMO.

Экспериментальные данные показывают, что затухание для LSMO пленки  $\alpha_{\text{LSMO}}=2.0\pm 0.2\cdot 10^{-4}$  после напыления  $\text{SIO}$  увеличивается до значений  $\alpha_{\text{SIO/SMO}}=6.7\pm 0.8\cdot 10^{-4}$ . Величина реальной части спиновой проводимости определяется разностью этих значений  $\text{Re } g^{\uparrow\downarrow}=(6.0\pm 0.6)\cdot 10^{19}\text{ m}^{-2}$  [1]. Согласно экспериментальным данным [2] при изменении толщины пленки  $\text{SIO}$  от 10 to 40 nm  $\text{Re } g^{\uparrow\downarrow}$  изменяется от  $1.3$  до  $3.6\cdot 10^{19}\text{ m}^{-2}$ .

Отношение спинового и зарядового токов определяется безразмерным параметром  $\theta_{\text{SH}}$  – спиновым углом Холла, который можно определить из угловых зависимостей спинового магнетосопротивления  $R_{\text{SMR}}$ . Измерения проводились вращением подложки, изменяя угол  $\varphi$  в плоскости X-Y между направлением задания тока и магнитным полем, расположенным в плоскости. Параллельное магнитное поле  $H$  задавалось катушками Гельмгольца вдоль X. В результате, для гетероструктуры иридат/манганит получено  $\theta_{\text{SH}}\approx 0.04\pm 0.01$  из измерений продольного магнетосопротивления  $R_L$ , а из измерений поперечного  $R_T$  спиновый угол Холла оказался существенно выше:  $\theta_{\text{SH}}\approx 0.35\pm 0.06$  при  $\text{Re } g^{\uparrow\downarrow}=6\cdot 10^{19}\text{ m}^{-2}$  и длине спиновой диффузии  $\lambda_S=1\text{ nm}$ . Для гетероструктуры Pt/LSMO была получена на порядок меньшая величина  $\theta_{\text{SH}}\approx 0.02$  для Pt [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-10006, <https://rscf.ru/project/23-49-10006/>.

### Список литературы

1. Г. А. Овсянников, К. И. Константиныан и др. // Письма в ЖТФ. 2022. Т.48, С.44-48.
2. X. Huang, S. Sayed, J. Mittelstaedt, et al // Adv. Mater., 2021. P. 20082
3. Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, et al. // J. Phys.C: Condens. Matter. 2016. Vol. 28. P. 103004



М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, Д.А. АБИН, И.В. МАРТИРОСЯН, И.А. РУДНЕВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ПРОТОТИП МАСШТАБИРУЕМОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ СТОПОК ВТСП ЛЕНТ**

Были проведены как экспериментальные исследования взаимодействия конструкций на основе ВТСП-лент с различными вариантами сборок постоянных магнитов, так и численный анализ различных конструкций магнитолевитационных систем. Определен оптимальный вариант реализации магнитолевитационной системы на основе ВТСП композитов. Была разработана и реализована модель магнито-левитационного транспорта на основе стопок ВТСП-лент. Использована система с двумя V-образными рельсами и четырьмя криостатами со стопками ВТСП-лент.

M.A. OSIPOV, A.S. STARIKOVSKY, D.A. ABIN, I.V. MARTIROSYAN, I.A. RUDNEV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **PROTOTYPE OF A SCALABLE MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT BASED ON STACKS OF HTSC TAPES**

We carried out both experimental studies of the interaction of structures based on HTSC tapes with various types of permanent magnet assemblies, and a numerical analysis of various designs of maglev systems. The optimal variant of implementation of the maglev system based on high-temperature superconductor composites has been determined. A model of magnetic levitation transport based on stacks of HTSC tapes was developed and implemented. We used a design with two V-shaped rails and four cryostats with stacks of HTS tapes.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) имеют значительный потенциал для применения в системах на основе магнитной левитации. Одним из распространенных применений является левитационный транспорт. Однако для левитационных применений, в особенности для левитационного транспорта, особый интерес представляет латеральная устойчивость системы сверхпроводник – постоянный магнит. Одним из вариантов увеличения латеральной устойчивости является использование магнитных направляющих в форме V-образных рельс [1,2].

Нами было проведено численное моделирование вертикальной и латеральной сил левитации для планарных и угловыхборок магнитов различной конфигурации. В рамках численного моделирования было рассмотрено четыре различные конструкции: две плоских конфигурации магнитных треков с сонаправленными и встречно-ориентированными магнитами, а также для две угловых конфигурации магнитного трека, отличающиеся наличием или же отсутствием магнитопровода в их составе. Наиболее перспективной показала себя магнитолевитационная транспортная система с угловой сборкой постоянных магнитов, соединённых магнитопроводом, что связано с более высокой латеральной устойчивостью при сравнимой с остальными сборками вертикальной силой. В дальнейшем было проведено экспериментальное исследование левитационных характеристик для V-образных направляющих, различающихся углом и конфигурацией магнитов, а также с различной конфигурациейборок ВТСП-лент. Получены зависимости силы левитации при приближении/отдалении к магнитным трекам, а также латеральной возвращающей силы над магнитными направляющими. Для оптимальной конфигурации (ВТСП в виде стопок лент, магнитопровод под углом 120, магниты 40x20x10 мм) был создан макет магнитолевитационного транспорта длиной 2 м.

В рамках данной работы получены новые данные о влиянии конфигурации магнитных треков на силовые характеристики сверхпроводящей системы, которые могут быть использованы для практической реализации транспортных магнитолевитационных систем.

### *Список литературы*

1. Aloisio A. et al. // J. Supercond. Nov. Magn. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2020. P. 399–407.
2. Chen Y. et al. // 2020 IEEE Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Devices, ASEMD 2020. 2020. P. 2020–2021.

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА ИСПАРЕНИЕ НАНОЖИДКОСТИ

Представлены результаты экспериментального исследования процесса массопереноса при поверхностном испарении наножидкости, состоящей из наночастиц диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) и воды, при температуре 313 К. Скорость испарения наножидкости при различных массовых (0,05 - 5) % концентрациях наночастиц измеряли в термоанализаторе без внешних воздействий (в замкнутой системе). Результаты исследований показали, что скорость испарения наножидкости при постоянной температуре подчиняется линейному закону. Наночастицы SiO<sub>2</sub> способны снижать скорость испарения базовой жидкости, но при промежуточных концентрациях наночастиц в воде скорость испарения увеличивается и не изменяется при более высоких концентрациях наночастиц.

A.N. PAYZULLAEV<sup>1</sup>, K.B. EGAMBERDIEV<sup>1,2</sup>, B.A. ALLAEV<sup>1</sup>, S.Z. MIRZAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>University of Geological Sciences, Tashkent, Uzbekistan

## EFFECT OF SILICON DIOXIDE PARTICLES ON NANOFUID EVAPORATION

The results of the experimental investigation of the mass transfer process during surface evaporation of nanofluid consisting of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and water at a temperature of 313 K are presented. The evaporation rate of nanofluids at different mass (0.05 - 5) % concentrations of nanoparticles was measured in a thermal analyzer without external influences (in a closed system). The results show that the evaporation rate of pure water and nanofluid at a constant temperature followed a linear law. SiO<sub>2</sub> nanoparticles are able to reduce the rate of evaporation of their base liquid, but at intermediate concentrations of nanoparticles in water, the rate of evaporation increases and does not change with higher concentrations of nanoparticles.

Добавление наночастиц существенно влияет на взаимодействие и столкновение между частицами и жидкостью [1]. Предполагается, что добавка наночастиц в жидкость будет влиять на испарение базовой жидкости. Наножидкости были получены при комнатной температуре, введением аморфных наночастиц SiO<sub>2</sub> размером 16 нм в деионизированной воде в ультразвуковом диспергаторе с мощностью 100 Вт, частотой 22 кГц и с продолжительностью воздействия 20 мин [2].

Испарение (потерю массы) исследуемого образца определяли на термоанализаторе STA PT1600 (Linseis) в автоматизированном приборе для концентраций с массовой долей наночастиц SiO<sub>2</sub> (0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 1, 3, 5)% и при постоянной температуре 313 К в течение 20 мин. Полученные результаты подчинялись уравнению  $m = m_0 - kt$ . Здесь  $m$  - масса наножидкости после испарения,  $m_0$  - масса в начале счета,  $k$  - скорость испарения. В этом исследовании скорость испарения  $k$  [мг/мин] была определена для каждой концентрации наночастиц.

Полученные результаты представлены на рис. 1.

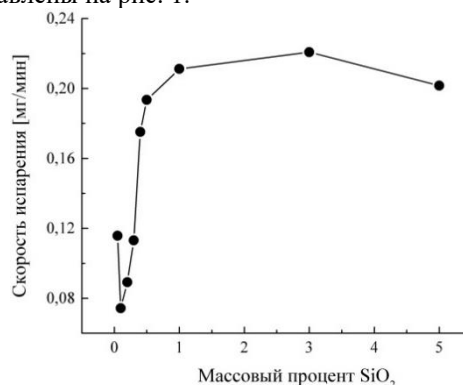


Рис. 1. Изменение скорости испарения в зависимости от массовой концентрации наночастиц SiO<sub>2</sub> в воде

Было определено, что скорость испарения стабилизировалась после 1% массовой концентрации наночастиц в воде. Поэтому важно выбрать наиболее оптимальную концентрацию наночастиц в воде для управления скоростью испарения воды с помощью наночастиц. Для объяснения механизмов физических процессов, приводящих к изменению скорости испарения воды под воздействием наночастиц, необходимо проведение дополнительных исследований на основе поверхностных свойств наночастиц и воды.

### Список литературы

1. Said Z. et al. // Physics Reports. 2022. V. 946. P. 1-94.
2. Akhatov J.S., Mirzaev S.Z. and others // App. Solar Energy. 2017, Vol. 53, P. 250-257.

Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.Х. РАБАДАНОВ,  
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, А.Э. РАБАДАНОВА  
*Дагестанский государственный университет ДГУ, Махачкала, Россия*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОБОБЩСТВЛЕННЫХ ЗАРЯДОВЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В YBCO И ЭФФЕКТ ИХ МГНОВЕННОЙ РЕЛАКСАЦИИ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИИ**

Показана определяющая роль эффекта ангармонизма колебаний атомов в формировании электросопротивления проводников, в том числе ВТСП, на примере YBCO. Представлен сценарий формирования обобществлённых зарядовых возбуждений в нем и возникновения эффекта их мгновенной реакции на внешнее воздействие. Рассмотрены вклады ангармонизма в равновесном и неравновесном состояниях системы поляризованных атомов и особенность потенциала их взаимодействия.

D.K. PALCHAEV, ZH.KH. MURLIEVA, M.KH. RABADANOV,  
S.KH. GADZHIMAGOMEDOV, A.E. RABADANOVA  
*Dagestan State University DGU, Makhachkala, Russia*

## **FORMATION OF GENERALIZED CHARGE EXCITATIONS IN YBCO AND THE EFFECT OF THEIR INSTANT RELAXATION IN THE SUPERCONDUCTING STATE**

The decisive role of the effect of anharmonicity of atomic vibrations in the formation of the electrical resistance of conductors, including HTSCs, is shown using YBCO as an example. A scenario is presented for the formation of socialized charge excitations in it and the appearance of the effect of their instantaneous reaction to external influences. The contributions of anharmonicity in the equilibrium and nonequilibrium states of a system of polarized atoms and the peculiarity of their interaction potential are considered.

Основная интрига явления проводимости и сверхпроводимости (СП) ВТСП связана с фактом отсутствия в них обобществленных, а потому «свободных», зарядовых возбуждений (ЗВ) как обычных проводниках. В связи с чем, возникает вопрос, обосновано ли ожидание такой свободы для ЗВ от ионов, тем более что она реально не может быть, в принципе. Более того, в классических металлах СП не наблюдается. Тогда как присутствие ковалентной связи между атомами, наряду с металлической связью, демонстрирует рост температуры перехода в СП состояние ( $T_c$ ) с возрастанием этой связи. Известно так же, что квантовый характер энергии обобществлённых ЗВ, обладающих собственным энергетическим спектром, наследуется от их энергетического спектра в атомах. При этом природа электрической связи самих атомов диктует необходимость определения потенциала их взаимодействия, в среднем по решетке, с учетом подвижности каждого из них. Т.е. модель, предусматривающая отклонение одного атома относительно другого (неподвижного) не отвечает истинной природе их взаимодействия. Реальность такова, что взаимодействие обеспечивается корреляцией ЗВ в соседних атомах. Очевидно, что каждый из этих атомов (осцилляторов) имеет возможность изменить свою координату относительно другого такого же осциллятора. При этом их полные энергии равны, а координаты минимума потенциала взаимодействия каждого из поляризованных атомов задают межатомное расстояние. Роль изменения этого расстояния в формировании структуры и свойств конденсированной среды трудно переоценить.

В настоящей работе на основе экспериментальных данных по температурным зависимостям электросопротивления и теплового расширения обосновывается определяющая роль объемных изменений в формировании электросопротивления проводников и их переходе в сверхпроводящее состояние.

Показано, что изменение кислородной стехиометрии YBCO, сопровождаемое переходом от диэлектрика к сверхпроводнику, приводит к обобществлению зарядовых возбуждений на поляризованных атомах, что обеспечивает зарядовое равновесие в системе и ее мгновенный отклик на внешнее воздействие ниже  $T_c$ . Все эти изменения связаны с особенностями изменения параметров элементарной ячейки этого соединения при изменении кислородной стехиометрии, вблизи  $T_c$  и ниже этой температуры соответственно.

Все эти сведения подтверждают критерии перехода материалов в СП состояние, установленные ранее [1], которые следуют непосредственно из связи атермического электросопротивления с коэффициентом теплового расширения. Они предсказывают, что колебания атомов в СП состоянии квазигармонические, что отвечает положениям теории БКШ. Суть критериев в том, что в сверхпроводящем состоянии изменение коэффициента теплового расширения при переходе из одного равновесного состояния в другое, практически, равно нулю. Это означает, что отклик системы на внешнее воздействие происходит с совершением работы без диссипации энергии, а, следовательно, без производства энтропии. Это, в свою очередь, обеспечивает мгновенный отклик (например, эффект Мейснера) на внешнее воздействие и отсутствие потерь энергии.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002

### *Список литературы*

1. Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева // Докл. Научной сессии НИЯМУ МИФИ-2010, т.3, с.63-66

А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА,  
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ  
*Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*

## КОРРЕЛЯЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО YBCO

Представлены сведения, указывающие на разрыв функции температурной зависимости объема и непрерывности ее производной по температуре при переходе ВТСП в сверхпроводящее состояние. Приведены результаты исследований электросопротивления и теплового расширения в направлениях *a*, *b* и *c* монодоменного образца YBCO, содержащего несколько сверхпроводящих фаз и продемонстрировано наличие корреляции аномалий температурных коэффициентов электросопротивления и теплового объемного расширения для каждой из фаз.

A.E. RABADANOVA, D.K. PALCHAEV, ZH.KH. MURLIEVA,  
S.KH. GADZHIMAGOMEDOV, M.KH. RABADANOV  
*Dagestan State University, Makhachkala, Russia*

## CORRELATION OF TEMPERATURE COEFFICIENTS OF ELECTRICAL RESISTANCE AND VOLUME EXPANSION OF MULTIPHASE SUPERCONDUCTING YBCO

Information is presented that indicates a discontinuity in the function of the temperature dependence of the volume and the continuity of its derivative with respect to temperature during the transition of the HTSC to the superconducting state. The results of studies of the electrical resistance and thermal expansion in the directions *a*, *b*, and *c* of a single-domain YBCO sample containing several superconducting phases are presented, and the presence of a correlation between anomalies in the temperature coefficients of electrical resistance and thermal volumetric expansion for each of the phases is demonstrated.

Высокая проводимость в соединении  $YBa_2Cu_3O_y$ , где  $6.4 \leq y \leq 7$ , связывается с изменением параметров решетки при увеличении заселенности атомами лабильного кислорода и их упорядочения в направлении *b*. Последнее является обычным требованием для достижения высоких значений температуры ( $T_c$ ) перехода в сверхпроводящее состояние. Т.е. обобщение зарядовых возбуждений (ЗВ) на этом интервале стехиометрии обусловлено не только содержанием кислорода, но и соответствующим порядком их расположения в решетке. Очевидно так же, что сверхпроводящий (СП) переход с изменением термодинамического состояния при данной температуре  $T_c$  и атмосферном давлении, должен сопровождаться какой-то особенностью характера изменения объема. Равенство нулю изменения энтропии при этом переходе свидетельствует, что рост объема в  $T_c$  происходит за счет уменьшения внутренней энергии несверхпроводящей фазы, обусловленного спариванием зарядовых возбуждений. В свою очередь, скачок объема указывает на резкое снижение волнового вектора Ферми для обобщенных ЗВ, что приводит к снижению уровня Ферми с образованием сверхпроводящей щели.

В настоящей работе приведена иллюстрация данных по изменению параметров решетки различных ВТСП, в том числе, для YBCO вблизи  $T_c$ . Это изменение представляется разрывом функции температурной зависимости объема и непрерывности ее производной по температуре. Такие аномалии наблюдаются не только для купратов [1-4], но и для бескислородных сверхпроводников [3-5]. Разность коэффициентов теплового расширения (КТР) YBCO в направлениях *b* и *a* демонстрирует критическое поведение [4] вблизи  $T_c$ . Для пниктидов с анизотропией в двух направлениях параметры терпят скачки с возрастанием *a* и снижением *c*, т.е. аномалии имеют противоположные направления. Все аномалии для ВТСП, связанные с изменением объема, указывают на прямую связь  $T_c$  с деформацией решетки.

Приведены результаты исследований электросопротивления и КТР монодоменного образца YBCO со сверхпроводящими фазами с различной кислородной стехиометрией в направлениях *a*, *b* и *c*. Показано наличие аномалий изменения температурных коэффициентов электросопротивления  $\alpha_r$  и теплового объемного расширения  $\alpha_v$ , при переходе каждой из фаз в сверхпроводящее состояние, в виде отклонений в сторону положительных и отрицательных значений относительно их нулевых значений с размахом и  $\pm 8 \text{ K}^{-1} \pm 8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  соответственно. Для каждой фазы вблизи температуры перехода прослеживается  $\alpha_v$  аномальное отклонение от нулевого значения в противоположных направлениях, как и для однофазного монокристалла [3]. Разность коэффициентов теплового расширения (КТР) YBCO в направлениях *b* и *a* демонстрирует критическое поведение вблизи  $T_c$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90170 и частично Гос. задания FZNZ-2020-0002.

### Список литературы

1. Srinivasan R. et al. // Physical Review B. 1988. Vol. 38. № 1. P. 889-892.
2. Schnelle W. et al. // Physica C: Superconductivity. 1990. Vol. 168. Issues 5–6. P. 465-474.
3. Meingast C. et al. // Physical review Letters. 1991. Vol. 67. № 12. P. 1634-1637.
4. Meingast C. et al. // Physical Review Letters. 2001. Vol. 86. № 8. P. 1606.
5. Hardy F., et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. C. 187004.

РАВИ КУМАР<sup>1,2</sup>, М.П. ТЕЛЕНКОВ<sup>1,2</sup>, Ю.А. МИТЯГИН<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МУЛЬТИЭКСИТОНОВ В КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ С ПРОДОЛЬНОМ ОГРАНИЧИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ

Рассчитаны энергетические спектры многочастичных экситонов в квантовых проволоках с продольным ограничивающим потенциалом, обеспечивающим энергию размерного квантования, сопоставимую с характерной энергией кулоновского взаимодействия носителей заряда. Обнаружено, что при возбуждении одного из носителей заряда энергия связи мультиэкситона уменьшается на величину в несколько раз большую, чем энергия размерного квантования.

RAVI KUMAR<sup>1,2</sup>, M.P. TELENKOV<sup>1,2</sup>, YU.A. MITYAGIN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

## ENERGY STRUCTURE OF MULTI-EXCITONS IN QUANTUM WIRES WITH LONGITUDINAL CONFINING POTENTIAL

Energy spectrum was calculated for multiparticle excitons in quantum wires with a longitudinally confined potential providing the size-quantization energy comparable to the characteristic energy of Coulomb interaction of the charge carriers. After exciting one of the charge carries, the binding energy of the multiexciton is ascertained to decrease by a factor of several times more than the energy of size-quantization.

Недавно была разработана технология роста новых квантово-размерных структур – квантовых проволок с градиентом состава вдоль оси роста, обеспечивающим продольный ограничивающий потенциал. [1]. Эти системы открывают многообещающие возможности для разработки однофотонных излучателей.

Особенность этих структур заключается в том, что медленно изменяющийся ограничивающий продольный потенциал приводит к достаточно малым энергиям размерного квантования, при этом обеспечивая достаточно сильную локализацию носителей так, что характерная энергия их кулоновского взаимодействия превышает межуровневое расстояние. Поэтому в таких структурах можно ожидать сильную когерентность носителей заряда, и, как следствие, существенную трансформацию энергетического спектра многочастичных комплексов вследствие кулоновского взаимодействия носителей. Кроме того, в этих структурах энергии размерного квантования тяжелых дырок близки к тепловой энергии кТ для гелиевых температур. Поэтому для оптических приложений достаточно важным является вопрос об изменении энергии связи экситонов при возбуждении дырок.

В данной работе выполнен расчет энергетических спектров многочастичных экситонных комплексов в таких структурах и выявлен ряд их особенностей, связанных с сильной корреляцией носителей заряда. Показано, что в таких структурах энергия обменного взаимодействия носителей заряда одного знака может существенно превышать энергию их электростатического отталкивания, что приводит к понижению энергии системы. Обнаружено, что при переходе одного из носителей заряда на возбужденный уровень существенно падает энергия связи мультиэкситона – на величину в несколько раз превышающую энергию размерного квантования. Проведено сопоставление рассчитанных значений энергии связи экситона с экспериментально измеренными. Получено хорошее количественное согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными.

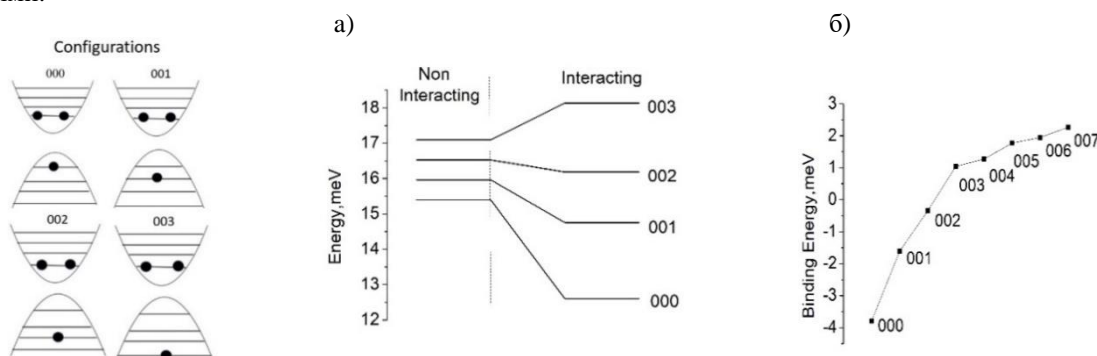


Рис. 1. Уровни энергии (а) и энергия связи (б) триона, состоящего из двух электронов и тяжелой дырки, в квантовой проволоке  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  длиной 275 нм и радиусом 10 нм с параболическим изменением концентрации Al от минимального значения  $x_{\min}=0.2$  в центре проволоки до максимального значения  $x_{\max}=0.4$  на ее концах. Показаны уровни энергии и значения энергии связи для конфигураций "00n", в которых оба электрона находятся на основном (0-ом), а дырка на n-ом уровне энергии.

Список литературы

1. Lazarev M, Szeszko J, Rudra A, Karlsson K.F, Kapon E. // Journal of crystal growth. 2015. Vol. 414, P. 196.

Г.Т. РАХМАНОВ

Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССОЦИАТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ КОКАИНА НЕСТАЦИОНАРНЫМИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ

Адсорбция и поверхностная ионизация молекул кокаина  $C_{17}H_{21}NO_4$  с  $m/z$  303 на поверхности окисленного вольфрама исследована нестационарными методами модуляции напряжения и модуляции потока в единых условиях эксперимента с помощью высоковакуумной масс-спектрометрической установки с использованием «черной камеры» все стенки которой охлаждаются жидким азотом. Определены константы скоростей  $K^d$  и энергия активации  $E^d$  реакции диссоциации предварительно адсорбированных молекул морфина с разрывом связи  $(C - C_1)_\beta$  с образованием ионизирующихся радикалов путём поверхностной ионизации. Определены константы скоростей  $K^0$  и энергии активации термодесорбции  $E^0$ , а также предэкспоненциальные множители в уравнении непрерывности для радикалов  $C_{12}H_8ON^+$  с  $m/z$  182 при адсорбции молекул кокаина  $C_{17}H_{21}NO_4$  с  $m/z$  303 на поверхности.  $W_x O_y$

G.T. RAKHMANOV

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

## INVESTIGATION OF DISSOCIATION SURFACE IONIZATION OF MOLECUL COCAINE BY NONSTATIONARY METHODS SURFACE IONIZATION

The adsorption and surface ionization of cocaine molecules  $C_{17}H_{21}NO_4$  (with  $m/z=303$ ) on the surface of oxidized tungsten have been studied by a non-stationary method of voltage modulation under the same experimental conditions with a high-vacuum mass-spectrometric setup using a "black chamber" all walls of which are cooled with liquid nitrogen. For the codeine molecule dissociation with the  $(C - C_1)_\beta$  bond breaking and formation of ionizable radicals, the rate constants, the activation energy  $E^+$  and  $E^0$  of thermodesorption and the pre-exponential factors in the continuity equation for the radicals  $C_9H_7N^+CH_3$  (with  $m/z182$ ) have been defined by surface ionization on the surface of oxidized tungsten  $W_x O_y$ . The results of determining the surface ionization coefficient and estimates of the ionization potentials of these radicals have been presented.

Развития областей науки и техники, таких как нано технология и гетерогенный катализ, микроэлектроника, и материаловедение и других, требуются детальное сведения о гетерогенных процессах на атомных и молекулярных уровнях. Нестационарные процессы поверхностной ионизации (ПВИ) позволяют определить кинетические характеристики термодесорбции (среднее времена жизни адсорбированных частиц по отношению их десорбции как в заряженном, так и в нейтральном состояниях, энергии активации десорбции и энтропийные множители в уравнениях десорбции) и гетерогенные реакции диссоциации на поверхности (константы гетерогенной реакции диссоциации, характеристические времена реакции), которые позволяют глубже понимать процесс взаимодействия частиц с поверхностью твердого тела.

В настоящей работе исследована диссоциативная ПВИ молекул кокаина на поверхности окисленного вольфрама. Для этих рассматриваемых органических молекул до сих пор не определены константы скоростей и энергии активации термодесорбции, а также характеристические времена гетерогенной реакции диссоциации на поверхности. По полученным данным в методах модуляции напряжения и потока были построены зависимости Аррениуса  $\lg[K_i(T)\beta(T)] = f(1/T)$  и  $\lg[K_i(T)(1 - \beta(T))] = f(1/T)$ . По этим зависимостям были определены константы скорости термодесорбции в заряженном  $K^+ = C \exp(-E^+/kT)$ , нейтральном состояниях  $K^0 = D \exp(-E^0/kT)$ , а также константа скорости гетерогенной реакции диссоциации  $K^d = G \exp(-E^d/kT)$  для радикалов. По рассмотрению [1] полученные результаты в ММП (рисунок 3) мы отнесли к характеристикам гетерогенной реакции диссоциации молекул кокаина, определили энергию активации гетерогенной реакции диссоциации  $E^d$  и энтропийный множитель  $G$ . Полученные результаты приведены в следующем виде:

$$K_{174}^+ = \frac{1}{\tau_{ММН}} = 10^{(12,1 \mp 1,0)} \exp \left[ -\frac{1,75 eV}{kT} \right]; \quad K^d = \frac{1}{\tau^d} = 10^{(10,8 \mp 1,0)} \exp \left[ -\frac{1,35 eV}{kT} \right].$$
$$K_{174}^0 = \frac{1}{\tau_{ММН}} = 10^{(13,1 \pm 1,0)} \exp \left[ -\frac{1,93 eV}{kT} \right]$$

### Список литературы

1. Г.Т. Рахманов, Д.Т. Усманов. Исследование диссоциативной поверхностной ионизации молекул тебаина нестационарными методами поверхностной ионизации // Письма в ЖТФ, 2022, том 48, вып. 20, С.27-30.

Ю.И. РУКИНА<sup>1,2</sup>, М.Ю. НАГЕЛЬ<sup>1</sup>, О.И. ОБРЕЗКОВ<sup>1</sup>, Ю.В. МАРТЫНЕНКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЯ КАРДИОЭЛЕКТРОДА ПО ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Изучены процессы формирования двойного электрического слоя (ДЭС) у катода электрокардиостимулятора, установлены зависимости эффективной площади и толщины слоя ДЭС от длительности импульса. Получены оценки площади электродов с покрытиями, полученными плазменными методами, с помощью электрофизических измерений и прямыми методами.

Y.I. RUKINA<sup>1,2</sup>, M.Y. NAGEL<sup>1</sup>, O.I. OBREZKOV<sup>1</sup>, Y.V. MARTYNYENKO<sup>1,2</sup>

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## DETERMINATION OF THE EFFECTIVE AREA OF A DEVELOPED CARDIO ELECTRODE COATING SURFACE BY ITS ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The processes of double electric layer formation have been studied, the dependences of the effective area and thickness of the DEL on the pulse duration have been established. Estimates of the area of electrodes with coatings deposited by plasma methods, using electrophysical measurements and direct methods have been obtained.

Эффективная площадь электродов кардиостимуляторов является одним из важнейших параметров детали, так как для выполнения электрических требований, предъявляемых к электродам кардиостимуляторов, необходима большая ёмкость покрытий, зависящая от свойств поверхности [1, 2]. Для достижения данного параметра создают развитые поверхности электродов электрокардиостимулятора (ЭКС) путём выбора оптимальных параметров плазменного осаждения и подбора материала.

Для получения покрытий кардиостимуляторов используются методы химического осаждения из паровой фазы, плазменного осаждения, ионной имплантации и др. Покрытия должны отличаться развитостью [3] и адгезионной стойкостью. В данной работе исследованы образцы с покрытиями, полученными с помощью вакуумно-дугового испарения.

Для определения эффективной площади электродов существуют адсорбционные, физические и электрохимические методы. В работе показано, что эффективную площадь поверхности можно определить по электрическим характеристикам катода при подаче на него импульса отрицательного напряжения в цепи с физраствором (0,9 % NaCl), имитирующем межклеточную жидкость [4]. Это позволяет по экспериментальным данным определять характеристики катода, в частности ёмкость его двойного электрического слоя (ДЭС) у катода, и, соответственно, эффективную площадь поверхности катода. Сравнение геометрической и рассчитанной площади позволяет определить, на сколько развита поверхность покрытия. Подавая импульсы разной амплитуды и длительности, можно изучать процессы в ДЭС.

Для сравнения проведены прямые (РЭМ) измерения эффективной площади развитой поверхности электродов.

Изучение электрофизических характеристик позволяет полнее описать процессы, протекающие в приэлектродной области ЭКС, составить метод проверки электродов ЭКС, дающий более развёрнутую информацию о характеристиках, важных для эффективной работы ЭКС, не обозначенных в действующем ГОСТ.

### Список литературы

1. Шальдах М. Электрокардиотерапия - СПб. -Изд. «Северо-Запад». -1992. -256 с.
2. Specht H.// Proceedings of the Materials and Processes for Medical Devices Conference 2006, P. 169-173
3. Norlin A., Pan J., Leygraf C.// Biomolecular Engineering 2002, P. 67-71
4. Обрезков О.И., Базылев В.А., Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю. //Медицинская техника 2022 г. №1. - С. 33-36.



## ВЛИЯНИЕ БАЗИСА РЕШЕТКИ ДЕФЕКТОВ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК ВТСП В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Выполнены расчеты Монте-Карло магнитных и транспортных характеристик сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  во внешнем магнитном поле. Получены вольт-амперные характеристики и петли перемагничивания образцов с дефектами, распределенными в треугольной и квадратной решетках с различными базисами. Определены зависимости критической плотности тока рассмотренных образцов от внешнего магнитного поля при температуре 30 К. Изучено влияние формы базиса и типа решетки на транспортные свойства и вихревую систему образцов. Выполнено сравнение величин критической плотности тока, получаемых из транспортных и магнитных расчетов.

K.N. RYKUN, A.N. MOROZ, A.N. MAKSIMOVA, I.A. RUDNEV, V.A. KASHURNIKOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INFLUENCE OF THE DEFECT LATTICE BASIS ON THE CRITICAL CURRENT OF A HTS IN A MAGNETIC FIELD

Monte Carlo calculations of the magnetic and transport characteristics of the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconductor in an external magnetic field have been performed. Current–voltage characteristics and magnetization reversal loops have been obtained for samples with defects distributed in triangular and square lattices with different bases. The dependences of critical current density of the considered samples on the external magnetic field at a temperature of 30 K have been determined. The influence of the basis shape and lattice type on the transport properties and the vortex system of the samples have been studied. The values of the critical current density obtained from transport and magnetic calculations have been compared.

Количество потенциальных применений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) увеличивается с каждым годом: сегодня ВТСП предполагается использовать в магнитолевитационном транспорте, квантовых компьютерах, магнитных ячейках памяти и т. д. Для большинства применений важнейшую роль играет пиннинг — закрепление вихрей Абрикосова на, как правило, искусственных дефектах сверхпроводника, характеризуемых различными параметрами: тип, размеры, концентрация и способ распределения по образцу. Данные факторы определяют такие параметры ВТСП, как критический ток и намагниченность, поэтому необходимо исследовать их влияние на пиннинг вихрей. Наиболее удобным инструментом для этого является численное моделирование.

В настоящей работе проведено исследование эффективности различных типов распределения дефектов в ВТСП для улучшения критической плотности тока сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO). Для этого при помощи метода Монте-Карло, разработанного авторами [1], были рассчитаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов YBCO, содержащих примерно одинаковое количество точечных дефектов концентрацией  $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , распределенных по ВТСП в виде базисов из окружностей (circles) или полуокружностей (scales), наложенных на треугольную (tr), квадратную (sq) или кагоме решетку. Расчеты были выполнены для сверхпроводника во внешнем магнитном поле от -5 кЭ до 5 кЭ при температуре 30 К. Из рассчитанных серий ВАХ были получены зависимости критической плотности тока  $j_c$  от величины магнитного поля  $H$ , на которых были обнаружены особенности в виде пиков в полях выше 2.5 кЭ (рис. 1). Анализ вихревых конфигураций в различных точках зависимостей показал, что пики были вызваны последовательным заполнением вихрями окружностей из дефектов. Дополнительный анализ вихревой системы в рассмотренных дефектных структурах был выполнен по рассчитанным петлям перемагничивания тех же образцов, из которых были также извлечены зависимости  $j_c(H)$ .

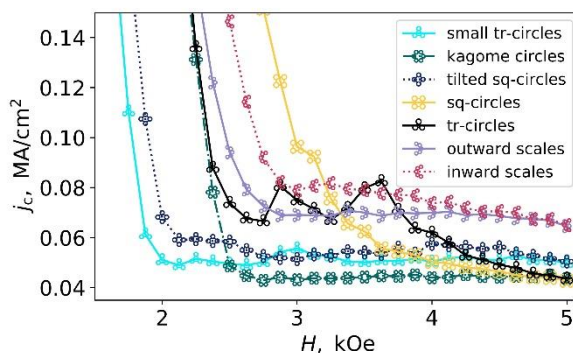


Рис. 1. Зависимости критической плотности тока ВТСП с различными конфигурациями дефектов от магнитного поля.

Исследование выполнено при поддержке программы НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Moroz A.N., Kashurnikov V.A., Rudnev I.A., Maksimova A.N. // J. Phys. Cond. Mat. 2021. Vol. 33, № 14. P. 145902.

А.В. РЯБОВА<sup>1,2</sup>, Д.В. ПОМИНОВА<sup>1,2</sup>, И.В. МАРКОВА<sup>2</sup>, И.Д. РОМАНИШКИН<sup>1</sup>,  
Р.В. ШТАЙНЕР<sup>2</sup>, В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

Проведено теоретическое моделирование локального усиления ЭМ поля и нагрева при лазерном воздействии на одиночные наночастицы (НЧ) оксида железа и ансамбли НЧ с различными размерами магнитного ядра и различным содержанием в них оксида железа. Для экспериментального определения температуры водных коллоидов НЧ мы использовали флуоресцентную термометрию, основанную на времени жизни флуоресценции родамина С (RhB).

A. V. RYABOVA<sup>1,2</sup>, D. V. POMINOVA<sup>1,2</sup>, I. V. MARKOVA<sup>2</sup>, I. D. ROMANISHKIN<sup>1</sup>,  
R. V. STEINER<sup>2</sup>, V. B. LOSCHENOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National research nuclear university MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MODELLING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE IRON OXIDE NANOPARTICLES HEATING UNDER LASER RADIATION

We have carried out theoretical modeling of local EM field enhancement and heating under the laser action on single iron oxide nanoparticles (IONPs) and ensembles of IONPs with different sizes of the magnetic core and different iron oxide content in them. We used fluorescence thermometry based on the rhodamine B (RhB) fluorescence lifetime to experimentally determine the temperature of aqueous NP colloids.

Локальное определение температуры НЧ оксида железа лазерном нагреве важно в аспекте лазерной фототерапии [1]. Фототермическая конверсия неметаллических неорганических НЧ показывает умеренную эффективность и более широкое оптическое поглощение, чем металлические аналоги [2].

Для моделирования «горячих точек» и теплового отклика всего образца использовали метод конечных элементов, в частности его реализация в COMSOL Multiphysics. Исследовали НЧ в виде сфер, кубов разного размера, сферических кластеров, палочек, октапедов, дендритных НЧ. Рассматривали ансамбли НЧ из 25 НЧ радиусом 20 нм, расположенных на расстоянии 20 нм друг от друга. Рассмотрены оксиды железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, в качестве контроля использовали НЧ золота.

Для экспериментального измерения температуры при лазерном нагреве использовали методику регистрации времени жизни флуоресценции RhB [3]. Нагрев НЧ исследовался в диапазоне плотностей мощности возбуждающего лазера от 0,30 до 1,80 МВт/см<sup>2</sup>.

Показано, что локальный нагрев НЧ в ансамбле достигает достаточно высоких значений, относительное изменение температуры составляло около 40°C для НЧ золота и 35°C для НЧ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в качестве среды рассматривался воздух. В результате вблизи НЧ могут возникать так называемые «горячие точки».

В воде усиление ЭМ поля и его распределение вблизи поверхности НЧ практически не меняются; отношение E/E<sub>0</sub> в воде составило 11, 5.0 и 3.8 для ансамблей НЧ золота, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> соответственно. Относительное изменение температуры воды составило около 2°C для НЧ золота и 0,5°C для НЧ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

При помещении НЧ в среду с более высокой теплопроводностью (теплопроводность воды 0,6 Вт/м·К, теплопроводность воздуха 0,022 Вт/м·К) происходит эффективный теплообмен со средой, и температура нагрева ансамбля не достигает высоких значений. Практически все коллоиды исследованных НЧ показали незначительный нагрев окружающей водной среды не более чем на 15°C, что было установлено по времени жизни флуоресценции RhB.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 21-52-12030 ННИО\_а.

### Список литературы

1. S. K. Sharma, N. Shrivastava, F. Rossi and others // Nano Today. 2019. Vol. 29. P. 100795.
2. C. Lozano-Pedraza, E. Plaza-Mayoral, A. Espinosa and others // Nanoscale Adv. 2021 Vol.3(22). P. 6490–6502.
3. R. Mercadé-Prieto, L. Rodriguez-Rivera, X. D. Chen // Photochemical & photobiological sciences. 2017. Vol.16(11). P.1727–1734.

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ $\text{CoSi}_2$ СФОРМИРОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ Si

В данной работе были получены наноразмерные фазы  $\text{CoSi}_2$  на различных глубинах Si и созданы двухслойные эпитаксиальные наноразмерные гетеропленки типа  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  путем имплантации ионов  $\text{Co}^+$  в Si.

A.S. SAIDRAKHMANOVA, Y.S. ERGASHOV

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

## THE ELECTRONIC STRUCTURE OF $\text{CoSi}_2$ NANOSCALE PHASES IS FORMED AT DIFFERENT Si DEPTHS

In this work, nanosized  $\text{CoSi}_2$  phases were obtained at various depths of Si, which are also created by two-layer epitaxial nanosized heterofilms of the  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  type, implantation of  $\text{Co}^+$  ions in Si.

Наноразмерные структуры  $\text{CoSi}_2$  в различных слоях в приповерхностной области Si были получены имплантацией ионов Co с вариацией энергии ионов в пределах от 0,5 до 40 кэВ, а их дозы в пределах  $D=5 \cdot 10^{13} \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в сочетании с отжигом. На рис.1 приведены изменения интенсивности Оже-пика Co ( $E=765\text{эВ}$ ) по глубине  $h$  Si(111), легированного ионами  $\text{Co}^+$  с энергией  $E_0=15 \text{ кэВ}$  с  $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$  до и после прогрева при температуре  $T \approx 900 \text{ К}$  в течение 30 мин. В обоих случаях максимум распределения атомов Co располагается на глубине 15~16 нм. После прогрева наблюдается увеличение концентрации атомов в области максимума и существенное уменьшение полуширины кривой распределения  $I_{\text{Co}}(h)$ . В этих участках (на глубине 15~16 нм) образовались нанокристаллические фазы  $\text{CoSi}_2$ . Из энергетических соображений можно полагать, что эти фазы в отличие от поверхностных фаз, имеют сферическую форму [1; С. 31 — 36]. Средний диаметр нанокристаллических фаз  $\text{CoSi}_2$ , который оценен нами по ширине кривой  $I_{\text{Co}}(h)$ , оставляет  $d \approx 10\text{-}12 \text{ нм}$ .

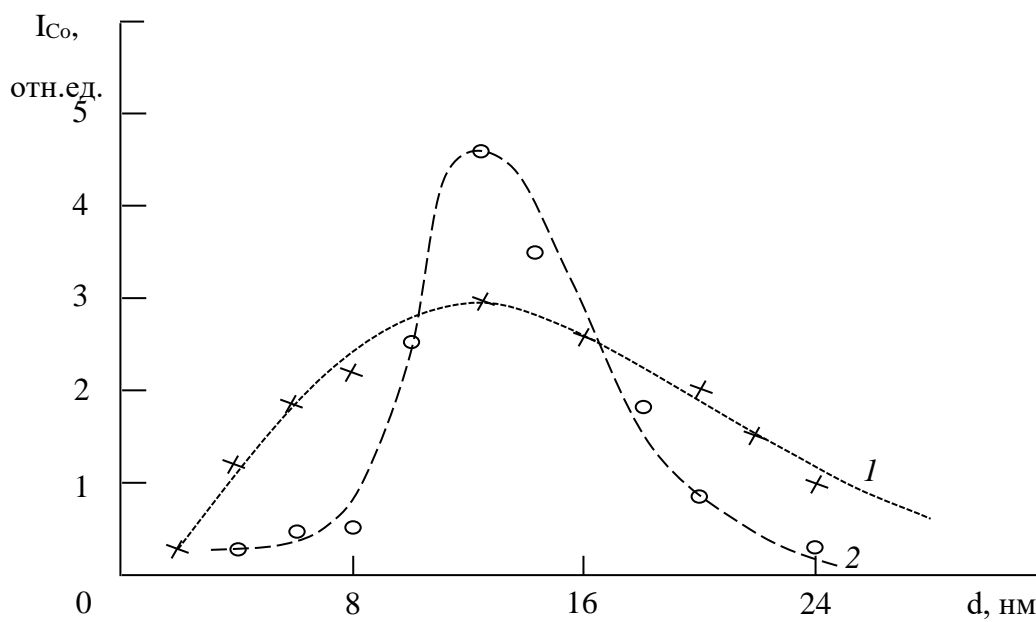


Рис.1. Профили распределения атомов Co по глубине  $h$  Si, имплантированного ионами  $\text{Co}^+$  с  $E_0 = 15 \text{ кэВ}$  при  $D = 10^{15} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$ , 1 – до прогрева, 2 – после прогрева при  $T = 900 \text{ К}$ .

Необходимо отметить, что для получения нанокристаллических фаз в различных глубинах матрицы методом ионной имплантации имеются определенные ограничения: регулярно расположенные нанокристаллические фазы  $\text{CoSi}_2$  образуются только в центральной области (~1/3 часть) ионно-имплантированной области Si; при высоких дозах ( $D \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) диаметры фаз увеличиваются до 25~30 нм, следовательно, границы фаз, созданных различными энергиями, могут перекрываться друг с другом.

### Список литературы

1. Михайлов А.Н., Гусейнов Д.В., Белов А.И. и др. Ионно-лучевая инженерия наноматериалов на основе кремния. // Труды XXI межд. конф. ВИП-2013. Т.2. С. 31 – 36.

И.Г. СЕРГИЕНКО, С.Д. ЛЕЩИК, А.А. КАЗЬМИН

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗРЯДА НА РАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ**

Представлены результаты исследования методом АСМ-микроскопии морфологии и профиля синтезированных наночастиц Ni-Cr сплава и биметалла Cu-Ag. Показано, что морфологическое разнообразие наночастиц Ni-Cr сплава несколько большее, чем наночастиц биметалла Cu-Ag. Профиль размерного распределения наночастиц Ni-Cr сплава значительно сильнее зависит от вкладываемой в электровзрывной разряд энергии, чем профиль размерного распределения наночастиц биметалла Cu-Ag.

I.H. SERHIYENKA, S.D. LESCHIK, A.A. KAZMIN

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus*

## **INFLUENCE OF THE ELECTRICAL EXPLOSIVE DISCHARGE PARAMETERS ON THE DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF THE SYNTHETIZED NANOPARTICLES**

The results of an AFM study of the morphology and profile of the synthesized Ni-Cr alloy and Cu-Ag. bimetal nanoparticles are presented. It is shown that the morphological diversity of Ni-Cr alloy nanoparticles is somewhat greater than that of Cu-Ag. bimetal nanostructures. The size distribution profile of Ni-Cr alloy nanoparticles depends much more strongly on the energy deposited in the electroexplosive discharge than the size distribution profile of Cu-Ag bimetal nanoparticles.

Наночастицы меди, никеля, их сплавов и композитов широко применяются в различных областях науки и техники [1]. Они используются при создании солнечных и аккумуляторных батарей, сверхпроводящих материалов, композиционных материалов, модификаторов материалов и технологических жидкостей [2]. Свойства этих наноструктур основываются электропроводных и теплопроводных свойствах исходных макроматериалов. В этой связи исследование свойств наночастиц и методов их получения являются актуальными задачами.

Высокоэффективными методами получения наночастиц являются плазменные методы или диспергационно-конденсационные методы. Вначале происходит дробление макрообразца, превращение его в плазму. На второй стадии, на стадии рекомбинации плазмы - синтез наноструктур. К этим методам относится импульсная лазерная абляция материалов в жидкости, электрический взрыв проводников и электровзрывной разряд в жидкости [3].

Синтез наноразмерных материалов проводился на установке, аналогичной описанной в [4]. В ее основе лежат подходы, использованные при создании систем возбуждения эксимерных лазеров и ламп [5-6]. Расчет электрофизических параметров установки осуществлялся по методике [7]. Диспергированию подвергались образцы Ni-Cr сплава диаметром 0,6 мм и длиной 80 мм и биметалла Cu-Ag в дистиллированной воде. Биметалл - медный проводник длиной 80 мм и диаметром 0,4 мм в оболочке из серебра толщиной 0,05 мм.

В результате диспергирования биметалла Cu-Ag и Ni-Cr сплава получены наносuspensions серо-медного и черного цвета со значительно сниженным светопропусканием по сравнению с чистой дистиллированной водой.

АСМ-микроскопия осажденных наночастиц и их конгломератов из полученных наносuspensions на предметные стёкла показала, что наноструктуры распределены по поверхности предметных стёкл хаотично и не выявляют закономерностей в группировании и расположении. Основное количество наночастиц биметалла Cu-Ag находится в размерном диапазоне 20 - 60 нм. Механизм образования конгломератов требует дополнительных исследований. Они могли образоваться как в самой наносuspension, так и при осаждении наночастиц на предметные стёкла. Обращает внимание наличие большого числа овальных структур на АСМ изображениях.

АСМ-изображения наночастиц Ni-Cr сплава показывают, что они имеют как правильную, так и неправильную форму (угловатые, пирамидальные). Основное их количество расположено в размерном диапазоне 40 - 100 нм. На фоне рассеянных мелких наночастиц наблюдаются крупных субмикронные частицы.

Таким образом, наночастицы Ni-Cr сплава имеют большую размерность и большее отклонение от сферичности, чем наночастицы биметалла Cu-Ag. Профиль размерного распределения наночастиц Ni-Cr сплава зависит от вкладываемой в электровзрывной разряд энергии и с ее ростом сдвигается в сторону больших их значений. Размерное распределение наночастиц биметалла Cu-Ag не имеет явно выраженной зависимости от вкладываемой энергии. Изменение величины энергии, вкладываемой в электровзрывной разряд, не оказывает существенного влияния на морфологию синтезированных наночастиц в обоих случаях.

### *Список литературы*

1. Ремпель А.А. // Успехи химии. 2007. Т. 76, № 5. С. 474–500.
2. Гончарова Д.А., Лапин И.Н., Савельев Е.С., Светличный В.А. // Известия ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 7. С. 99-106.
3. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673–718.
4. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка. 2018. Т.8, № 1. С. 50-61.
5. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // **Journal of Optical Technology**. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка. 2019. Т.9, № 2. С. 81–91
7. Volodenkov A., Anufrik S., Znosko K. // High Temperature Material Processes. 2017. Vol. 21, No 4. P. 377–390.

А. СОЛОВЬЕВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СТРУКТУРЕ MOSIC В ПАКЕТЕ COMSOL MULTIPHYSICS 5.2.

Рассмотрена возможная модель возникновения фоновой ЭДС неэлектрической природы в структуре MOSIC. Величина разности потенциалов между противоположными гранями ( $WO_3$  — Pt(Ni)) в сенсоре водорода  $WO_3/SiC/Pt(Ni)$  при амперометрическом режиме работы в водородо-воздушной среде достигает 500  $\mu V$ . В отсутствие  $H_2$  эта величина достигает 40  $\mu V$ . Возможной причиной данного явления является эффект Зеебека, возникающий вследствие градиента температур между плоскостями сенсора.

A. SOLOVEV, V.Y. FOMINSKI

B. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELDS IN THE MOSIC STRUCTURE IN THE COMSOL MULTIPHYSICS PACKAGE 5.2.

A possible model for the occurrence of a background EMF of a non-electrical nature in the MOSIC structure is considered. The potential difference between opposite faces ( $WO_3$  – Pt(Ni)) in the  $WO_3/SiC/Pt(Ni)$  hydrogen sensor in the amperometric mode of operation in a hydrogen-air medium reaches 500  $\mu V$ . In the absence of  $H_2$ , this value reaches 40  $\mu V$ . A possible reason for this phenomenon is the Seebeck effect which occurs as a result of the temperature gradient between the sensor planes.

Активное развитие водородной энергетики требует поиска новых способов детектирования  $H_2$ . В работе рассматривается способ детектирования водорода в амперометрическом режиме, т.е. без внешнего источника питания, на базе структуры  $WO_3/SiC/Pt(Ni)$ . Взаимодействие  $H_2$  с каталитически активной поверхностью ( $WO_3$ ) приводит к увеличению разности потенциалов между противоположными гранями сенсора ( $WO_3$  и Pt(Ni)), что в свою очередь приводит к возникновению ЭДС неэлектрической природы. Однако в отсутствие  $H_2$  наблюдается фоновая ЭДС, величина которой варьируется в диапазоне 5-40  $\mu V$ .

Одним из возможных механизмов возникновения фоновой ЭДС может быть эффект Зеебека. По условиям эксперимента тыловая плоскость SiC с напыленным Pt(Ni) покрытием, формирующим омический контакт, имеет постоянную температуру в диапазоне 22÷350 $^{\circ}C$ . Данная температура поддерживается нагревателем. Плоскость с напыленным каталитически активным  $WO_x$ , подвержена свободному конвекционному охлаждению воздушно-водородной смеси, коэффициент которого составляет ~15 Вт/м $^2$  К. Также охлаждение происходит вследствие излучения поверхности в зависимости от её степени черноты. Воздействие водорода на температурное поле образца MOSiC пренебрежимо мало. На основании этих данных была смоделирована термодинамическая модель в пакете COMSOL Multiphysics 5.2. (Heat Transfer in Solids module). В используемой модели поверхность подложки SiC была покрыта тонкой пленкой  $WO_3$ . В качестве зонда использовался графитовый электрод, который находился в непосредственном контакте с поверхностью  $WO_x$ . На рис.1 представлен трехмерный график температурных полей в структуре  $WO_3/SiC$ . Видно, что в принятых предположениях градиент температуры между внешней и задней поверхностями пластины SiC в области контакта графит —  $WO_3$  может составлять ~ 0,1 градуса. Наиболее «холодной» областью является место контакта между углеродным зондом и покрытием  $WO_3$ , что обусловлено более высоким коэффициентом теплопроводности углеродного зонда по сравнению с пленкой.

Градиент температуры приводит к возникновению разности потенциалов напряжения вследствие эффекта Зеебека. Для монокристаллического 4H-SiC при температуре ~ 350  $^{\circ}C$  коэффициент Зеебека может достигать -320  $\mu V/K$ . Это указывает на то, что для экспериментальных условий максимальная термоэлектрическая ЭДС может составлять ~30  $\mu V$ . Эта величина в значительной степени коррелирует с величиной фоновой разности потенциалов в отсутствие  $H_2$ .

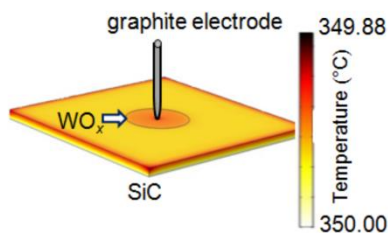


Рис.1 Распределение температурного поля в структуре  $WO_3/SiC$ , температура тыловой плоскости которого составляет 350  $^{\circ}C$ .

В.Г. СРЕДИН<sup>1</sup>, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ<sup>2</sup>, А.П. МЕЛЕХОВ<sup>3</sup>, Р.Ш. РАМАКОТИ<sup>3</sup>,  
С.М.ДЗЯДУХ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МДП СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Приводятся результаты исследования ВФХ МДП структур на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , подвергнутых действию мягкого рентгеновского излучения. Предлагается модель генерации поверхностных дефектов излучением.

V.G. SREDIN<sup>1</sup>, A.V. VOITSEKHOVSKI<sup>2</sup>, A.P. MELEHOV<sup>3</sup>, R.S. RAMAKOTI<sup>3</sup>, S.M. DZYADUKH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military Academy of the Strategic Missile Forces Peter the Great, Balashikha, Russia

<sup>2</sup>National State Research University Tomsk, Russia

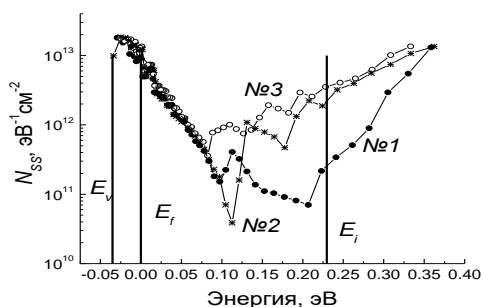
<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## THE MECHANISM OF DEFECT FORMATION IN MOS STRUCTURES BASED ON $Cd_xHg_{1-x}Te$ UNDER THE ACTION OF SOFT X-RAY RADIATION OF LASER PLASMA

The results of a study of  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -based structures exposed to soft X-ray radiation are presented. A model of generation of surface defects in these structures by radiation is proposed.

Процесс дефектообразования в полупроводниках под действием рентгеновского излучения связывают с распадом электронных возмущений, вызванных поглощением рентгеновских квантов [1,2]. Энергии кванта мягкого рентгеновского излучения (0,4 – 10 кэВ) достаточно для возбуждения электронов L, M, N оболочек ионного остова кристаллов полупроводников. При этом мягкое рентгеновское излучение (МРИ) поглощается атомами, расположенными как в узлах кристаллической решетки, так и в междоузлиях, в результате чего может произойти генерация различных типов точечных дефектов кристаллической решетки.

В настоящей работе проведено исследование влияния МРИ, генерируемого лазерной вакуумной искрой, на спектр поверхностных состояний в МДП структурах, сформированных на основе полупроводниковых твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с составами  $0.23 \leq x \leq 0.3$ , в качестве диэлектрика использовался  $Al_2O_3$ , осажденный низкотемпературным плазменным методом атомарно-слоевого нанесения на поверхность кристалла [3]. На полученных таким образом МДП-структурах в интервале температур 9-77К были проведены исследования адмиттанса.



На рисунке представлены спектры плотности быстрых поверхностных состояний, полученных в МДП структуре на основе  $Cd_{0.23}Hg_{0.77}Te$  при  $T=77K$ , номера кривых соответствуют дозам облучения в порядке ее роста. Полученные результаты показывают, что воздействие МРИ к изменению плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела, к некоторому увеличению концентрации основных носителей заряда (около 2 раз). При определенных режимах облучения наблюдается значительное (в 4-15 раз) уменьшение значений  $R_{опзА}$  при температурах 9-30 К. Возможной причиной изменения перечисленных

параметров МДП-структур является перестройка примесно-дефектной системы границы раздела диэлектрик-полупроводник и приповерхностного слоя полупроводника. Сопоставление с результатами, полученными нами на других образцах показывает, что характер перестройки примесно-дефектной системы в значительной степени определяется режимом воздействия мягкого рентгеновского излучения и исходной дефектностью структуры. В частности, известно, что кристаллы со структурой сфалерита являются полярными, вследствие чего некоторые свойства их поверхности зависят от ее кристаллографической ориентации. В [4,5] показано, что эффекты, обусловленные полярностью, наблюдаются и в твердых растворах  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . Это обстоятельство следует учитывать при анализе процессов поверхностного дефектообразования в исследуемых МДП структурах.

### Список литературы

1. Вавилов В. С. // УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407.
2. Клиnger М.И., Лущик Ч.Б., Машовец Т.В. и др. // УФН. Т.147. № 3. С.523-558.
3. Zhang P. et al. // Journal of Electronic Materials. 2016. V. 45. No.9. P. 4716-4720.
4. Sredin V.G., Lanskaya O.G., Popovnin V.M. // Semiconductors. 1996. Т. 30. № 3. С. 215-216.
5. Средин В.Г., Мезин Ю.С., Укроженко В.М. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т.35. №11. С.1335-1337.

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКА ПРЕКУРСОРА YAG НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ

В работе приведены результаты эксперимента по изучению влияния дисперсного состава порошка прекурсора YAG на оптические свойства керамики. В ходе исследования синтезировали порошок-прекурсор YAG капельным методом, и далее измельчили на планетарной мельнице при различных массовых соотношениях порошка и размольных тел. Из керамических порошков были изготовлены образцы оптической керамики. Данные результаты могут быть использованы в фотонике для получения лазерной керамики.

V.E. SUPRUNCHUK, L. V. TARALA, E.A. BRAZHKO, V.P. TISHCHENKO  
North-Caucasus Federal University, NCFU, Stavropol, Russia

## EFFECT OF THE DISPERSION COMPOSITION OF YAG PRECURSOR POWDER ON THE OPTICAL PROPERTIES OF CERAMICS

The article presents the results of an experiment on the effect of YAG precursor powder disaggregation mode on the optical properties of the finished ceramic. In the course of the study, the YAG precursor powder was synthesized by the drop method and disaggregated using a planetary mill with varying the ratio of powder: grinding bodies. These results can be used in the field of transparent ceramic synthesis.

На сегодняшний день одной из актуальных проблем является изготовление и изучение свойств лазерной керамики на основе YAG. Существуют два основных подхода для синтеза керамических материалов: твердофазное спекание и химические способы синтеза. Твердофазное спекание требует жестких условий с длительными высокотемпературным воздействием и гомогенизацией. Порошки YAG, полученные химическими методами, однородны и формируют фазу YAG при более низких температурах [1]. Для получения керамики с высокой прозрачностью необходим высокодисперсный порошок с узким распределением частиц по размерам [2]. Поэтому важной задачей является контроль дисперсного состава керамических порошков, для обеспечения хорошей спекаемости керамики и высоких оптических свойств [1].

В ходе работы на стадии измельчения прекурсора YAG изменяли массовое соотношение размольных тел и порошка-прекурсора YAG и оценивали влияние дисперсного состава на оптические свойства керамики. Порошок синтезировали методом химического осаждения. Измельчение проводили в водной среде на планетарной мельнице с массовым соотношением порошка и шаров при загрузке (П/Ш): 1:2,25 (обр. 1), 1:4,5 (обр. 2) и 1:9 (обр. 3). Керамические образцы получили при вакуумном спекании при 1820 °С. Светопропускание керамических образцов определяли в диапазоне длин волн 200–1100 нм на спектрофотометре СФ-56.

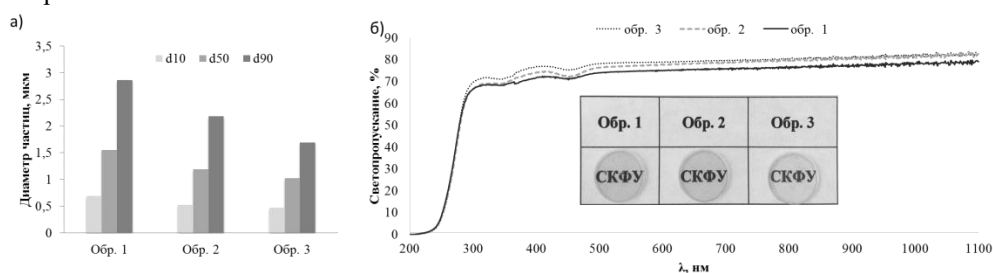


Рис. 1. Зависимость дисперсного состава порошка прекурсора YAG от режимов измельчения (а), спектры светопропускания и фотографии образцов оптической керамики(б)

Зависимость дисперсного состава порошка прекурсора YAG от режимов измельчения представлена на рис.1а. Увеличение массовой доли шаров в суспензии приводило к существенному снижению параметра d90 с 2,865 мкм до 1,696 мкм, в то время как параметры d50 и d10 снижались незначительно.

Изменение гранулометрического состава порошков прекурсора YAG отразилось на оптических свойствах образцов керамики. Величина светопропускания в видимом диапазоне варьировалась от 77,01% (обр. 1) до 80,8% (обр. 3) (рис.1б). Наилучшая прозрачность керамики была достигнута для образца 3, имеющего наиболее близкие значения d10, d50, d90, а, следовательно, наиболее узкое распределение частиц по размерам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSRN-2022-0015).

### Список литературы

1. Wang J., Zheng S., Zeng R. and others // J. Am. Ceram. Soc. 2009. Vol. 92. P. 1217–23.
2. Zhang Y., Yu H. // Ceram. Int. 2009. Vol. 35. P. 2077–81.



А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, Н.В. ШВЫНДИНА  
*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

## ЖАРОСТОЙКОСТЬ La- СОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ Mo-Hf-Si-B

Покрyтия Mo-La-Hf-Si-B были получены с методом магнетронного распыления с использованием мозаичной мишени. Исследовано влияние концентрации La на структуру и жаростойкость покрyтий Mo-Si-B. Результаты показали, что введение лантана в состав покрyтий Mo-Hf-Si-B приводит к уменьшению размера кристаллитов основной фазы h-MoSi<sub>2</sub> на 20%. Покрyтия Mo-La-Hf-Si-B характеризовались твердостью 12-15 ГПа. Легирование покрyтий Mo-Hf-Si-B La способствовало росту жаростойкости при температуре 1000°C за счет образования оксидного слоя a-SiO<sub>2</sub>+h-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

A.D. SYTCHENKO, Ph.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV, N.V. SHVYNDINA  
*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

## OXIDATION RESISTANCE OF La- CONTAINING Mo-Hf-Si-B COATINGS

Mo-La-Hf-Si-B coatings were obtained by magnetron sputtering using a mosaic target. The effect of La concentration on the structure and oxidation resistance of Mo-Si-B coatings has been studied. The results showed that the introduction of lanthanum into the composition of Mo-Hf-Si-B coatings leads to a decrease in the size of crystallites of the main h-MoSi<sub>2</sub> phase by 20%. La-doping Mo-Hf-Si-B had better oxidation resistance at 1000°C due to the formation of an oxide layer a-SiO<sub>2</sub>+h-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Покрyтия Mo-Si-B широко используются для повышения срока службы и рабочих характеристик деталей, подверженных воздействию высоких температур [1]. Ведутся работы по улучшению свойств покрyтий Mo-Si-B можно путем легирования переходными металлами и их соединениями. Ранее нами было показано, что введение HfB<sub>2</sub> в состав покрyтий Mo-Si-B приводит к увеличению стойкости к окислению при температурах 1100-1500°C вследствие образования плотного оксидного слоя на основе SiO<sub>2</sub> и уменьшения диффузии кислорода из-за присутствия в оксидном слое частиц HfO<sub>2</sub>/HfSiO<sub>4</sub> [2]. Известно, что легирование силицидных покрyтий редкоземельными элементами также приводит к росту их стойкости к окислению. Легирование Mo-Si-B лантаном повышает стойкость к окислению при 650 – 950°C за счет образования оксида La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в боросиликатном слое, что снижает его вязкость и предотвращает испарение MoO<sub>3</sub> [3]. Целью настоящей работы является исследование влияния добавки лантана на структуру и жаростойкость покрyтий Mo-(La)-Hf-Si-B, полученных методом магнетронного распыления с использованием мозаичной мишени.

Эталонные покрyтия Mo-Hf-Si-B были получены методом магнетронного распыления с использованием композиционной мишени (MoSi<sub>2</sub>+10%MoB)+5%HfB<sub>2</sub>. Для получения покрyтий Mo-La-Hf-Si-B сегменты Mo+xLa<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (где x = 0, 20 и 40 вес.%) размером  $\varnothing 10 \times 5$  мм помещались в зону эрозии мишени. Осаждение проводилось на установке УВН-2М в среде Ag (99,9995%) при общем давлении ~0,1 Па. Ток, напряжение и мощность составляли 2А, 500 В и 1 кВт. Покрyтия наносились на подложки из поликристаллического алюминия, которые предварительно подвергались ультразвуковой очистке в изопропиловом спирте в течение 5 мин. Время осаждения покрyтий составляло 40 мин. Структуру и состав покрyтий исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда (ОЭСТР) и рентгенофазового анализа (РФА). Механические свойства покрyтий измерялись методом наноиндентирования. Стойкость покрyтий к окислению оценивалась при 1000°C при охлаждении на воздухе и вместе с печью. После отжига покрyтия были исследованы методами СЭМ, ЭДС и РФА.

Согласно данным ОЭСТР, концентрация основных элементов Mo, Hf, Si, B в покрyтиях снижалась при введении лантана. Содержание La возрастало с 0 до 4 ат.% с увеличением концентрации La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в сегментах с 0 до 40 вес%. По данным СЭМ все покрyтия характеризовались плотной мало-дефектной структурой. Согласно данным РФА, основной структурной составляющей в покрyтиях Mo-(La)-Hf-Si-B являлась фаза h-MoSi<sub>2</sub>. Увеличение концентрации La с 0 до 4 ат.% в покрyтиях привело к снижению размера кристаллитов h-MoSi<sub>2</sub> с 18 до 14 нм. Результаты наноиндентирования показали, что все покрyтия характеризуются близкими твердостью 12-15 ГПа, модулем упругости 200-220 ГПа и упругим восстановлением 38-45%. Более низкие механические характеристики данных покрyтий по сравнению с полученными ранее покрyтиями Mo-Hf-Si-B [3] (твердость 24 ГПа) связаны с увлечением концентрации Mo и отклонением от стехиометрии MoSi<sub>2</sub>. Изотермические и не изотермические отжиги показали, что легирование лантаном способствовало росту жаростойкости покрyтий Mo-Hf-Si-B при температуре 1000°C. Высокая жаростойкость La-содержащих покрyтий достигалась за счет формирования плотного оксидного слоя a-SiO<sub>2</sub>+h-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00117-П).

### Список литературы

1. Perepezko J.H. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018. V. 71. P. 246-254.
2. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., et. al. // Surface and Coatings Technology, 2022, № 128141.
3. Wu Z., Feng K., et. al. // Corros. Sci., V. 192, 2021, №. 109762.



А.К. ТАШАТОВ<sup>1</sup>, Б.Е. УМИРЗАКОВ<sup>1</sup>, Н.М. МУСТАФАЕВА<sup>2</sup>, С.Н. ЭШБОБОВЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

<sup>2</sup>Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Узбекистан

## ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПЛЕНОК Co и CoSi<sub>2</sub> НА ПОВЕРХНОСТИ Si

Установлено, что при толщине слоя Co менее чем 3 монослой в зонной структуре появляется узкая запрещённая зона ( $E_g \approx 0,3$  eV). Металлические свойства пленки Co проявляются при толщине больше чем 4-5 монослой. Прогрев системы Co/Si(111) при  $T=7-900$  K приводит к образованию нанофаз и нанопленок CoSi<sub>2</sub>.  $E_g$  нанофаз CoSi<sub>2</sub>, с  $\theta \approx 3$  монослоя составляет  $\sim 0,8$  eV, а пленки CoSi<sub>2</sub>, -0,6 eV.

A.K. TASHATOV<sup>1</sup>, B.E. UMIRZAKOV<sup>1</sup>, N.M. MUSTAFAEVA<sup>2</sup>, S.N. ESHBOBOYEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

<sup>2</sup>Karshi Engineering Economics Institute, Karshi, Uzbekistan

## EFFECT OF ION BOMBARDMENT ON THE FORMATION OF Co And CoSi<sub>2</sub> NANOFILMS ON Si SURFACES

It was found that with a layer thickness of less than 3 monolayers, a narrow band gap appears in the band structure ( $E_g \approx 0.3$  eV). The metallic properties of the Co film are manifested at a thickness of more than 4-5 monolayer. Heating of the Co/Si(111) system at  $T=7-900$  K leads to the formation of nanophases and CoSi<sub>2</sub> nanofilms. The unit of CoSi<sub>2</sub> nanophases, with  $\theta \approx 3$  monolayers is  $\sim 0.8$  eV, and CoSi<sub>2</sub> films, -0.6 eV.

Многослойные системы на основе Si и силицидов металлов являются основными материалами современной микро-, нано- и оптоэлектроники. В частности, наноструктуры MeSi<sub>2</sub>/Si перспективны для создания СВЧ- транзисторов, УБИС, оптических резонаторов, электронных и магнитных запоминающих устройств [1,2]. Среди силицидов металлов для создания многослойных ПДП и МДП систем наиболее оптимальным материалом является CoSi<sub>2</sub>, благодаря его металлическим свойствам (удельное сопротивление 20-30 мкΩ·см) и возможности его эпитаксиального выращивания на Si из-за близости параметров решетки.

В данной работе мы попытались методом твердофазной эпитаксии получить наноразмерные фазы и пленки Co и CoSi<sub>2</sub>/Si(111) с использованием метода предварительной бомбардировки Si ионами Ag<sup>+</sup> и изучить зависимость параметров энергетических зон от размеров нанофаз Co и CoSi<sub>2</sub>. Нанесение пленок Co на поверхность Si осуществлялось нагревом Co электронной бомбардировкой и проводилось при комнатной температуре подложки. Скорость роста пленок определялась предварительно с использованием метода ОЭС в сочетании с ионным травлением, и она составляла  $\sim 2$  Å/мин. Напыление атомов Co, прогрев образцов, исследование их состава и параметров энергетических зон с использованием методов Оже-электронной спектроскопии ОЭС и измерением интенсивности проходящего через образец света проводились в одном и том же приборе в условиях сверхвысокого вакуума ( $P = 10^{-7}$  Па). Морфология поверхности изучалась методами растровой электронной микроскопии РЭМ (Jeol).

На рис. приведены зависимости интенсивности  $I$  проходящего через образец света от энергии  $h\nu$ , для Si(111) с нанопленкой Co разной толщины  $\theta$ . Здесь  $I = I_{\text{CoSi}_2} / I_{\text{Si}}$ ;  $I_{\text{Si}}$  - интенсивность проходящего света через чистый Si (111).  $I_{\text{CoSi}_2}$  - интенсивность проходящего света через чистый Si (111), с пленкой CoSi<sub>2</sub>. Зависимости  $I(h\nu)$  для Si (111) с пленкой Co различной толщины  $\theta$  (монослой): 1- $\theta=0$  (чистый Si); 2- $\theta=1$ ; 3- $\theta=3$ ; 4- $\theta=6$ .

Видно, что при  $\theta=1$  монослой вид зависимости  $I(h\nu)$  не отличается от таковой для чистого Si (111). Только в области  $h\nu = 0,9 - 1$  эВ наблюдается более существенное уменьшение  $I$ . По-видимому, скопление атомов Co в центрах зародышей пока ещё существенно не влияет на оптические свойства Si. В случае  $\theta=3$  монослой значение  $I$  резко уменьшается в двух областях  $h\nu$ : при  $h\nu = 0,2$  эВ и при  $h\nu = 0,9$  эВ. Первое уменьшение  $I$  связано с наличием на поверхности участков, покрытых атомами Co, а второе не покрытых Co участков Si.

Таким образом, в работе методом бомбардировки ионами Ag<sup>+</sup> на поверхности Si получены упорядоченно расположенные центры, которые служили зародышами для получения наноразмерных фаз и пленок Co. Впервые изучены  $E_g$  нанофазы и нанопленки Co. Предполагается, что наноразмерные фазы Co с поверхностными диаметрами  $\leq 20-25$  нм обладают свойствами узкозонных полупроводников ( $E_g = 0,3$  эВ). Последующий отжиг при  $T \approx 900$  K приводил к формированию наноэпитаксиальной структуры CoSi<sub>2</sub> на поверхности Si (111). Показано, что квантоворазмерные эффекты в случае нанофаз CoSi<sub>2</sub> проявляются при  $d \leq 20-25$  нм.

### Список литературы

1. В.Л. Дубов, Д.В. Фомин, Успехи прикладной физики. 4(6), 599-605. (2016). <https://www.advances-orion-ir.ru/UPF-16/6/UPF-4-6-599.pdf>
2. A.S. Rysbaev, A.K. Tashatov, Sh.X. Dzhuraev, Zh.B. Khuzhaniyazov, G. Arzikulov, and S.S. Nasriddinov, Surf. Inves. X-ray. 5 (6), 1193-1196, (2011). DOI: 10.1134/S1027451011100193

Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, С.Т. АБРАЕВА, С.Т. ГУЛЯМОВА, Ш.А. ТОЛИПОВА,  
А.У. ХУЖАНИЯЗОВА, Х.Х. БОЛТАЕВ

*Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан*

## ВЛИЯНИЕ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ $Ar^+$ НА СПЕКТР ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА ПОВЕРХНОСТИ Ge

В работе впервые изучено влияние низкоэнергетической бомбардировки ионами  $Ar^+$  разными дозами на электронную структуру Ge(111). Показано, что в процессе ионной бомбардировки вследствие разупорядочения приповерхностных слоев происходит изменение плотности состояния валентных электронов Ge(111).

D.A. TASHMUKHAMEDOVA, S.T. ABRAEVA, S.T. GULYAMOVA, SH.A. TOLIPOVA,  
A.U. XUJANIYAZOVA, X.X. BOLTAEV

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan*

## EFFECT OF BOMBARDMENT BY $Ar^+$ IONS ON THE TRANSMISSION SPECTRUM OF A Ge SURFACE

The effect of low-energy bombardment with  $Ar^+$  ions at different doses on the electronic structure of Ge(111) was studied for the first time. It is shown that during ion bombardment the density of state of the Ge(111) valence electrons changes due to disordering of the near-surface layers.

Особый интерес представляет получение ионной бомбардировкой регулярно расположенных зародышей и наноразмерных однокомпонентных фаз [1 - 3]. В частности, такие магические кластеры получены в [4] на реконструированной ( $7 \times 7$ ) поверхности атомарно чистого Si(111) напылением  $\sim 0,3$  монослоя алюминия при  $T=550^\circ C$  в условиях сверхвысокого вакуума. В данной работе впервые изучено влияние низкоэнергетической бомбардировки ионами  $Ar^+$  разными дозами на электронную структуру Ge(111).

На рис. 1 приведены спектры пропускания света для Ge(111) бомбардированного ионами  $Ar^+$  с  $E_0=1$  кэВ разными дозами. Видно, что зависимость  $I(h\nu)$  до  $h\nu=0.63$  эВ практически не меняется и в интервале  $h\nu=0.63-0.72$  эВ резко уменьшается. Экстраполяция этой части кривой дает значение ширины запрещенной зоны  $E_g$ . Видно, что для Ge(111) значение  $E_g=0.73$  эВ.

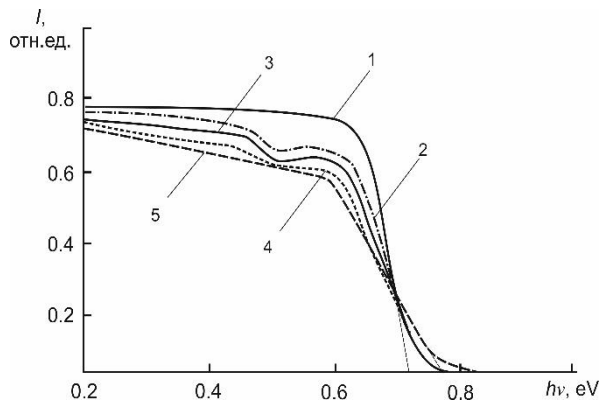


Рис. 1. Спектры пропускания света  $I$  для Ge(111), бомбардированного ионами  $Ar^+$  с  $E_0=1$  кэВ при дозах  $D$ ,  $cm^{-2}$ : 1 – 0, 2 –  $5 \cdot 10^{14}$ , 3 –  $10^{15}$ , 4 –  $5 \cdot 10^{15}$ , 5 –  $6 \cdot 10^{16}$ .

При низких дозах ( $D \leq 10^{15} cm^{-2}$ ) на спектрах пропускания наблюдается уменьшение  $T$  во всей области  $h\nu$ , уменьшение крутизны кривой и появляется пик дополнительного поглощения света в области  $h\nu=0.5$  эВ. С ростом дозы интенсивность нового пика заметно не меняется, а его полуширина увеличивается и при  $D \geq 8 \cdot 10^{15} cm^{-2}$  полностью сглаживается. При  $D=6 \cdot 10^{16} cm^{-2}$  значение  $E_g$  увеличивается до  $\sim 0.8$  эВ. При дальнейшем росте  $D$  значение  $T$  немного уменьшается и при  $D=D_{нас.}$  устанавливается на уровне  $\sim 70\%$ . Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При низких дозах происходит частичное разупорядочение приповерхностных слоев, т.е. часть атомов Ge из узлов решетки переходит в междоузлия. По-видимому, это приводит к дополнительному поглощению света в области  $h\nu=0,5$  эВ. С ростом дозы ионов степень и площадь упорядоченных слоев поверхности увеличивается, что приводит к уширению дополнительного пика. При  $D=6 \cdot 10^{15} cm^{-2}$  происходит полное разупорядочение поверхностных слоев.

### Список литературы

1. Камаев Г.Н., Володин В.А., Кривякин Г.К. // Письма в ЖТФ. 2021. 47 (12). С. 13.
2. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 4. С. 148.
3. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 10, С. 60.
4. Зотов А.В., Саранин А.А. // Природа. 2006. № 4. С. 11.

С.К. ТЕЛЯЕВ, А.Н. ПАЙЗУЛЛАЕВ, К.Б. ЭГАМБЕРДИЕВ, О.В. ТРУНИЛИНА,  
С.З. МИРЗАЕВ

*Институт Ионно-Плазменных и Лазерных Технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан*

## АКУСТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ВОДНЫХ НАНОЖИДКОСТЯХ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Обсуждение механизмов акустической релаксации в наножидкостях проводилось на основе спектров поглощения ультразвука в системе наночастицы оксида кремния – вода.

S.Q. TELYAEV, A.N. PAYZULLAYEV, K.B. EGAMBERDIEV, O.V. TRUNILINA, S.Z. MIRZAEV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, AS Uz, Tashkent, Uzbekistan*

## ACOUSTICAL RELAXATION IN SILICA NANOPARTICLE-BASED AQUEOUS NANOFLUIDS

On the basis of ultrasonic attenuation spectra for system silicon dioxide nanoparticles - water the mechanisms of acoustic relaxation in nanofluids are discussed.

Nanofluids are a two-phase system consisting of a carrier liquid and nanoparticles of chemically stable metals or metal oxides. The ability of nanoparticles to form supramolecular structures with a high ordering of molecules near the surface of nanoparticles and the synergism of structural units in the system determines the whole variety of kinetic phenomena in nanofluids [1]. Model approaches available to date describe well kinetic phenomena involving liquid molecules and macroscopic bodies. However, to describe kinetic phenomena involving nanoparticles occupying an intermediate position between these objects in size, there is no adequate physical model explaining the features of relaxation processes in nanofluids. The creation of such a model requires a directed series of experiments, systematic accumulation of experimental data and their analysis [2].

Ultrasonic spectroscopy is one of the methods that provide information about such systems, which are usually opaque in the optical range, and do not destroy the structures formed in these systems [2,3]. This method also makes it possible to determine the size of formations or particles in nanofluids. We have studied the ultrasonic attenuation of 40 nm sized silica (SiO<sub>2</sub>) nanoparticle (AEROSIL, Germany) – water system at different temperatures. Prior to sample preparation, the water was subjected to ultrasonic irradiation to remove dissolved gases in the liquid. After the nanoparticles were added to water, the sample was subjected to ultrasonic dispersion for 120 min at a frequency of 44 MHz.

The figure 1 shows the ultrasonic attenuation spectra as a function of frequency for a nanofluid with a volume concentration of SiO<sub>2</sub> nanoparticles of 0.01.

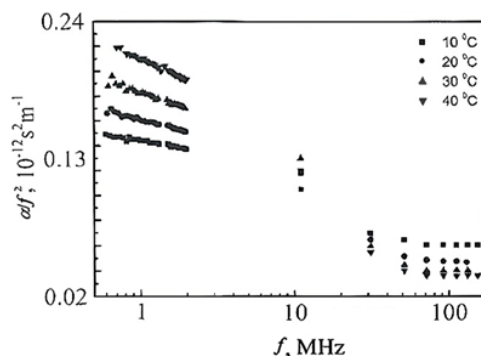


Fig. 1. Ultrasonic attenuation spectra of the silica - water system

Despite the large number of works concerning the study of structure formation processes in SiO<sub>2</sub> nanofluids, the question of the reasons for the existence of a critical concentration of structure formation in some dispersions and its absence in others, the physical sense of the critical concentration of structure formation, and the mechanism of formation of the spatial framework of such systems still remains open. In fact, the task is to construct a model capable of explaining the observed experimental facts based on primary principles, such as the interaction between the dispersed phase and the dispersion medium. In the future, this will make it possible to create scientific ways to predict and control the structural and mechanical properties of oxide dispersions and, ultimately, to obtain unique materials with predetermined properties. It is important and interesting to elucidate the features of the mechanism of formation of stable loose spatial nanomaterials.

### Список литературы

1. Said Z. et al. //Physics Reports. 2022. V. 946. P. 1-94.
2. Bhattacharjee J. K., Kaatz U., Mirzaev S. Z. // Reports on Progress in Physics. 2010. Vol. 73. №. 6. P. 066601.
3. Egamberdiev K., Mirzaev S. Z., Kaatz U. // J Phys. Chem. B. 2016. Vol. 120. №. 48. P. 12379-12389.

А.А. ТРЕСКОВА, О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ,  
П.Ф. КАРЦЕВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $WSe_2/NP-W$ ДЛЯ ФОТО-АКТИВИРОВАННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА НА КРЕМНИЕВОМ ФОТОКАТОДЕ В КИСЛОТНОМ РАСТВОРЕ

Рассмотрены способы регулирования структуры и типа проводимости пленок  $WSe_2$ , формируемых на кремнии p-типа проводимости методами импульсного лазерного осаждения и последующей термической обработки для эффективного свето-активированного получения водорода в кислотном растворе. Проведены расчеты методом DFT, которые позволили определить участки поверхности пленок с повышенной каталитической активностью в реакции образования молекул водорода.

A.A. TRESKOVA, O.V. RUBINKOVSKAYA, D.V. FOMINSKI, R.I. ROMANOV,  
P.F. KARTSEV, V.YU. FOMINSKI

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## PREPARATION OF THIN NANOSTRUCTURED $WSe_2/NP-W$ FILMS AND THEIR APPLICATION IN SEMICONDUCTOR p-SI PHOTOCATHODES FOR HYDROGEN PRODUCTION BY WATER SPLITTING

The regulation of the structure and conductivity type of  $WSe_2$  films formed on p-type silicon by thermal treatment of a thin-film precursor, which was preliminarily created by pulsed laser deposition, are studied. The calculations by DFT method were carried out to determine the surface sites with enhanced catalytic activity in hydrogen evolution reaction.

Особый интерес представляет каталитические материалы на основе халькогенидов переходных металлов (ХПМ), широко распространённых в природе и имеющих меньшую стоимость, чем платина. Такие ХПМ, как  $Mo/W/S_x/Se_x$  в перспективе смогут решить проблемы более эффективного использования солнечной энергии для генерации носителей заряда в полупроводниковых фотокатодах и одновременного активирования образования молекул  $H_2$ . В работе исследована возможность применения пленок  $WSe_2$ , формируемых импульсным лазерным осаждением, для создания фотокатода на основе p-Si для свето-активированного расщепления воды. Пленки  $WSe_2$ , формируемые методом импульсной лазерной абляции [1] мишени  $WSe_2$  с последующей термообработкой, состоят из полупроводниковой фазы  $WSe_2$  и металлических наночастиц W (NP-W). NP-W вызывают затенение Si подложки, однако оказывают важное влияние на структурообразование  $WSe_2$ , которое вызывает формирование каталитически активных участков для выделения  $H_2$ . Легирование рением обуславливало n-тип проводимости в пленках  $WSe_2$  и, как следствие, формирование гетероперехода с p-Si. Встроенное электрическое поле вблизи гетероперехода обеспечивало достаточно эффективное разделение свето-генерированных электронов и дырок в p- $WSe_2$  и перенос электронов к каталитически активным участкам каталитической пленки, что обуславливало достаточно высокие фотоэлектродокаталитические характеристики созданного фотокатода при получении водорода (рис. 1).

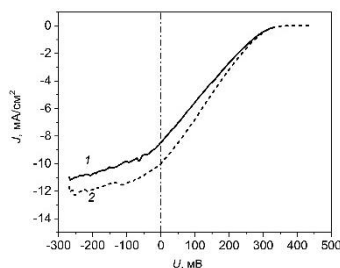


Рис. 1. Зависимости плотности фототока  $J$  от напряжения  $U$  для фотокатода p-Si с легированной Re пленкой  $WSe_2/NP-W$ , измеренные после создания фотокатода (кривая 1) и после 10 циклов измерений (кривая 2). Интенсивность освещения  $100 \text{ мВт/см}^2$ .

Созданный фотокатод обладал достаточно стабильными характеристиками, которые не изменялись после циклических испытаний. Плотность фототока при нулевом потенциале ( $J_0$ ) могла достигать  $10 \text{ мА/см}^2$ , а потенциал начала выделения водорода ( $U_{\text{onset}}$ ) равнялся  $340 \text{ мВ}$ . Высокая каталитическая активность поверхности пленки  $WSe_2/NP-W$  способствовала быстрой кинетике переноса заряда на границе с электролитом.

Результаты моделирования методом DFT позволяют предположить, что за каталитическую активность поверхности в пленках  $WSe_2/NP-W$  отвечали в основном краевые состояния в нанокристаллах  $WSe_2$  и дефекты в несовершенных по структуре нанооболочках  $2H-WSe_2$  на NP-W. Дефектами могли быть участки нарушения сплошности слоистых оболочек, а также вакансии селена на поверхности таких оболочек.

### Список литературы

1. Fominski V., Demin M., Fominski D., Romanov R., Rubinkovskaya O. and others // *Nanomaterials* 2022. Vol. 12, P. 2080.

У.Б. УЛЬЯЕВ<sup>1</sup>, У.Б. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Руз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## РОЛЬ ДЕФЕКТОВ ГРАФЕНА В ХРАНЕНИИ ВОДОРОДА

В этом исследовании используется моделирование молекулярной динамики для изучения механизмов хранения водорода в графене на атомном уровне. В частности, мы обнаружили, что хранение молекул водорода зависит от типа и размера дефектов на поверхности графена.

U.B. ULJAYEV<sup>1</sup>, U. KHALILOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## THE ROLE OF GRAPHENE DEFECTS IN HYDROGEN STORAGE

This study uses molecular dynamics simulations to investigate the atomic-level mechanisms of hydrogen storage in graphene. In particular, we found that the storage of hydrogen molecules depends on the type and size of defects on the graphene surface.

Although hydrogen energy is considered one of the most efficient alternative fuels, its production is not convenient [1]. Hydrogen technology is also the main task of its storage and transportation. Although experimental experiments are currently being carried out to store hydrogen in compressed gas and cryogenic liquid state in tanks, these methods require more energy. Recently, along with these methods, the method of storing hydrogen in solid bodies is widely used, and many studies are being conducted on the use of carbon nanomaterials as a material [2]. Nevertheless, the rate of hydrogen storage in materials is still low.

In this study, the gravimetric density (wt%) of reference hydrogen in free and different defective graphenes is examined using molecular dynamics (MD) method (Fig.1). In MD simulations, the ReaxFF potential with parameters developed by Zou and others [3] was used to precisely describe the interactions between atoms in order to reliably describe the phenomena of the formation and breaking of chemical bonds between atoms in the system. In particular, the gravimetric density of physisorbed H<sub>2</sub> molecules for ideal graphene and graphene structures with defect concentrations of 0.24, 0.48, 0.82, 0.82, 1.92 and 2.88% is 1.56 wt.% and 1.76, 1.88, 2.01, 2.06, 2.08, 2.12 wt.% respectively. The results show that the relative mass of the H<sub>2</sub> molecules, physisorbed around the defective graphene, is 1.36 times more than in a defectless graphene.

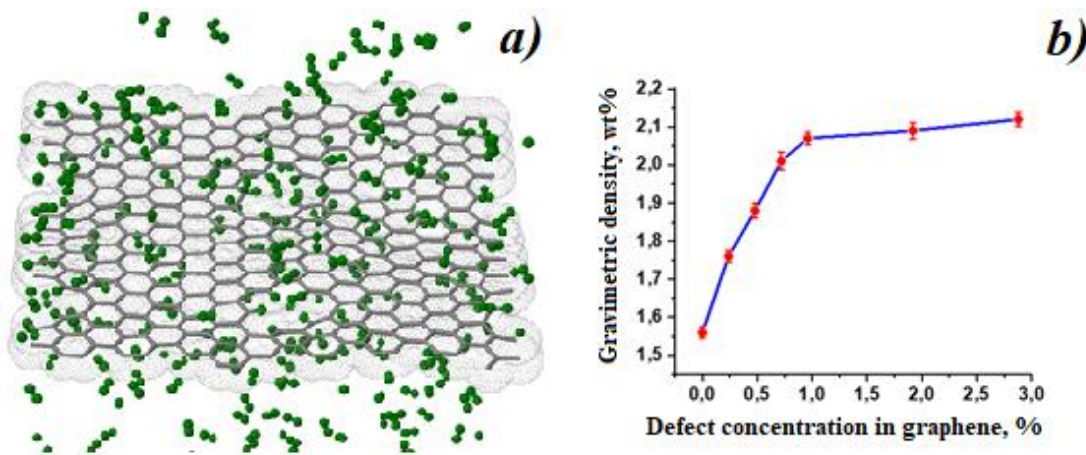


Fig.1. Location of the H<sub>2</sub> molecule around defective graphene (a), the dependence of the gravimetric density of hydrogen molecules on the concentration of defects in graphene (b).

### Список литературы

1. P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, and W. I. F. David. Hydrogen Energy, Phil. Trans. R. Soc. A. 2007. Vol. 365. №.1853. pp.1043-1056
2. Rahul Krishna et.al. "Hydrogen Storage for Energy Application" 2012, Vol. 271. pp. 243-266.
3. K. Chenoweth, A. C. T. van Duin, and W. A. Goddard, "ReaxFF Reactive Force Field for Molecular Dynamics Simulations of Hydrocarbon Oxidation", J. Phys. Chem. A 2008. Vol. 112, №. 5. pp. 1040–1053.

У.Б. УЛЬЯЕВ<sup>1</sup>, К.К. МЕХМОНОВ<sup>1</sup>, М.С. ЮСУПОВ<sup>1,2</sup>, У.Б. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Руз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Наше исследование, основанное на моделировании молекулярной динамики, показало, что эндоэдральные атомы никеля могут улучшить способность углеродных нанотрубок накапливать водород.

U.B. ULJAYEV<sup>1</sup>, K.K. MEHMONOV<sup>1</sup>, M.S. YUSUPOV<sup>1,2</sup>, U.B. KHALILOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## INCREASING THE EFFICIENCY OF HYDROGEN STORAGE OF CARBON NANOTUBES

Our study, based on molecular dynamics simulations, revealed that endohedral nickel atoms can improve the hydrogen storage ability of carbon nanotubes.

One of the most important problems in hydrogen energy is the safe and efficient storage of hydrogen atoms/molecules [1]. Despite significant progress in hydrogen storage using carbon nanotubes (CNTs), their storage efficiency is still low [2]. In this simulation-based study, reactive molecular dynamics (MD) was used to investigate how endohedral nickel atoms improve the hydrogen storage of single-walled CNTs (SWNTs) [3]. The results showed that the introduction of nickel atoms into the SWNT changes the partial charges of atoms in the system. As a result, an increase in the volume fraction of nickel atoms leads to an increase in the concentration of physisorbed hydrogen molecules around SWCNTs by about 1.8 times (Fig. 1). This study contributes to atomic-level understanding of the role of endohedral metal atoms in improving hydrogen storage using CNTs.

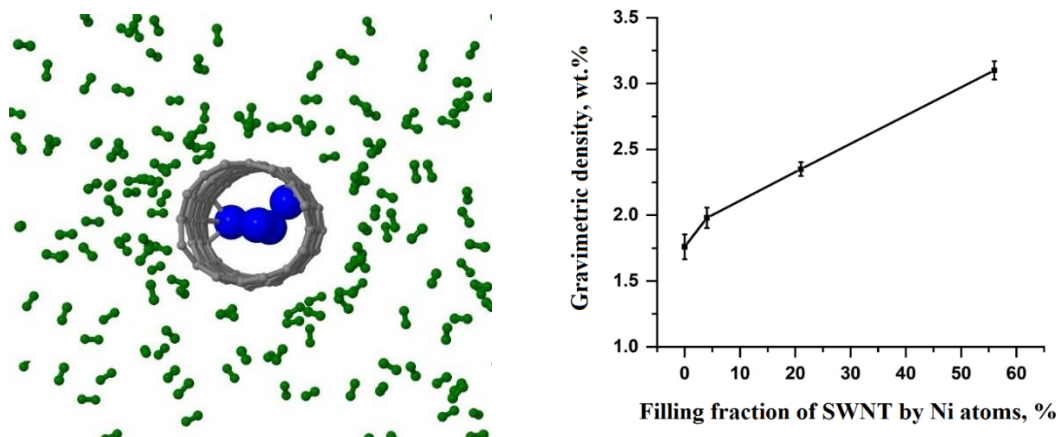


Fig. 1. (a) Cross section of Ni<sub>5</sub>@SWNT (volume filling fraction of 22%) with surrounding H<sub>2</sub> molecules. (b) The average gravimetric density of physisorbed H<sub>2</sub> molecules depends on the volume fraction of endohedral nickel atoms.

### Список литературы

1. B.P. Tarasov, M.V. Lototskii, V.A. Yartys, Problem of hydrogen storage and prospective uses of hydrides for hydrogen accumulation. Russ. J. Gen. Chem. 2007. Vol. 77, pp. 694–711.
2. C. Liu et al. Hydrogen Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes at Room Temperature, Science 1999. Vol. 286, №.5. pp. 1127-1129.
3. U. Khalilov et al., How the Alignment of Adsorbed Ortho H Pairs Determines the Onset of Selective Carbon Nanotube Etching, Nanoscale 2017. Vol. 9, №. 1653. pp. 1653-1661.



И. УРУНОВ<sup>1,2</sup>, Ф. САФАРОВ<sup>1</sup>, Ф. ХАЙДАРОВ<sup>1</sup>, К. ЭГАМБЕРДИЕВ<sup>1</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан.

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>3</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## ОЦЕНКА РАЗМЕРА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Лучшее понимание и идентификация гидродинамической оболочки, которая формируется вокруг наночастиц в жидкостях, имеет решающее значение для фундаментальных исследований и промышленных приложений. В данной работе гидродинамическая толщина оболочки оценивается путем изучения агрегации монодисперсных наночастиц NiO в вакууме и водных средах методом молекулярной динамики.

I. URUNOV<sup>1,2</sup>, F. SAFAROV<sup>1</sup>, F. KHAYDAROV<sup>1</sup>, K. EGAMBERDIEV<sup>1</sup>, U. KHALILOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

<sup>2</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>3</sup>University of Antwerp, Belgium

## ESTIMATION OF THE SIZE OF THE HYDRODYNAMIC SHELL BY THE METHOD OF MOLECULAR DYNAMICS

A better understanding and identification of the hydrodynamic shell that forms around nanoparticles in liquids is crucial for fundamental research and industrial applications. In this work, the hydrodynamic shell thickness is estimated by studying the aggregation of monodisperse NiO nanoparticles in vacuum and aqueous media by molecular dynamics method.

One of the main reasons for the significant improvement in the thermophysical properties of nanofluids compared to conventional fluids is the hydrodynamic shell that forms around the nanoparticle [1,2]. Despite numerous efforts, determining the experimental thickness of a hydrodynamic shell with high accuracy is still a difficult task [3], and the thermophysical properties related to the shell thickness remain elusive [4].

In this work, two spherical NiO nanoclusters with a size of 1 nm were selected as a model system [5] and their aggregation processes in vacuum and in water environment at room temperature were studied by molecular dynamics simulations. The results showed that when nanoclusters are in water, in contrast to vacuum, a slippery liquid absorption layer is formed at the interface between the nanoparticle and liquid. Namely, this layer is formed due to the strong intermolecular forces between the nanocluster and liquid atoms. Consequently, we found that the thickness of the hydrodynamic shell formed around the nanocluster is about 0.08 nm. (see Fig. 1, nanoclusters are located at a longer distance in water than in vacuum). Our obtained value is fairly close to the experimental results, which the layer thicknesses are estimated to be 1 nm or less [4].

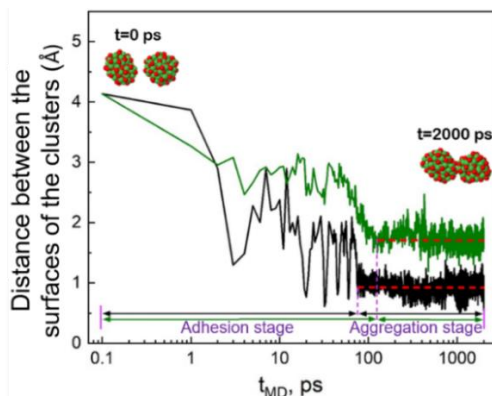


Fig. 1. Time dependence of the average distance between the surfaces of NiO nanoclusters in vacuum (black line) and in water (green line).

### Список литературы

1. H. Xie et al., Journal of Applied Physics 91, 4568 (2002).
2. K. C. Leong, C. Yang, and S. M. S. Murshed, J Nanopart Res 8, 245 (2006).
3. C.-J. Yu et al., Physica B: Condensed Matter 283, 27 (2000).
4. L. Li et al., Physics Letters A 372, 4541 (2008).
5. P. Van de Sompel, U. Khalilov, and E. C. Neyts, J. Phys. Chem. C 125, 7849 (2021).

Л.В. ФУРОВ

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия*

## **О СПОСОБЕ ИСПЫТАНИЯ СТОЙКОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОМ УДАРЕ**

Рассмотрен способ испытания стойкости диэлектрических материалов на тепловой удар. Способ реализуется воздействием электроразрядной плазмы на диэлектрический материал. Критерием стойкости образца к тепловому удару служит степень оплавления, отслоения или его разрушение. В зависимости от испытываемого материала (стекло, ситалл, текстолит и др.) степень воздействия различна. Приведены результаты проведённых экспериментов.

L.V. FUROV

*Vladimir State University, Vladimir, Russia*

## **ON THE METHOD OF TESTING THE RESISTANCE OF DIELECTRIC MATERIALS FOR HEAT SHOCK**

A method for testing the resistance of dielectric materials to thermal shock is considered. The method is implemented by the action of an electric discharge plasma on a dielectric material. The criterion for the resistance of a sample to thermal shock is the degree of melting, delamination or its destruction. Depending on the material being tested (glass, ceramic glass, textolite, etc.), the degree of exposure is different. The results of the conducted experiments are presented.

Известно, что одним из внешних кратковременных воздействий на материалы является тепловой удар. Испытания теплозащитных покрытий в условиях термического удара являются актуальными в различных областях науки и техники. Однако, при проведении этих исследований нагрев образца проходит в течение длительного времени (30 с и более). При этом, как правило, они являются циклическими (от 1 000 до 6 000 циклов). Прежде всего, это испытание изоляции и оболочек на стойкость к растрескиванию (испытание на тепловой удар) [1]. Этот стандарт устанавливает порядок проведения на стойкость изоляции и оболочек к растрескиванию при повышенной температуре. Он регламентирует испытание образцов при температуре  $(150\pm 3)^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Также существуют способы испытания на тепловой удар в испытательных камерах. В таких камерах переход между экстремальными температурами происходит со скоростью  $15^\circ\text{C}/\text{мин}$ . С одной стороны, это достаточно быстрый нагрев. При испытании тепловым ударом изделие подвергается чередующемуся воздействию низкой и высокой температур для ускорения разрушительных процессов в материале в результате циклического воздействия температуры или тепловых ударов в процессе его обычной эксплуатации.

В настоящей работе рассматривается способ испытания термической стойкости диэлектрического материала при однократном воздействии в течение короткого промежутка времени  $\approx 0.1$  с. При этом температура достигает  $4\,500\text{ K}$ . Такое кратковременное термическое воздействие на образец невозможно получить ни в одной испытательной камере. Способ заключается в воздействии электроразрядной плазмы на диэлектрический материал. Мощный импульс тока до  $15\text{ kA}$  и длительностью  $\approx 100\text{ мс}$  генерируется индукционным накопителем электрической энергии [2] подаётся на устройство [3, 4], в котором закреплён испытываемый материал. В результате воздействия импульса тока на поверхности образца возникает градиент температуры. Вследствие этого разные части образца расширяются на разную величину. Таким образом, изменяя силу тока, изменяем параметры теплового удара. Экспериментально установлено, что разовое кратковременное ( $70\text{--}100\text{ мс}$ ) воздействие электроразрядной плазмы (яркостная температура доходила до  $4500\text{ K}$ ) приводит к изменению поверхности образца. Критерием стойкости образца к тепловому удару служит степень оплавления, отслоения или его разрушение.

Эксперименты показали, что в зависимости от испытываемого материала (стекло, ситалл, текстолит и др.) степень воздействия различна. Площадь воздействия  $\approx 300\text{ см}^2$  и более. Толщина образца варьировалась от 3 до 10 мм. Возникающие тепловые градиенты на стадии нагрева и охлаждения также, в зависимости от условий эксперимента, приводят к оплавлению и частичному расслоению образца. Предлагаемый способ испытания стойкости диэлектрических материалов описан в [5].

Полученные результаты по испытанию диэлектрических материалов на кратковременный (менее  $0.1$  с) тепловой удар позволяют говорить о перспективности поверхностного кратковременного теплового воздействия (удара) на теплонагруженные диэлектрические материалы. Следует отметить, что этот способ также позволяет проводить испытания композитных материалов.

### *Список литературы*

1. ГОСТ ИЕС 60811-509-2015 Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Часть 509. Механические испытания. Испытание изоляции и оболочек на стойкость к растрескиванию (испытание на тепловой удар). Москва, Стандартинформ 2016. 11 с.
2. Кунин В.Н., Конопасов Н.Г., Плешивцев В.С. Индукционный накопитель электрической энергии // Приборы и техника эксперимента, 1988. №3, С.103-104.
3. Фуров Л.В. Устройство кумуляции плазменных сгустков // Патент на изобретение №2692689, 26.06.2019, Бюл. №18.
4. Фуров Л.В. О возможности испытания диэлектрических материалов на тепловой удар // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2020, том 9, № 6, с. 489-492.
5. Фуров Л.В. Способ испытания стойкости диэлектрических материалов на тепловой удар // Патент на изобретение №2775995, 12.07.2022, Бюл. № 20.



## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ TiNiCu С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Аморфно-кристаллические слоистые ленты из сплава TiNiCu с эффектом памяти формы получены с помощью технологии быстрой закалки из жидкого состояния с разной толщиной кристаллического слоя. Проведена обработка методом криогенного термоциклирования двумя различными способами. Установлено влияние криогенной обработки на свойства сплавов, в частности, на микроструктуру, температуры и энтальпию мартенситного фазового превращения.

D.A. KHACHATRIAN<sup>1</sup>, A.V. SHELYAKOV<sup>1</sup>, N.N. SITNIKOV<sup>1,2</sup>  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
<sup>2</sup>SSC «Keldysh Research Center», Moscow

## FEATURES OF THE STRUCTURE AND MARTENSITE TRANSFORMATION IN AMORPHOUS-CRYSTALLINE TiNiCu SHAPE MEMORY ALLOYS

Amorphous-crystalline layered TiNiCu alloy ribbons with shape memory effect were obtained with varying crystalline layer thickness using rapid quenching from liquid state. They were subjected to two different types of cryogenic thermocycling. The changes of properties of the alloys were analyzed, specifically the microstructure, temperatures and enthalpy of martensitic phase transformation.

Материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) из-за своих уникальных свойств активно используются во многих областях, например, в робототехнике, авиационных и космических технологиях, энергетике, медицине, транспорте [1]. Последние достижения в области микроэлектромеханических систем (МЭМС) делают актуальным спрос на простые, точные и надежные инструменты для манипулирования на микроуровне. Сплавы с ЭПФ имеют существенные преимущества по сравнению с другими методами активации, что недавно позволило продемонстрировать их весьма успешное использование в МЭМС. Способность сплавов с ЭПФ сохранять свои характеристики на микроуровне дает возможность создавать на их основе миниатюрные исполнительные устройства: микрозахваты, микропереключатели, микроклапаны, микронасосы, микродатчики [2].

В данной работе сплавы квазибинарной системы TiNi-TiCu с содержанием Cu 25 ат.% были получены в виде тонких лент толщиной 30-50 мкм с использованием технологии быстрой закалки из жидкого состояния при скоростях охлаждения расплава, обеспечивающих формирование кристаллического слоя на свободной (неконтактной) стороне ленты. Исследования поперечной микроструктуры аморфно-кристаллических лент в сканирующем электронном микроскопе показало, что толщина кристаллического слоя  $d$  варьируется от 6 до 13 мкм в зависимости от скорости закалки. Часть образцов подвергалась воздействию криогенного термоциклирования, которое проводилось двумя способами: 1) 2 мин в жидком азоте при температуре  $-196^\circ\text{C}$ , затем 1 мин в кипящей воде при  $100^\circ\text{C}$ , всего 10 циклов; 2) 30 мин в жидкий азоте, после чего 1 мин в кипящей воде однократно.

Установлено, что криогенное термоциклирование оказывает влияние как на микроструктуру сплавов, так и на критические температуры и энтальпию мартенситного превращения (МП). В частности, результаты исследований методом дифференциальной сканирующей калориметрии показали, что для разных образцов наблюдались разные изменения в свойствах МП (рис. 1). Для образцов 435 с  $d = 10$  мкм обработка 1 привела к понижению температур фазового перехода, в то время как после обработки 2 они возросли, при этом наблюдалось увеличение энтальпии обратного МП. В образцах АК-25 с  $d = 13$  мкм при обеих обработках температуры перехода увеличились.

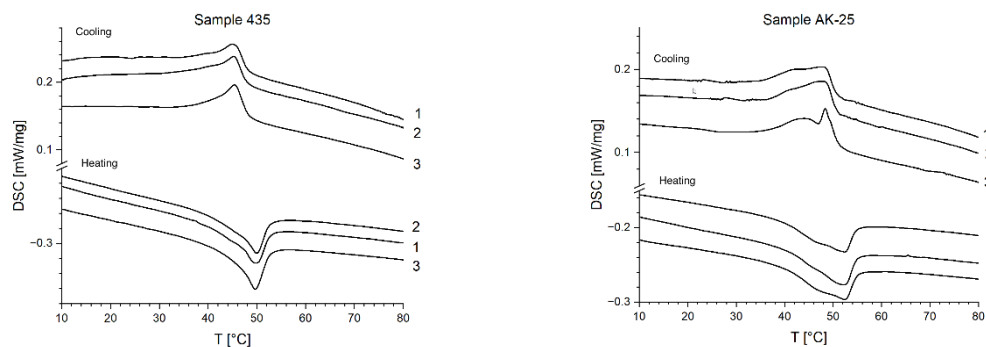


Рис. 1. ДСК-кривые образцов 435 и АК-25: 1 – исходное состояние после закалки, 2 – обработка 1, 3 – обработка 2.

### Список литературы

1. Mohd Jani J, Leary M, Subic A, Gibson MA (2014) Mater. Des. 56:1078-1113
2. Nespoli A, Besseghini S, Pittaccio S, et al (2010) Sensors Actuators, A Phys. 158:149-160.

Д.Х. ХУСАНОВА<sup>1</sup>, Ж.В. ОЧИЛОВ<sup>1,2</sup>, С.З. МИРЗАЕВ<sup>1</sup>, У.Б. ХАЛИЛОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>3</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛА ПЕРИЛЕНА ДО НУКЛЕАЦИИ: ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Используя моделирование реактивной молекулярной динамики, мы исследовали образование кластеров до нуклеации для трех типов молекул перилена в вакууме и в водной среде. Это исследование помогает лучше понять ранние этапы синтеза органических нанокристаллов перилена.

D.H. HUSANOVA<sup>1</sup>, J.V. OCHILOV<sup>1,2</sup>, S.Z. MIRZAEV<sup>1</sup>, U.B. KHALILOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>3</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## SIMULATION OF A PERYLENE NANOCRYSTAL BEFORE NUCLEATION: THE ENVIRONMENTAL EFFECT

Using reactive molecular dynamics simulations, we investigated the formation of pre-nucleated clusters for three types of perylene molecules in a vacuum and in an aqueous environment. This study helps to better understand the early steps in the synthesis of organic perylene nanocrystals.

In today's nanotechnology, understanding the synthesis mechanisms of organic nanocrystals leads to a significant increase in their applications. [1]. Despite the tremendous research efforts, the early stages (including a pre-nucleation stage) of the synthesis of perylene-based nanocrystals still remain elusive [2,3]. In this study, we investigate the formation processes of pre-nucleated clusters of three types of perylene ( $C_{20}H_{14}$ ,  $C_{21}H_{14}O$ , and  $C_{22}H_{24}O_2$ ) molecules in a vacuum and aqueous environment using reactive molecular dynamics (MD). The obtained results show that while two kinds of dimer structures, i.e., "face-to-face" and "face-to-edge" molecular stacking structures are formed in a vacuum, in the water environment, however, these molecular dimers are formed only in a face-to-face position (Fig. 1). The results showed that the retardation of face-to-face positions is caused by hydrogen bonds formed between perylene and water molecules. Furthermore, we found that the supply rate of perylene molecules determines the style of ordering and the direction of cluster growth.

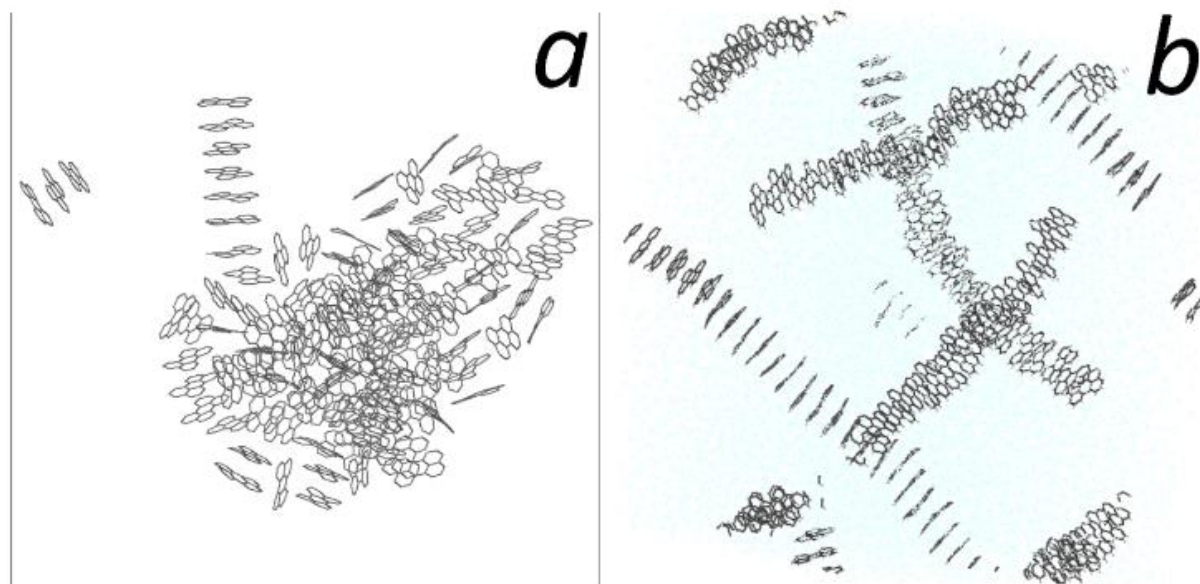


Fig.1. The formation of perylene clusters (a) in a vacuum and (b) in a water environment.

### Список литературы

1. R.J. Davey, et. al. *Angew. Chem. Int.* 2013, 52, 2166.
2. D. Gebauer, et. al. *Chem. Soc. Rev.* 2014, 43, 2348.
3. U. Khalilov, et. al. *Uzbek J. Phys.* 2021, 23, 7.

Ф.И. ЧУДАРИН, А.Д. СЫТЧЕНКО, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ

*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МОЗАИЧНЫХ КАТОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ РЗМ, ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ MoSi<sub>2</sub>**

Изготовлены сегменты для мозаичных мишеней-катодов, содержащих редкоземельные металлы (РЗМ), в трёх вариантах: металлические сегменты, сегменты из смесей порошков Mo и оксидов РЗМ, сегменты из La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. С помощью мозаичных мишеней получены покрытия в режимах DCMS и HIPIMS. Исследованы структура, механические и трибологические свойства, жаростойкость и термическая стабильность покрытий.

F.I. CHUDARIN, A.D. SYTCHENKO, PH.V. KIRUHANTSEV-KORNEEV

*University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

## **PRODUCTION AND APPLICATION OF MOSAIC CATHODES CONTAINING REM FOR MAGNETRON SPUTTERING OF MoSi<sub>2</sub> BASED OXIDATION-RESISTANT COATINGS**

Segments for mosaic cathode targets containing rare earth metals (REM) were made in three versions: metal segments, segments from mixtures of Mo powders and REM oxides, segments from La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Mosaic targets were used to obtain coatings in DCMS and HIPIMS modes. The structure, mechanical and tribological properties, heat resistance and thermal stability of coatings are investigated.

Легирование покрытий Mo-Si-B редкоземельными металлами (РЗМ) приводит к повышению жаростойкости и термической стабильности. Как правило, подобные многокомпонентные покрытия получают методом магнетронного напыления (MS). Введение легирующих элементов в состав покрытий можно осуществлять при использовании нескольких элементных, одной композиционной или мозаичной мишени. Последний технологический способ наиболее целесообразен при работе с дорогостоящими РЗМ. Целью работы являлось изготовление мозаичных катодов, содержащих Y, Nd, La, и их опробование для MS жаростойких покрытий на основе MoSi<sub>2</sub>.

Для осаждения покрытий использовались мишени MoSi<sub>2</sub>-MoB-(ZrB<sub>2</sub>/HfB<sub>2</sub>) Ø120×10 мм и сегменты, содержащие РЗМ. В качестве исходных компонентов для изготовления сегментов применялись порошки Nd<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (НО-Е), La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ЛаО-Д), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ИтО-И), Y (Ит-1), La (ЛаЭ-0), Mo (ПМ 99,95), Si (76КЭФ1). Подготовка порошковых смесей проводилась в шаровой вращающейся мельнице МФ-1, прессование проводилось на ручном гидравлическом прессе П-50 в стальной прессформе Ø10 мм при давлении 800 МПа, спекание осуществлялась в тлеющем разряде. Осаждение покрытий методом MS осуществлялось с помощью установки на базе вакуумной системы УВН-2М. Блок питания Pinnacle Plus Advanced Energy использовался для управления параметрами осаждения в режиме постоянного тока (DCMS). Мощность составляла 1 кВт. Система TruPlasma 4002 Trumpf использовалась для осуществления высокомоощного импульсного распыления (HIPIMS). Средняя и пиковая мощность: 1 и 74 кВт, соответственно.

Результаты показали, что установка металлических сегментов позволяет получать желаемый состав покрытий, но при высоких мощностях (HIPIMS) происходит сплавление сегментов Y с мишенью, а сегментов La и в режиме DCMS. В случае порошков Nd<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обладающих высоким электросопротивлением, бомбардировка ионами не приводит к эффективному распылению материала. Сегменты из смесей порошков оксидов РЗМ и Mo не разрушаются под воздействием тлеющего разряда и позволяют осуществлять перенос РЗМ в состав покрытий. Однако увеличение содержания молибдена при использовании сегментов «Mo-оксид РЗМ» приводит к снижению жаростойкости покрытий. Поэтому лучшим решением являются сегменты из смесей порошков La и Si. Избыток Si должен повысить жаростойкость покрытий, поскольку служит источником для формирующегося при нагреве на воздухе защитного слоя SiO<sub>2</sub>. Установлено, что в процессе спекания произошло оплавление La (T<sub>пл</sub> = 920 °С), его взаимодействие с Si с образованием LaSi<sub>2</sub> (T<sub>пл</sub> = 1520 °С). Такой подход позволяет вводить РЗМ в состав покрытий без потери жаростойкости. Установлено, что с увеличением количества сегментов: РЗМ, Mo+оксиды РЗМ, LaSi<sub>2</sub> закономерно увеличивается концентрация РЗМ в составе покрытия. Исследованы структура, механические и трибологические свойства, жаростойкость и термическая стабильность покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00117-П).

## ВТСП ПРОТОТИП КВАДРУПОЛЬНОГО МАГНИТА НОВОГО НУКЛОТРОНА

Представлена конструкция прототипа сверхпроводящего квадрупольного магнита с ВТСП-обмоткой для нового ускорителя Нуклотрон. Также представлены результаты первых криогенных испытаний при температурах от 4.5 К до 31 К.

A.V. SHEMCHUK, M.S. NOVIKOV, D.N. NIKIFOROV, G.G. KHODZHIBAGIYAN, M.V. ILYIN  
*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

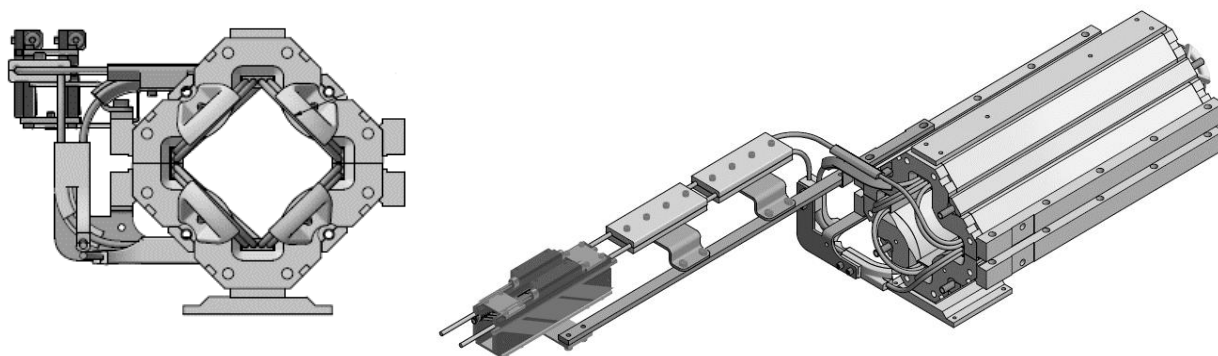
## HTS PROTOTYPE OF QUADRUPOLE MAGNET OF NEW NUCLOTRON

The design of a prototype superconducting quadrupole magnet with an HTSC winding for the new Nuclotron accelerator is presented. The results of the first cryogenic tests at temperatures from 4.5 K to 31 K are also presented.

Проводится разработка диполей и квадрупольей с обмотками из ВТСП кабеля типа Нуклотрон для модернизации магнитной системы синхротрона Нуклотрон [1]. Обмотки новых магнитов могут быть изготовлены из ВТСП кабеля нуклотронного типа проточным охлаждением до 50-65 К.

Для реализации задуманного, необходимо решить две основные задачи: 1) Разработать технологию изготовления СП-магнитов с обмоткой из ВТСП-кабеля; 2) Разработать методику облучения лент/обмоток для повышения криттока кабеля при температурах 50-65 К и магнитных полях до 1.8 Т.

В качестве первого прототипа магнита выбрана квадрупольная линза (см. *Рис. 1*) ввиду сложной геометрии ее СП-обмотки. Железное ярмо использовалось такое же, как и в магнитной структуре бустера проекта NICA. Основной целью на данном этапе являлось получение стабильной работы с токами до 10 кА при температурах до 30 К для разных режимов ввода тока. Изготовлена ВТСП-обмотка (в кабеле 18 лент шириной 4 мм) на модернизированном стапеле для формования и запекания, произведен монтаж обмотки в железное ярмо. Для фиксации обмоток и выводов разработаны суппорты и ложементы с применением аддитивных технологий (фотополимерная печать криогенностойкими материалами).



*Рис. 1.* Общий вид ВТСП-прототипа квадрупольной линзы для нового Нуклотрона.

Так как ВТСП кабель состоит из 18 лент в 6 слоев, а каждая лента имеет в своей структуре буферные слои (не проводящие ток), разработана технология изготовления сверхпроводящих ВТСП-спаев, которая позволяет «правильно» заводить ток на каждую ленту и готова к применению для серийного производства.

Успешно проведены криогенные испытания прототипа ВТСП-квадрупольного магнита. По результатам испытаний удалось получить стабильную работу с током амплитудой 10 кА на скоростях 20-40 кА/с при температуре обмотки до 31 К. Измерены сопротивления спаев на рабочем токе (10 кА), которое составило 1.6 нОм.

На данный момент идет подготовка повторных криогенных испытаний с измененной схемой нагрева газообразного гелия для работы со скоростями завода тока 5-20 кА/с, планируется работа с током при температурах 50-78К, а также подъем амплитуды до 15 кА, исследования распространения нормальной зоны.

### *Список литературы*

1. N. Khodzhbagiyani et al., "Quadrupole Superconducting Model for Update of the Nuclotron Synchrotron, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 6, pp. 1-4, Sept. 2022, Art no. 4003704, doi: 10.1109/TASC.2022.3151579.

А. ЭРГАШЕВА<sup>1</sup>, К. МЕХМОНОВ<sup>1</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Антверпенский университет, Антверпен, Бельгия

## ВЛИЯНИЕ КАТАЛИЗАТОРА НА ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНДОЭДРАЛЬНОГО КАРБИНА

Используя моделирование молекулярной динамики, мы обнаружили, что эндоэдральные структуры чистого и металлизированного карбина могут быть выращены соответственно в случае наночастиц катализатора никеля и золота, встроенных в углеродную нанотрубку.

A. ERGASHEVA<sup>1</sup>, K. MEHMONOV<sup>1</sup>, U. KHALILOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS Uz, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## THE EFFECT OF CATALYST IN THE NUCLEATION OF ENDOHEDRAL CARBYNE

Using molecular dynamics simulations, we found that the endohedral structures of pure and metalated carbyne can be grown, respectively, in the case of nickel and gold catalyst nanoparticles embedded in a carbon nanotube.

Despite tremendous experimental and theoretical studies on the carbyne synthesis [1-3], the precise role of metal catalysts remains unclear in the catalyzed growth of encapsulated carbyne in carbon nanotubes.

In our simulation-based study, we investigate the effect of different catalyst nanoparticles on the nucleation of endohedral carbyne in double-wall carbon nanotubes (DWNT) using carbon growth precursors, respectively.

Preliminary results showed that although in both cases the carbon chain is formed, the morphology of the resulting structures is different. In particular, in the synthesis of carbyne using a nickel catalyst, metal atoms are located only at two ends of the chain, while in the case of a gold catalyst, metal atoms spread along the chain (Fig.1). Consequently, a metalated carbyne [4] can be grown in the case of Au catalyst.

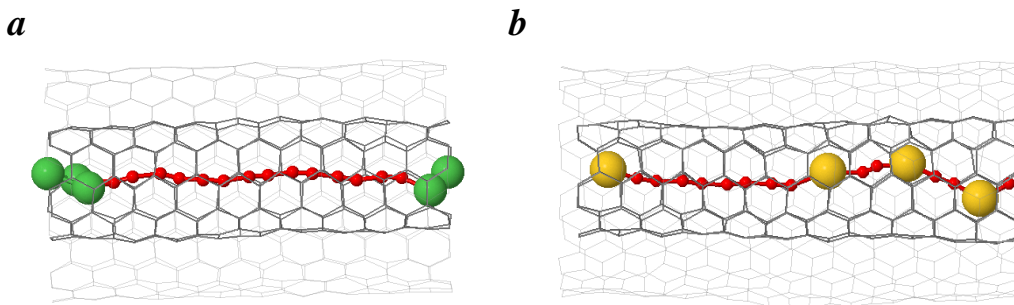


Fig. 1. The synthesis of Ni and Au-catalyzed endohedral carbyne (*a* and *b* respectively) in DWCNT. C, Ni and Au atoms are in red, green and yellow, respectively. C atoms of DWCNT are not shown for sake of clarity.

### Список литературы

1. U. Khalilov et al. Carbon 2019, 153, 1-5.
2. U. Khalilov et al. Carbon 2021, 171, 72-78.
3. K. Zhang et al. Chinese Chemical Letters 2020, 31, 1746-1756.
4. K. Hyunsub et al. Carbon 2023, 205, 546-551

## РАСЧЕТ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdS/ZnSe/ZnSSe С ЗОННОЙ ДИАГРАММОЙ 2-ГО ТИПА

Представлены результаты расчета гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с зонной диаграммой 2-го типа при низкой ( $T \sim 15$  K) и комнатной ( $T \sim 300$  K) температурах для различных уровней ее возбуждения. Проведенные расчеты показывают, что спектр спонтанного излучения (а также спектр усиления) с повышением интенсивности накачки сдвигается в коротковолновую сторону, что связано с искривлением зонной диаграммы гетероструктуры 2-го типа вблизи квантовой ямы. При этом интеграл перекрытия волновых функций электрона и дырки также увеличивается.

N.R. YUNUSOVA<sup>1</sup>, V.I. KOZLOVSKY<sup>1,2</sup>, M.R. BUTAEV<sup>2</sup>, Y.K. SKASYRSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

## CALCULATION OF THE CdS/ZnSe/ZnSSe HETEROSTRUCTURE WITH A TYPE II BAND DIAGRAM

The results of calculating the CdS/ZnSe/ZnSSe heterostructure with a type II band diagram at low ( $T \sim 15$  K) and room ( $T \sim 300$  K) temperatures for various levels of its excitation are presented. The calculations show that the spectrum of spontaneous radiation (as well as the amplification spectrum) shifts to the short-wave side with an increase in the pumping intensity, which is related with the curvature of the band diagram of the type II heterostructure near the quantum well. At the same time, the overlap integral of the electron and hole wave functions also increases.

В данной работе сообщается о результатах расчета гетероструктуры (ГС)  $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$  (~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$  (~90 нм) с зонной диаграммой (ЗД) 2-го типа с целью определения возможности ее использования в полупроводниковых лазерах с оптической накачкой, излучающих в зеленой области спектра. Расчет основывался на согласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона. Расчеты проводились при низкой ( $T \sim 15$  K) и комнатной ( $T \sim 300$  K) температурах для различных уровней возбуждения ГС. На рис. 1-а,б представлены расчётные спектры спонтанного излучения ГС при двух температурах, 15 K (а) и 300 K (б), и при различных концентрациях неравновесных носителей. На рис. 1,в представлена расчетная ЗД рассматриваемой ГС для двух крайних уровней возбуждения при низкой температуре. Расчетное значение коэффициента оптического усиления для данной ГС при комнатной температуре на длине волны ~525 нм при концентрации неравновесных носителей  $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  составляет выше  $5000 \text{ см}^{-1}$ , что достаточно для реализации полупроводниковых лазеров зеленого диапазона на основе данной ГС при оптимальных зеркалах. Возможность достижения столь высокого коэффициента усиления связано с тем, что при одном и том же уровне накачки в ГС 2-го типа будет создаваться более высокая концентрация неравновесных электронно-дырочных пар из-за большего времени жизни носителей.

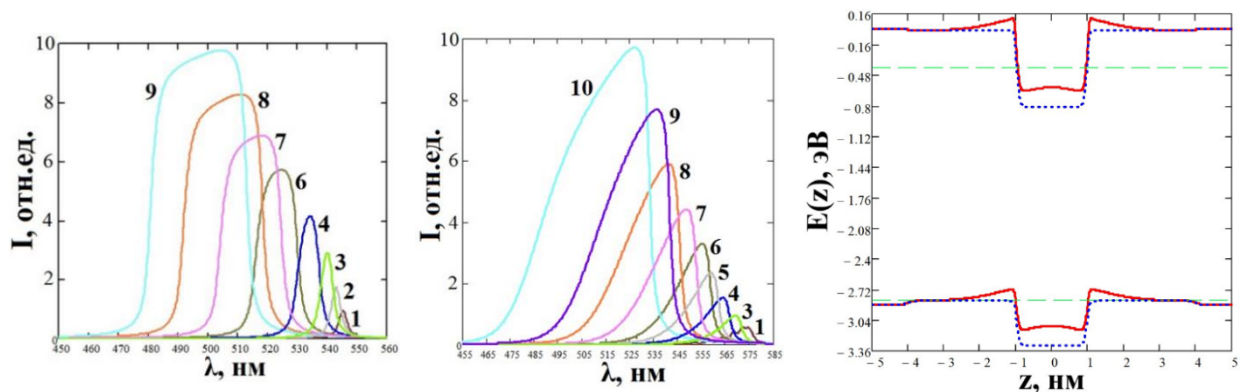


Рис. 1. Расчетные спектры спонтанного излучения ГС  $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$  (~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$  (~90 нм) при температуре 15 K (а) и 300 K (б) и различных концентрациях неравновесных носителей: 1 –  $0.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 2 –  $0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 3 –  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 4 –  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 5 –  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 6 –  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 7 –  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 8 –  $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 9 –  $10 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 10 –  $15 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; в) ЗД ГС при малой ( $\sigma_{e-h} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$  – синяя пунктирная линия) и большой ( $\sigma_{e-h} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$  – красная сплошная линия) концентрации неравновесных носителей и при низкой температуре. Штриховые зеленые линии соответствуют нижайшим уровням размерного квантования для электрона и дырки при  $\sigma_{e-h} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований грантом № 20-32-90022.

**Секция**  
**УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И**  
**РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., проф. Полозов Сергей  
Маркович

Секретарь секции

– к.т.н., доцент Гусарова Мария  
Александровна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8226

E-mail: SMPolozov@mephi.ru, MAGusarova@mephi.ru



Т.В. КУЛЕВОЙ

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

## КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ DARIA

В Российской Федерации в рамках Программы развития синхротрон-нейтронных исследований ведется разработка пилотного образца источника нейтронов на основе линейного ускорителя протонов DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Application). В данной работе представлен текущий статус работ, обсуждаются полученные результаты и планы по развитию и реализации проекта.

T.V. KULEVOY

National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

## COMPACT NEUTRON SOURCE DARIA

DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Application) is under development in Russian Federation in framework of of the Federal Research and Engineering Programme for Development of Synchrotron and Neutron Studies and Research Infrastructure for 2019-2027. The current status of the facility is presented. The obtained results and next steps of facility development are discussed.

Компактные источники нейтронов на базе ускорителей заряженных частиц призваны обеспечить сообщество исследователей пучками нейтронов, резкое сокращение числа которых наблюдается в последнее время с усиливающимся трендом отказа от строительства ядерных реакторов вообще и исследовательских в частности. В Российской Федерации в рамках Программы развития синхротрон-нейтронных исследований ведется разработка пилотного образца источника нейтронов на основе линейного ускорителя протонов DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Application) [1]. В возглавляемую НИЦ «Курчатовский институт» колаборацию входят специалисты из Санкт-Петербургского государственного университета, Института прикладной физики РАН, Института ядерных исследований РАН, Балтийского государственного университета им. И.Канта, Института физики металлов Уральского отделения РАН. Генерация нейтронного пучка достигается взаимодействием с бериллиевой мишенью импульса пучка протонов с энергией 13 МэВ, длительностью 100 мкс, амплитудой 100 мА и частотой повторения импульсов – 100 им/с. В результате на исследуемый образец будет доводиться пучок нейтронов сопоставимыми с интенсивностью, достигаемой сегодня на российском флагманском импульсном реакторе ИБР2 в ОИЯИ г.Дубна. Предполагается, что установка будет оснащена 2-3 нейтронными каналами. На данный момент ведутся работы по разработке ключевых элементов установки – ионного источника на основе электронно-циклотронного резонанса (ИПФ РАН), резонаторов ускоряющих структур RFQ и DTL (ККТЭФ НИЦ КИ), бериллиевой мишени (БФУ им. И. Канта), различного типа модераторов (СПбГУ и ОИЯИ), нейтроннопроводов (СПбГУ и ИФМ УрО РАН), а также системы диагностики пучка (ИЯИ РАН). Параллельно ведется разработка методик исследований на генерируемых пучках нейтронов, а также подготовка кадров для работы на данных установках, для чего разработаны и успешно реализуются две программы повышения квалификации. В данной работе представлен текущий статус работ, обсуждаются полученные результаты и планы по развитию и реализации проекта.

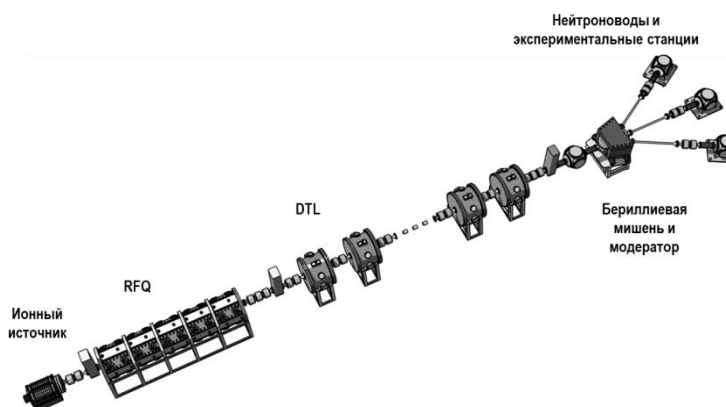


Рисунок 1 – схема компактного источника нейтронов DARIA

### Список литературы

1. Compact Neutron Sources for Condensed-Matter Physics in Russia and Abroad: State of Affairs and Prospects, Pavlov K.A.; Konik P.I.; Kovalenko N.A.; Kulevoy T.V.; Serebrennikov D.A.; Subbotina V.V.; Pavlova A.E.; Grigorev S.V., Crystallography Reports Volume 67, Issue 1, Pages 3 – 17, February 2022

Ю.В. СЕНИЧЕВ, А.Е. АКСЕНТЬЕВ, С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, А.А. МЕЛЬНИКОВ  
В.П. ЛАДЫГИН, Е.М. СЫРЕСИН

*Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия  
Объединённый Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия*

## РАССМОТРЕНИЕ АДАптиРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ПОИСКА ЭДМ

Рассмотрена возможная магнитооптическая структура Нуклотрона, создающая условия проведения эксперимента по измерению электрического дипольного момента дейтрона. Представлены основные проблемы, требующие решения при реконструкции Нуклотрона под заявленную задачу, и способы их решения.

Y.V. SENICHEV, A.E. AKSENTYEV, S.D. KOLOKOLCHIKOV, A.A. MELNIKOV

*Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia*

V.P. LADYGIN, E.M. SYRESIN

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

## CONSIDERATION OF THE ADAPTED NUCLOTRON STRUCTURE FOR EDM SEARCH

A possible magneto-optical structure of the Nuclotron allowing for the measurement of the electric dipole moment of the deuteron has been considered. Basic problems with respect to the realization of the proposed task that need to be addresses in reconstruction, as well as ways to solve them, have been presented.

В настоящее время рассматривается возможность модернизации магнитооптической структуры Нуклотрона [1] в ОИЯИ в связи с ревизией всех функций отдельных частей сооружаемого ускорительного комплекса НИКА. В этой работе мы рассмотрели магнитооптическую структуру Нуклотрона адаптированную для поиска электрического дипольного момента дейтрона (dEDM). При решении этой задачи необходимо было решить четыре проблемы: (1) реализовать концепцию «квази-замороженного спина» [2] в предлагаемой оптике, что в свою очередь влечёт необходимость (2) увеличения длин межарочных прямых промежутков, (3) обеспечения нулевой дисперсии на прямых участках и (4) сохранение длины кольца ускорителя с учетом размещения требуемого оборудования.

Первая проблема определена основополагающей частью задачи, идеей регистрации сигнала dEDM. С этой целью в структуру вводятся дополнительные электростатические дефлекторы с отрицательной кривизной, что позволяет в интеграле сохранять направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции «квази-замороженного спина» в ускорителе. Одновременно они решают четвертую проблему, сохранение достаточного количества места для существующего оборудования.

Вторая проблема, увеличение прямых участков до требуемой длины, решается за счет увеличения максимального магнитного поля в поворотных магнитах до величины 1.8 Тесла.

Третья проблема решается выбором набега фазы радиальных колебаний на арках.

В итоге мы можем потенциально рассматривать возможность исследования электрического дипольного момента дейтрона в Нуклотроне.

### *Список литературы*

1. B. V. Vasilishin et al. Preprint of JINR 9-86-512, Dubna, 1986
2. Senichev, et al., Quasi-frozen spin method for EDM deuteron search, 6th Int Particle Accelerator Conference IPAC2015, Richmond, VA, USA doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA044

В.С.ДЮБКОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НА ОБРАТНОМ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЙАНИИ В НИЯУ МИФИ\*

Рассмотрена структура проектируемого в НИЯУ МИФИ компактного рентгеновского источника на обратном комптоновском рассеянии и динамика пучка в ЛУЭ-инжекторе и накопительном кольце. Исследованы особенности коллективных эффектов в накопительных кольцах таких установок по сравнению с источниками СИ четвертого поколения. Рассчитаны пороги продольной микроволновой неустойчивости и поперечной неустойчивости связанных мод.

V.S.DYUBKOV, S.M. POLOZOV, V.I. RASHCHIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## COMPACT COMPTON BACKSCATTERING X-RAY SOURCE DESIGNED AT NRNU MEPhI

Structure of the compact X-ray source based on Compton back scattering designed at the National Research Nuclear University MEPhI and beam dynamics in linac and storage ring is considered. The features of collective effects in the storage rings of such devices are studied in comparison with fourth-generation SR sources. The thresholds of longitudinal microwave instability and transverse mode-coupling instability (TMCI) are calculated.

Работы по созданию компактных источников монохромного рентгеновского излучения на основе обратного комптоновского рассеяния при взаимодействии лазерного излучения с электронным пучком в настоящее время ведутся не только в крупных научных центрах, но и даже в большей мере в небольших университетских лабораториях. Трудно переоценить важность таких установок для подготовки современных специалистов в таких областях как материаловедение, биология и медицина, химия и физика быстротекущих процессов и т. п.

В проектируемом в НИЯУ МИФИ компактном источнике на обратном комптоновском рассеянии [1-2] в качестве инжектора используется линейный ускоритель электронов с фотопушкой с регулируемой в диапазоне 20 -60 МэВ энергией, который поставляет пучок в накопительное кольцо для повышения его интенсивности и яркости.

Магнитная структура накопительного кольца и его оптические функции представлены на рисунке 1.

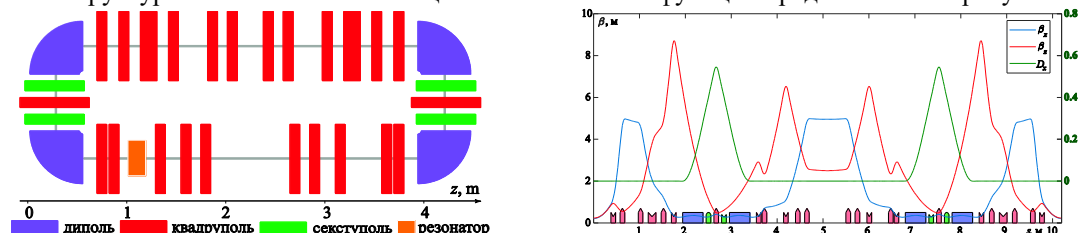


Рис. 1. Магнитная структура (слева) и оптические функции (справа) накопительного кольца

В отличие от достаточно хорошо изученной динамики пучка в больших накопительных кольцах (периметры порядка км) современных источников СИ на энергию в несколько ГэВ [3-4], в малых кольцах (периметр порядка десятка метров) имеются существенные отличия, требующие особого подхода.

Прежде всего это пренебрежимо малые потери энергии на синхротронное излучение (порядка единиц эВ) и времена жизни в десятки миллисекунд, определяемые эффектом Тушека, в силу чего пучок не успевает достичь стационарного состояния. Кроме того, отличаются и коллективные эффекты, препятствующие получению пучков высокой плотности и малого эмиттанса. К ним в первую очередь следует отнести: эффект отдачи из-за обратного комптоновского рассеяния, когерентное синхротронное излучение, пространственный заряд пучка, резистивные и геометрические наведенные поля в камере накопителя, внутрипучковое рассеяние. В классических источниках СИ первый эффект из перечисленных отсутствует, а два следующих пренебрежимо малы. В комптоновском источнике когерентное синхротронное излучение вследствие миллиметровой длины сгустка оказывается преобладающим. На втором месте по величине вклада стоит поле пространственного заряда, и только на третьем находятся наведенные пучком поля, оказывающие наибольшее влияние в больших источниках СИ.

Исследована продольная и поперечная динамика электронного пучка в комптоновском источнике. Определен порог микроволновой неустойчивости, вносящей основной вклад в удлинение сгустка и рост его энергетического спектра, а также порог неустойчивости поперечных связанных мод (Transverse Mode-Coupling Instability, TMCI).

### Список литературы

1. Dyubkov V.S., at al. // Proc. of IPAC'21, Campinas, Brazil, 2021, P. 186-188.
2. Dyubkov V.S., Polozov S.M. // Proc. of RuPAC 2021, Alushta, Russia, 2021, P.277-279.
3. Carver L.R., at al. // Proc. of IPAC'21, Campinas, Brazil, 2021, P. 425-428.
4. Chae Y., at al. // Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 12, P. 1968-1972.

\*Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, номер проекта 19-29-12036

В.С. ДЮБКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## МАСШТАБИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СИНХРОТРОНА СИЛА

Произведено масштабирование магнитной структуры накопительного электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ четвертого поколения создаваемого на базе НИЦ «Курчатовский институт». Рассчитаны параметры накопительного синхротрона, обеспечивающие проектные параметры электронных пучков в нем. Определены динамическая апертура, энергетический акцептанс и тушековское время жизни пучков, как в отсутствии ошибок юстировки элементов магнитной структуры и значений полей на замкнутой орбите, так и при их наличии, с учетом потерь на синхротронное излучение и квантового возбуждения.

V.S. DYUBKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

## SYLA SYNCHROTRON LATTICE SCALING

Scaling the lattice of the fourth-generation 6 GeV synchrotron radiation facility of the National research center “Kurchatov institute” was performed. Storage ring parameters, ensure project parameters of electron bunches, were calculated. Dynamic aperture, momentum acceptance and Touschek lifetime were defined under synchrotron radiation and quantum excitation processes both for the perfect machine and in the presence of errors.

Развитие современных технологий позволяет создавать специализированные синхротроны, предназначенные исключительно для генерации синхротронного излучения с использованием встраиваемых устройств, таких ондуляторы и вигглеры. Такие специализированные кольцевые ускорители электронов получили название источников СИ 4-го поколения. В настоящее время в нашем Отечестве на различных стадиях проектирования находятся три новых источника синхротронного излучения 4-го поколения «СКИФ» (Кольцово), «СИЛА» (Протвино), «РИФ» (о. Русский). Накопительный синхротрон «СИЛА», создаваемый на базе НИЦ КИ, рассчитан на энергию электронов 6 ГэВ с равновесным значением горизонтального эмиттанса около 70 пм·рад [1]. Комплекс «СИЛА» будет состоять из накопительного синхротрона и лазера на свободных электронах. Также как и на большинстве аналогичных современных установок инжекция электронных пучков в накопительный синхротрон будет производиться при их энергии 6 ГэВ (top-up инжекция). В качестве инжектора будет использован линейный резонансный ускоритель с рабочей частотой 2,8 ГГц. Синхронизации линейного ускорителя и накопительного синхротрона «СИЛА» необходимо, чтобы рабочая частота резонаторов ВЧ системы накопителя была кратна частоте инжектора, т.е. быть равной 350 МГц. Поскольку ранее проект накопителя был выполнен для частоты резонаторов 352,2 МГц [2], для выбранной величины кратности 1296 изменение рабочей частоты резонаторов накопителя влечёт изменение величины его периметра на 6,934 м или 17,335 см в расчёте на каждый из 40 суперпериодов (структура регулярного суперпериода представлена на рисунке 1).

Изменение периметра накопителя требует перенастройки магнитной оптики для обеспечения проектных параметров электронных сгустков источнике СИ.

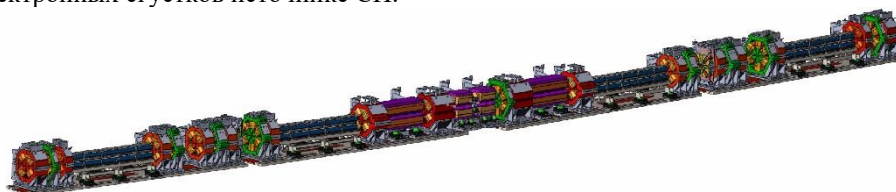


Рис. 1. Магнитная структура регулярного суперпериода накопителя «СИЛА»

В результате перенастройки магнито-оптических элементов накопителя удалось восстановить проектные параметры динамической апертуры (ДА) и энергетического акцептанса накопителя (МА), а также увеличить время жизни пучков по Тушеку ( $\tau_T$ ). Выполнен анализ бетатронных частот (field map analysis). Горизонтальный размер динамической апертуры в точке инжекции в отсутствии ошибок  $\pm 10$  мм, вертикальный – 2,5 мм. Средний размер ДА по 128 случайным наборам ошибок –  $\pm 7$  мм, вертикальный – 1,7 мм. Максимальное значение локального МА при суммарном амплитудном напряжении резонаторов накопителя 8 МВ составляет  $\pm 6,5\%$ , минимальное – 3,8%. Рассчитанное значение  $\tau_T$  в режиме равномерного заполнения накопителя 1296 электронными сгустками с зарядом 0,43 нКл и длиной 2,2 мм составляет чуть более 70 часов.

### Список литературы

1. Ковальчук М.В. и др., Источник синхротронного излучения четвертого поколения с рентгеновским лазером на свободных электронах “СИЛА”: концепция ускорительно-накопительного комплекса // Кристаллография, 2022, Т. 67, вып. 5. С. 726-734.
2. Liuzzo S. et al., USSR HMB Storage Ring Lattice Options // 12th IPAC, May 2021, Online, Brazil. TUPAB049.
3. Dyubkov V.S. et al. // Book of abs. LXXII Int. conf. NUCLEUS-22, Moscow, Russia, 11-16 July 2022, P. 336.

М.А. ГУСАРОВА, В.И. КАМИНСКИЙ, М.В. ЛАЛАЯН, С.В. МАЦИЕВСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИХ ИНТЕГРАЦИИ С СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ ПРОГРАММНЫМИ КОДАМИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

При разработке ускорителей заряженных частиц используется большое количество узкоспециализированных программ расчёта динамики частиц. Используемые в расчётах распределения электромагнитного поля обычно получают путём интерполяции данных коммерческих программ расчёта методом конечных элементов FEM. Такой подход вызывает значительные трудности, во первых, из-за встроения в эти программы систем ограничения использования, во вторых, из-за ограниченных возможностей автоматизации расчётов. К настоящему моменту существуют и хорошо разработаны свободно лицензируемые программные библиотеки, позволяющие без больших трудозатрат заменить собой функционал, предоставляемый коммерческими программами. Это, помимо экономии денежных ресурсов, позволяет значительно упростить интеграцию со специализированными кодами для расчёта ускорителей заряженных частиц и настройку распределённых вычислений на расчётных кластерах. В данной работе проводится исследование возможности использования связки свободно лицензированных библиотек и приложений для расчёта электромагнитных полей а также приводятся сравнение результатов расчётов электродинамических характеристик некоторых аксиально симметричных структур, полученных с использованием разработанного ядра прототипа кода на основе этих библиотек и коммерческих программ.

M.A. GUSAROVA<sup>1</sup>, V.I. KAMINSKIY<sup>1</sup>, M.V. LALAYAN<sup>1</sup>, S.V. MATSIEVSKIY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **OVERVIEW OF THE MODERN SOFTWARE LIBRARIES AND THEIR INTEGRATION INTO THE SPECIALIZED PARTICLE ACCELERATOR DEVELOPMENT CODES**

In the development of charged particle accelerators, a large number of highly specialized programs for calculating particle dynamics are used. The electromagnetic field distributions used in calculations are usually obtained by interpolating data from commercial FEM calculation programs. This approach causes significant difficulties, firstly, because of built in digital restriction management systems, and secondly, because of the limited possibilities for calculation automation. Nowadays, there are well-developed freely licensed software libraries that allow effortless replacement of the commercial programs functionality. This, in addition to saving financial resources, significantly simplifies integration with specialized codes for calculating charged particle accelerators and setting up distributed calculations on computational clusters. In this paper, the possibility of using a number of freely licensed libraries and applications for calculating electromagnetic fields is investigated; the results of electrodynamic characteristics calculations of some axially symmetric structures obtained using the developed code prototype based on these libraries and commercial programs are compared.

Большая часть коммерческих программ расчёта распределения электродинамических полей являются программами с графическим интерфейсом, а возможности автоматизации обычно ограничены выполнением пользовательских сценариев. Эти ограничения обусловлены устаревшей архитектурой этих программ и искусственно вводимыми ограничениями на их использование. Современные свободно лицензируемые программы при проектировании архитектуры обычно ставят во главу угла гибкость использования, для чего пользователю зачастую помимо графического интерфейса предоставляется также программный интерфейс, позволяющий автоматизировать работу программы. Большую популярность для этих целей завоевал язык программирования Python. Интерфейс на языке Python предоставляют использованные в данной работе функциональные блоки кода расчёта электромагнитных полей с использованием метода конечных элементов (МКЭ): программа построения объектов FreeCAD; программа генерации сеточного разбиения GMSH, библиотека расчёта с использованием МКЭ FeniCSx; программа визуализации результатов расчётов ParaView.

На основе перечисленного выше списка программ был написан прототип программы расчёта электромагнитных полей в аксиально симметричных ускоряющих структурах. Для расчёта была использована слабая формулировка уравнений Максвелла с добавлением штрафного слагаемого, благодаря чему удаётся эффективно отфильтровывать нефизичные результаты решения задачи на собственные значения. За счёт введения упрощения распространения только E или H волн, оператор ротора в уравнениях можно разделить на две независимых функции [2].

Было проведено сравнение результатов расчётов электродинамических характеристик при помощи написанного прототипа кода и одной из коммерческих программ на примере цилиндрического резонатора. Рассчитанные частота, добротность, шунтовое сопротивление и максимальная напряжённость электрического поля различаются меньше чем на 1%. Дальнейшие работы предполагают более обширное сравнение результатов расчётов а также написание библиотеки расчёта электромагнитных полей для интеграции со специализированными кодами расчёта динамики в ускорителях заряженных частиц.

### *Список литературы*

1. Arbenz, P. Solving Maxwell eigenvalue problems for accelerating cavities [Text] / P. Arbenz, R. Geus, S. Adam // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2001. — Feb. — Vol. 4, issue 2. — P. 022001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.4.022001>.
2. Hall, J. Finite Element Method for Axisymmetric Maxwell Equations [Text] / J. Hall.

Д.М. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, М.Ф. БЛИНОВ<sup>1</sup>, В.А. ВОСТРИКОВ<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия  
<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия  
**ДИНАМИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА СИНХРОТРОНА С ЭЛЕКТРОННЫМ  
ОХЛАЖДЕНИЕМ**

Исследовано влияние поперечной связи и фокусировки, которые создаются соленоидом секции охлаждения, на динамику частиц в синхротроне. Предложена оптимальная схема компенсации связи с использованием пары триплетов косых квадруполов. Произведен расчет вертикальной дисперсии, возбуждаемой полем тороидов, и проведена оптимизация оптики для ее подавления. Начато исследование динамической апертуры синхротрона, выявлены опасные нелинейные резонансы.

D.M. POPOV<sup>1,2</sup>, M.F. BLINOV<sup>1</sup>, V.A. VOSTRIKOV<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia  
<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**THE DYNAMIC APERTURE OF THE SYNCHROTRON WITH ELECTRON COLLER**

In the presented paper, the particle dynamics in the synchrotron with electron cooling are developed. The longitudinal magnetic field of cooling solenoid leads to coupling of transverse betatron oscillations. An optimal coupling compensating scheme with application of the pair triplets of skew quadrupoles is proposed. The vertical dispersion excited by toroid fields is calculated and minimized. The dynamic aperture is simulated and the nonlinear resonances amplitudes are suppressed.

Метод электронного охлаждения широко применяется в ионных ускорительных комплексах низкой и средней энергии, использующихся для научных, медицинских и других целей [1]. В ИЯФ СО РАН разрабатывается проект синхротрона с электронным охлаждением для технологических применений. В работе рассматривается динамика частиц в этом синхротроне. Связь поперечных бетатронных колебаний, возбуждаемая продольным магнитным полем соленоида секции охлаждения, обуславливает вертикальную дисперсию и сдвиги частот, зависящие от энергии. Вследствие чего, возникает необходимость компенсировать и локализовать поперечную связь в промежутке охлаждения. Компенсация связи выполнена с применением двух триплетов косых квадруполов, расположенных симметрично относительно соленоида, с антисимметричными градиентами. По результатам расчетов, проведенных в программе MADX [2], была спроектирована косая квадрупольная линза с магнитной длиной 15.3 см и максимальным градиентом 2.2 Т/м.

Вертикальное магнитное поле тороидов и корректирующих магнитов, расположенных на участке со связью, приводит к возбуждению вертикальной дисперсии, максимальное значение которой достигает  $D_y^{max} = 0.5$  м. Проведена оптимизация структуры синхротрона уменьшающая величину вертикальной дисперсии.

Регулярные секступольные линзы, использующиеся для коррекции хроматизма, возбуждают нелинейные резонансы, количество которых увеличивается при наличии связи. Используя дополнительные секступоли, расположенные в бездисперсионных промежутках, и варьируя градиенты регулярных секступольных линз возможно скорректировать хроматизм, добиваясь при этом уменьшения мощностей нелинейных резонансов для увеличения динамической апертуры синхротрона. Рабочая точка синхротрона  $\nu_x = 3.295$ ,  $\nu_y = 3.2$ , находится вблизи ряда резонансов, возбуждаемых секступолями. В первом порядке теории возмущений возбуждаются резонансы:  $3\nu_x = 10$ ,  $2\nu_y - \nu_x = 3$ , во втором:  $2\nu_x + 2\nu_y = 13$ ,  $4\nu_x = 13$ . Было произведено подавление нелинейных резонансов, что привело к увеличению динамической апертуры в достаточно широкой области частот (рис. 1).

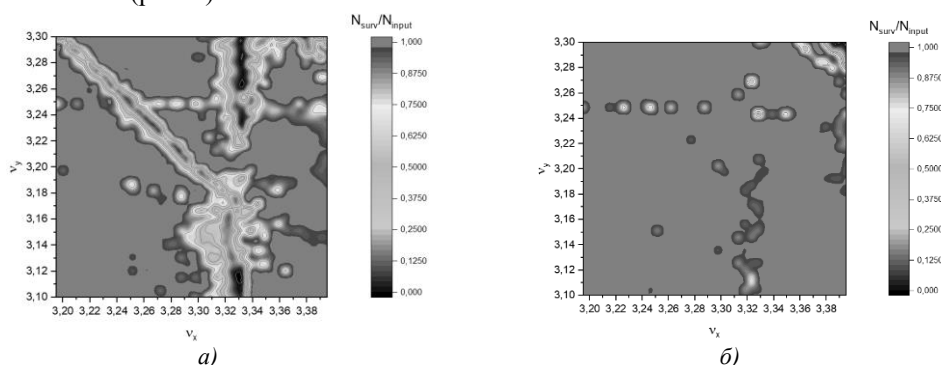


Рис. 1. Доля частиц пучка с эмиттансом  $\epsilon_{x,y} = 30$  см·мрад, попадающих в область устойчивого движения при геометрической апертуре соответствующей  $\epsilon_{x,y} = 10$  см·мрад. а) до подавления резонансов, б) после подавления резонансов

Список литературы

1. Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Denisov A.P. et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2010, Vol. 15, № 7, P. 758–761.
2. Burkhardt H., Deniau L., Latina A. // Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, 2014, P. 1180–1182.

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ЗАРЯД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Представлены расчеты потенциала электрического поля интенсивного аксиально-симметричного пучка релятивистских электронов с параметрами, типичными для систем электронного охлаждения.

J.L. MALTSEVA<sup>1</sup>, S.A. MELNIKOV<sup>2</sup>, I.N. MESHKOV<sup>2</sup>, A.S. SERGEEV<sup>2</sup>, A.A. CHEREVKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

## SPACE CHARGE OF AN ELECTRON BEAM IN AN ELECTRON COOLING SYSTEM

Calculations of the electric field potential of an intense axial-symmetric beam of relativistic electrons with parameters typical for electronic cooling systems are presented.

Применение в системах электронного охлаждения (СЭО) [1] интенсивных электронных пучков требуется для усиления эффекта охлаждения, что достигается повышением тока пучка. Однако, с повышением тока электрическое поле пучка (поле пространственного заряда) замедляет скорость электронов и создаёт неоднородное распределение плотности пучка. Соответственно, распределение потенциала пучка и скорости электронов по радиусу отличается от закона, известного для электрических проводников при постоянном токе. Всё это сказывается на эффективности охлаждения и отклонении зависимости времени охлаждения от тока пучка от линейного закона, что наблюдалось ещё в первых экспериментах по электронному охлаждению протонов [2].

В системах электронного охлаждения электронный пучок, за редким исключением, формируется и транспортируется в продольном (соленоидальном) магнитном поле, величина которого должно удовлетворять требованию, что ларморовский радиус вращения много меньше радиуса самого пучка. Такой пучок называется замагниченным. Его особенность состоит в том, что поперечные компоненты скорости его электронов много меньше продольных. Из данного условия и условия стационарности электронного пучка вытекает условие о постоянстве плотности тока по радиусу, которое легло в основу представленных расчетов.

Известно, что необходимым критерием успешного охлаждения является равенство скоростей электронного и охлаждаемого пучка. Учёт действия поля пространственного заряда пучка приводит к зависимости функции распределения потенциала, а значит и скоростей электронного пучка, от радиальной координаты. Полученные результаты демонстрируют значительное влияние пространственного заряда на изменение функции распределения потенциала по радиусу для малых энергий – рабочих для СЭО Бустера комплекса NICA.

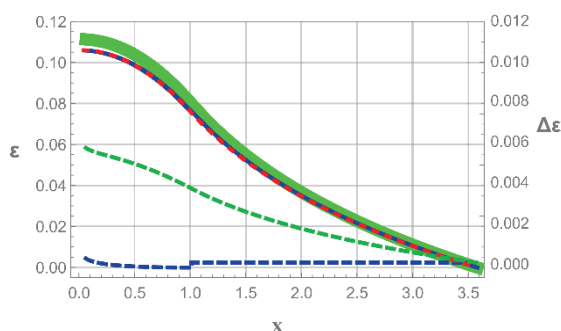


Рис. 1. Функции распределения плотности электронного пучка по радиусу для энергии ионов 3.172 МэВ/н. Сплошная зеленая линия – пучок однородной плотности; красная пунктирная линия и синяя сплошная линия – пучок электронов с учетом провисания потенциала для точного численного и приближенного аналитического решения соответственно; зеленая пунктирная линия - разность решения для пучка постоянной плотности и численного решения; синяя пунктирная линия - разность приближенного и численного решений.

### Список литературы

1. Мешков И.Н., // Электронное охлаждение: статус и перспективы, ЭЧАЯ, 1994, т.25, вып. 6, стр.1487
2. Будкер Г.И., и др., // Эксперименты по электронному охлаждению Атомная Энергия, 1976, т.40, №1, стр. 49-52



## УЧЕТ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ЗАРЯДА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СЛОЯ ФОТОКАТОДА

Рассмотрено влияние генерации электронов на динамику заряда полупроводникового слоя фотокатода. На примере задачи диффузии (беспольное приближение) показано непротиворечие полученных из модели результатов экспериментальным данным.

M.V. VLADIMIROV, S.M. POLOZOV, V.I. RASHCHIKOV  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CHARGE DYNAMICS MODELLING OF THE PHOTOCATHODE SEMICONDUCTOR LAYER WITH ELECTRONS GENERATION TAKING INTO ACCOUNT

The influence of electron's generation on the charge dynamics of the photocathode semiconductor layer is considered. On the example of the diffusion problem (field-free approximation), the consistency of the results obtained from the model with the experimental data is shown.

При моделировании современных фотопушек, использующих многослойные структуры, которые состоят из тонкого слоя полупроводника, осажденного на металлическую подложку, учет временной зависимости некомпенсированного заряда полупроводникового слоя  $q(t)$  является существенным [1-3]. Развивая описанный ранее подход [4], в том числе в попытке рассмотрения фотоэмиссии как единого процесса безотносительно к степени обеднения полупроводникового слоя фотокатода, учтена генерация электронов проводимости внутри последнего.

Поставлена и аналитически решена задача диффузии для электронов в полупроводниковом слое фотокатода  $z \in [0, a]$  с граничными условиями 1-го рода слева и 2-го, 3-го рода справа с учетом генерации. Вклад генерации за счет фотоэффекта считается пропорциональным профилю лазерного импульса (задний фронт не учтен):

$$S_g(t) \propto \begin{cases} t/\tau, & 0 \leq t < \tau, \\ 1, & \tau \leq t \end{cases}, \quad (1)$$

Получены выражения для электронной концентрации  $n(z, t)$  и зависимости  $q(t)$ . Показана (Рис. 1) возможность получения качественного и количественного согласия с экспериментальными результатами [1-3], полученными на фотопушке DESY PITZ.

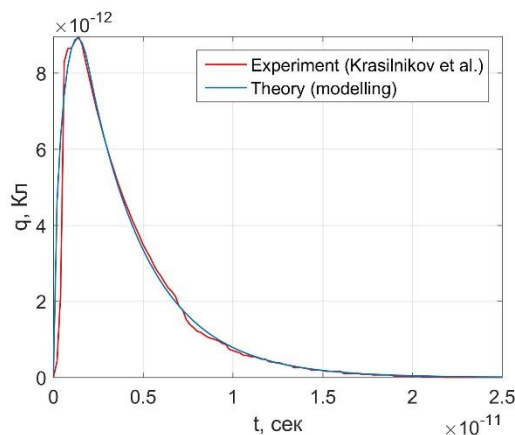


Рис. 1. Зависимость заряда полупроводникового слоя фотокатода в задаче диффузии с г.у. 3-го рода для следующих параметров:  $n_0 = n|_{z=0} = 1,21 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $D = 2,95 \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ ,  $a = 100 \text{ нм}$ ,  $h = -(n'/n)|_{z=a} = 10^{10} \text{ м}^{-1}$ ,  $\nu N = \frac{6h\nu_0 D}{a(ah+4)}$ ,  $\tau = 2 \text{ пс}$

### Список литературы

1. Polozov S. M., Rashchikov V. I. Simulation studies on the RF gun saturated emission //Cybernetics and Physics. – 2020. – Т. 9. – №. 2. – С. 103-106.
2. Krasilnikov M., Polozov S. M., Rashchikov V. I. Photoemission of Picosecond Electron Bunches with Large Charge in RF Guns //Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Т. 84. – №. 11. – С. 1881-1885.
3. S.M. Polozov, V.I. Rashchikov, M.I. Krasilnikov, “An Improved Model for Photoemission of Space Charge Dominated Picosecond Electron Bunches: Theory and Experiment”, in *Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21)*, Campinas, Brazil, May 2021, pp. 2829-2832. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB101
4. Vladimirov M. V., Polozov S. M., Rashchikov V. I. Diffusion Model for Describing Relaxation Process in an Electron-Depleted Semiconductor Layer of a Photocathode //Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Т. 85. – №. 12. – С. 2032-2035.

С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1</sup>, А. АКСЕНТЬЕВ<sup>1</sup>, Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1</sup>, А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>, В. ЛАДЫГИ<sup>2</sup>,  
Е. СЫРЕСИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иститут Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАНАЛОВ BYPASS В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПУЧКАМИ ПО ПОИСКУ ЭДМ

Проведение экспериментов с поляризованными пучками по поиску ЭДМ в ускорительном комплексе NICA подразумевает проектирование дополнительных отводных ByPass. Такие альтернативные каналы позволят использовать NICA в качестве накопительного кольца и накопить достаточно статистических данных.

S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1</sup>, A. AKSENTIEV<sup>1</sup>, Yu. SENICHEV<sup>1</sup>, A. MELNIKOV<sup>1</sup>,  
V. LADYGIN<sup>2</sup>, E. SYRESIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

## BYPASS CHANNELS DESIGN IN THE NICA ACCELERATOR COMPLEX FOR EXPERIMENTS WITH POLARIZED BEAMS FOR EDM SEARCH

Experiments with polarized beams to search for EDM in the NICA accelerator complex implies the design of additional ByPass channels. Such alternative channels will allow the use of NICA as a storage ring and accumulate enough statistical data.

Ускорительный комплекс NICA спроектирован для экспериментов с тяжелыми ионами, а также поляризованными протонами на энергию порядка 13 ГэВ. Для этих целей на прямых участках установлены соответствующие детекторы SPD и MPD, а также прочие необходимые элементы.

Для проведения эксперимента по поиску EDM, необходимо ускорять дейтроны на энергии порядка 240 МэВ. Также, для обеспечения режима квази-замороженного спина необходимы E+V элементы, именуемые Wien Filters. Такие элементы могут быть расположены на прямом участке и компенсируют поворот спина от поворотной арки. Для измерения ЭДМ необходимо использовать NICA в режиме накопительного кольца, а не коллайдерной моды. Для этого предлагается установка дополнительных отводных каналов ByPass (Рис. 1). Таким образом, можно создать совершенно новую регулярную структуру на альтернативных прямых участках, параллельным исходным. Создание каналов ByPass позволит одновременно задействовать NICA в различных экспериментах.

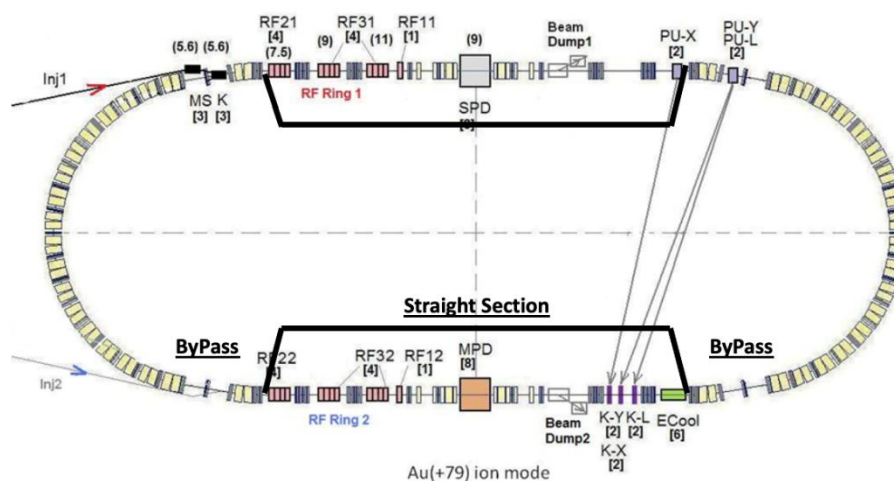


Рис. 1. Принципиальная схема кольца NICA с принципиальной схемой альтернативных каналов ByPass.

### Список литературы

1. Quasi-frozen spin concept of magneto-optical structure of NICA adapted to study the electric dipole moment of the deuteron and to search for the axion, Y. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, A. Melnikov, V. Ladygin, E. Syresin and N. Nikolaev, Journal of Physics: Conference Series, 2420 (2023) 012052, doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012052.

А.А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1, 2</sup>, Н.Н. НИКОЛАЕВ<sup>2, 3</sup>, А.Е. АКСЕНТЬЕВ<sup>1</sup>, Ю.В. СЕНИЧЕВ<sup>1</sup>,  
С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иститут Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черногловка, Россия,

<sup>3</sup>Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЧ СПИН-РОТАТОРА

Рассмотрены механизмы спин-декогеренции пучка протонов в области ВЧ спинового резонанса. Аналитические оценки эффектов декогеренции были верифицированы в ходе численного моделирования в среде COSY Infinity. Исследовались такие эффекты, как влияние гармоники ВЧ поля, продольного размера пучка, внутренних спиновых резонансов и отстройки по частоте на деполяризацию пучка. Предложены методы уменьшения влияния эффектов спин-декогеренции.

A.A. MELNIKOV<sup>1, 2</sup>, N.N. NIKOLAEV<sup>2, 3</sup>, A.E. AKSENTEV<sup>1</sup>, Y.V. SENICHEV<sup>1</sup>,  
S.D. KOLOKOLCHIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia,

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia.

## INVESTIGATION OF METHODS TO DECREASE PROTON BEAM DEPOLARIZATION WHILE USING AN RF SPIN-ROTATOR

The mechanisms of spin-decoherence of a proton beam on an RF spin resonance are investigated. The analytical estimates of decoherence effects were verified in the numerical experiment in the COSY Infinity software. Such effects as the influence of the RF field harmonics, longitudinal bunch size, intrinsic spin resonances and frequency detuning on the beam depolarization were investigated. The measures to decrease the influence of spin-decoherence effects are suggested.

Одним из методов управления поляризацией пучка частиц в накопителе является использование ВЧ спин-ротатора. Это устройство с электромагнитным полем, меняющимся по гармоническому закону. Оно настроено на такую частоту, при которой происходит резонансное воздействие на поляризацию пучка.

В частности, на ускорителе COSY (COer SYchrotron) в исследовательском центре г. Юлих, Германия, для этого используется ВЧ соленоид. При этом поляризация пучка протонов переводится из вертикального направления при инжекции в плоскость кольца. Основной опыт работы на COSY составляет проведение экспериментов с дейтронами, магнитная аномалия последних в 13 раз меньше, чем у протонов. Что характеризует эксперименты с протонами как более сложные с точки зрения эффектов декогеренции. В данной работе будет представлен анализ различных механизмов спиновой декогеренции в области ВЧ спинового резонанса и предложены методы уменьшения степени деполяризации пучка.

Основные аналитические соотношения для эффектов спин-декогеренции при использовании ВЧ спин-ротатора были получены в [1]. При этом спин-ротатор настраивается на резонансную частоту  $f_{RF, sol}^* = (\gamma G - K)f_{rev}$  для управления поляризацией в эксперименте. Здесь  $\gamma$  – релятивистский Лоренц фактор,  $G$  – магнитная аномалия,  $K$  – номер гармоники поля ВЧ соленоида,  $f_{rev}$  – частота обращения частиц. Эффекты декогеренции определяются фактором  $C_{SD} = 1 - \frac{\eta}{\beta^2} \left(1 + \frac{K}{\gamma G}\right)$ , где  $\eta$  – слип-фактор структуры,  $\beta$  – релятивистский бета-фактор. В работе [1] было показано, что уменьшение фактора  $C_{SD}$  приводит к минимизации эффектов спин-декогеренции, что можно сделать с помощью изменения гармоники поля  $K$  при фиксированной энергии. Также было показано, что время спиновой когеренции в данном процессе сильно зависит от среднеквадратичного относительного разброса частиц по импульсу:  $\tau_{SC} \sim \delta^{-2}$  [1]. Ещё одним фактором, влияющим на разброс частот спин-прецессии частиц, является наличие множественных внутренних спиновых резонансов в рабочем диапазоне накопителя. При этом возникает воздействие на спин частиц, зависящее от их положения в фазовом пространстве. Данный эффект особенно выражен для протонов с относительно большим значением магнитной аномалии, в чём можно убедиться из условия на наличие внутреннего резонанса:  $\gamma G = KP \pm Q_y$ . Также было исследовано влияние отстройки от резонанса по частоте на итоговую величину поляризации в плоскости кольца. При этом эффективно сила резонанса уменьшается, что влияет на итоговую эффективность переворота поляризации.

### Список литературы

1. A. Lehrach A., Lorentz B., Morse W., Nikolaev N., Rathmann F. Precursor experiments to search for permanent electric dipole moments (EDMs) of protons and deuterons at COSY // arXiv:1201.5773 [hep-ex].

Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, Р.А. ОСИН, В.С. ДЮБКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ИОНОВ КИСЛОРОДА В РЕГУЛЯРНОЙ СЕКЦИИ УСКОРИТЕЛЯ - ИНЖЕКТОРА НА ЭНЕРГИЮ 7,5 МЭВ/НУКЛОН**

Представлены результаты моделирования динамики пучка ионов кислорода  $5+$  в регулярной части ускорителя инжектора протонов и легких ионов на энергию 7,5 МэВ/нуклон [1]. В состав ускорителя входит два источника ионов, ускоритель с ПОКФ (Пространственно-Однородной Квадрупольной Фокусировкой) и две группы одинаковых нормально проводящих ИН-резонаторов. Транспортировка пучка между ускоряющими секциями осуществляется с помощью каналов транспортировки низких энергий ЛЕВТ, двух каналов транспортировки пучка средних энергий МЕВТ1 и МЕВТ2, и канала транспортировки пучка высоких энергий НЕВТ, после которого пучок инжектируется в бустерный синхротрон. В работе представлены результаты моделирования динамики пучка кислорода с  $A/Z = 3,2$  в регулярной части, охватывающей каналы транспортировки МЕВТ1 и МЕВТ2 и две группы ИН резонаторов.

T.A. LOZEEVA, S.M. POLOZOV, R.A. OSIN, V.S. DYUBKOV  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **OXYGEN ION BEAM DYNAMICS SIMULATION IN THE 7.5 MeV/u INJECTOR LINAC**

The results of the Oxygen  $5+$  beam dynamics simulation in the regular section of 7.5 MeV/u linear accelerator [1] are presented. Linear accelerator LU-1 consists of two ion sources, RFQ section (Radio Frequency Quadrupole) and two groups of identical normal conducting IH cavities. Beam transport between the accelerating sections is done via low energy beam transport line LEBT, two medium energy beam transport lines MEV1 and MEV2 and high energy transport line HEV that transfers the beam to the booster synchrotron. This paper contains the results of Oxygen  $A/Z = 3,2$  beam dynamics simulation in the LU-1 section, containing MEV1 and MEV2 beam transport lines and both groups of IH cavities.

Исследовалась динамика пучка кислорода с зарядностью  $5+$  в секции ускорителя ЛУ-1, включающей в себя канал транспортировки МЕВТ1, первую группу ИН резонаторов, ускоряющую пучок с 0,82 до 2,5 МэВ/нуклон, канал транспортировки между секциями ИН МЕВТ2 и вторую группу ИН резонаторов, ускоряющую пучок до финальных 7,5 МэВ/нуклон. В работе подобраны параметры квадрупольных линз для транспортировки пучка кислорода между секциями и между ИН резонаторами, оптимизированы напряжения на ребанчерах для продольного согласования пучка на вход групп ИН. Проанализирована динамика пучка при нескольких вариантах допустимых напряжений на резонаторах, подобран рисунок изменения квазисинхронной фазы внутри групп для достижения суммарных потерь пучка на длине ускорителя  $<10\%$ .

### *Список литературы*

1. S.M. Polozov *et al.*, "The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector", in *Proc. of RuPAC2021*, Alushta, Russia, 2021, pp.51-54. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07

К.С. САГАН

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ДИНАМИКА ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ КОМПАКТНОГО МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ**

Проведены расчеты динамики с учетом коллективных эффектов в накопительном кольце компактного монохроматического источника излучения в рентгеновском диапазоне на основе обратного комптоновского спектра. Расчеты проводились с использованием разработанного на языке Python кода с помощью библиотеки PyHEADTAIL. Были рассмотрены следующие неустойчивости и коллективные эффекты: микроволновая неустойчивость, когерентное синхротронное излучение (CSR), неустойчивость поперечных связанных мод, пространственный заряд. Кроме того, в работе проведен расчет и анализ CSR wake-потенциалов.

K.S. SAGAN

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **BEAM DYNAMICS IN THE STORAGE OF A COMPACT MONOCHROMATIC RADIATION SOURCE IN THE X-RAY RANGE BASED ON COMPTON BACKSCATTERING**

Dynamics calculations are carried out taking into account collective effects in the storage ring of a compact monochromatic radiation source in the X-ray range based on Compton backscattering. The calculations were carried out using Python code developed using the PyHEADTAIL library. The following instabilities and collective effects were considered: microwave instability, coherent synchrotron radiation (CSR), instability of transverse coupled modes, space charge. In addition, the work carried out the calculation and analysis of CSR wake-potentials.

Взаимодействие интенсивного пучка заряженных частиц с электромагнитными полями, индуцированными им в вакуумной камере ускорителя (wake-полями), приводит к так называемым коллективным эффектам, зависящим от количества частиц пучка. Коллективные эффекты ответственны за многие явления, которые ограничивают производительность ускорителя с точки зрения качества пучка и запасенного тока. Кроме того, они могут вызывать неустойчивости, то есть неограниченное возрастание амплитуды продольных или поперечных колебаний, что приводит к разрушению пучка [1].

Данная работа посвящена моделированию продольной и поперечной динамики пучка, а также изучению возникающих неустойчивостей в накопительном кольце источника, таких как микроволновая неустойчивость, неустойчивость поперечных связанных мод. Отдельно рассматривается вопрос специфичных для таких маленьких накопительных колец коллективных эффектов: когерентное синхротронное излучение (CSR), пространственный заряд.

В рамках работы произведено сравнение влияния различных коллективных эффектов на продольную динамику путем сравнения их wake-потенциалов для 1мм сгустка, а также сравнение wake-потенциалов одного и того же эффекта при различных длинах пучка. Было установлено, что с уменьшением длины пучка wake-потенциал увеличивается, а наибольший вклад на продольную динамику вносит эффект когерентного синхротронного излучения, что было подтверждено в дальнейших расчетах. В связи с этим были рассмотрены CSR wake-потенциалы при различных вертикальных размерах вакуумной камеры кольца, рассчитанные в программе Bmad [2]. Продемонстрировано их уменьшение с уменьшением вертикального размера камеры. Кроме того, представлены результаты расчетов продольной динамики и их сравнение для пучков с начальной длиной 0,3мм, 1мм и 1,5мм. Показано, что ввиду практически полного отсутствия радиационного затухания равновесные значения длины и энергетического разброса пучка определяются величиной начального возмущения, что позволяет сделать вывод о целесообразности использования пучков малой длины, начиная с определенной величины его заряда.

В рамках расчетов поперечной динамики было рассмотрено влияние CSR эффекта на нее, а также рассмотрена неустойчивость поперечных связанных мод при нулевых значениях хроматичности. В результате для неустойчивости найдем порог, равный 5 нКл. для CSR эффекта представлены зависимости ширины пучка и амплитуды его колебаний от заряда.

### *Список литературы*

1. В. В. Смалюк, Обзор коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях. Физика элементарных частиц и атомного ядра 2012, Т. 43, Вып. 2, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.
2. D. Sagan, <https://www.classe.cornell.edu/bmad/tao.html>

К.Р. ЖИТНИКОВ, А.А. ТИЩЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОЛЁТЕ ЗАРЯДА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ СРЕДЫ**

Излучение Вавилова-Черенкова (ИВЧ), то есть излучение, возникающее при движении заряженной частицы со скоростью выше фазовой скорости света, было открыто в 1934 году П.Е. Черенковым и теоретически обосновано И.Е. Таммом и И.М. Франком в 1937 году. Эффект Вавилова-Черенкова нашел широкое применение в черенковских счётчиках [1]. В свою очередь, дифракционным излучением называется излучение, возникающее при пролете заряженной частицы вблизи неоднородности. В работах [2,3] было показано, что дифракционное излучение, возникающее при пролете заряда вблизи мишени, можно трактовать как ИВЧ сверхсветового источника. Более того, заряд, двигающийся вдоль поверхности среды, может сам генерировать ИВЧ, которое в этом случае называют дифракционным ИВЧ. Такое излучение в последние годы стало объектом активных исследований в физике диагностики пучков заряженных частиц [4-6].

В настоящей работе рассмотрено дифракционное ИВЧ, возникающее от частицы, пролетающей вблизи границы раздела сред. Мы рассчитали электромагнитное поле, создаваемое в среде электроном, движущимся со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде. Данное точное поле мы сравнили с асимптотическим выражением, найденным методом стационарной фазы для поля на больших расстояниях. На основе найденного выражения была вычислена спектрально-угловая плотность излучения. Показано, что дифракционное ИВЧ является сильно поляризованным. Обсуждается возможность применимости полученных результатов для невозмущающей диагностики релятивистских пучков заряженных частиц.

Исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания, проект FSWU-2023-0075.

K.R. ZHITNIKOV, A.A. TISHCHENKO

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF CHERENKOV RADIATION FROM CHARGE PASSING ABOVE THE SURFACE OF THE MEDIUM**

Cherenkov radiation (CR) is emitted when a charge moves with speed higher than the phase speed of light. It was discovered by Cherenkov in 1934 and theoretically justified by Tamm and Frank in 1937. Today, Cherenkov effect is widely used in Cherenkov counters [1]. In turn, diffraction radiation is emitted when the charge moves near inhomogeneity. As was shown in [2,3], diffraction radiation can be treated as CR from superluminal source. Besides, a charge moving above the surface of the medium can generate CR, which is named Cherenkov diffraction radiation. This type of radiation in recent years has become the object of active research in physics of diagnostics of charged particle bunches [4-6].

In this report, we consider Cherenkov diffraction radiation from a charged particle moving above the surface of the medium. We calculated the electromagnetic field produced by electron moving with speed higher than the phase speed of light. This field was compared with the asymptotic expression found by the method of stationary phase. Based on this expression, the energy radiated per unit solid angle per unit angular frequency was obtained. It was shown that the Cherenkov diffraction radiation is strongly polarized. The possibility of applying the results for non-invasive diagnostics of relativistic charged particle beams is discussed.

The study was supported by the Ministry of Science and Higher education of the Russian Federation, agreement FSWU-2023-0075.

### *Список литературы*

1. С.П. Денисов, Излучение “сверхсветовых” частиц (эффект Черенкова), Соросовский образовательный журнал **2**, 87 (1996).
2. А.П.Потылицын, Д.Ю. Сергеева, М.Н. Стриханов, А.А. Тищенко, Дифракционное излучение заряда как излучение сверхсветового источника в вакууме, УФН **190**, 329 (2020).
3. Н.Ф. Шульга, В.В. Сыщенко, Н.В. Соболева, Рассеяние электромагнитного поля быстрой частицы на нитевидной мишени, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **11**, 83 (2009).
4. R. Kieffer, L. Bartnik, M. Bergamaschi *et al.*, Generation of incoherent Cherenkov diffraction radiation in synchrotrons, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 042803 (2020).
5. R. Kieffer, L. Bartnik, M. Bergamaschi *et al.*, Direct Observation of Incoherent Cherenkov Diffraction Radiation in the Visible Range, Phys. Rev. Lett. **121**, 054802 (2018).
6. W. Xu, W. Li, Z. Jiang *et al.*, Direction-dependent polarization modulation of Cherenkov diffraction radiation based on metasurfaces, Journ. of Appl. Phys. **132**, 113101 (2022).

Т.А. ЛОЗЕЕВА, С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. ГУСАРОВА, М.В. ЛАЛАЯН  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ В ТЕСТОВОЙ СЕКЦИИ ИНЖЕКТОРА КОЛЛАЙДЕРА NICA

Представлены результаты моделирования динамики пучка протонов с энергией 13 МэВ и током 5 мА в нескольких вариантах канала транспортировки тестовой сверхпроводящей секции инжектора коллайдера NICA (ОИЯИ, Дубна, Россия) [1-3]. Рассмотрены варианты динамики пучка в четырех 325 МГц тестовых сверхпроводящих полуволновых резонаторах [4,5], размещенных в одном либо двух криостатах. Фокусировка пучка производится либо сверхпроводящими соленоидами, размещенными между резонаторами внутри криостатов, либо квадрупольными линзами, также рассмотрен смешанный тип фокусировки. Также найдены условия согласования продольной динамики в канале, найдено оптимальное положение ребанчера и напряжение на нем. В ходе моделирования предложен наиболее подходящий и технически осуществимый вариант размещения резонаторов и системы фокусировки для получения приемлемых параметров пучка на выходе из сверхпроводящей секции.

T.A. LOZEEVA, S.M. POLOZOV, M.A. GUSAROVA, M.V. LALAYAN  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## PROTON BEAM DYNAMICS SIMULATION IN THE TEST SC SECTION OF NICA COLLIDER INJECTOR

The results of the 5 mA 13 MeV proton beam dynamics simulation in several versions of the beam transport channel of the test stand of NICA collider injector (JINR, Dubna, Russia) [1-3] are presented. Beam dynamics in the superconducting section of four 325 MHz half-wave cavities [4,5] was considered, with cavities being placed in one or two cryomodules. Beam transport between the cavities can either consist of superconducting solenoids, placed inside the cryomodules, or magnetic quadrupoles, or have a mix of focusing lenses. The beam longitudinal matching conditions were also met by choosing the optimal position and voltage for 325 MHz rebuncher. The most suitable and technically available version of the cryomodule and the beam transport line structure was chosen to obtain the decent beam characteristics at the superconducting test section output.

Исследована динамика пучка протонов с током 5 мА в сверхпроводящей секции, состоящей из четырех 325 МГц HWR резонаторов с различными вариантами поперечной фокусировки. Сверхпроводящей части предшествует секция IH-DTL резонаторов. Производилось моделирование динамики пучка протонов с энергией 13 МэВ непосредственно после резонатора IH3. После IH3 располагается триплет квадрупольных линз, градиенты которых остаются неизменными для всех трех вариантов структуры. Далее в канале установлен ребанчер для продольного согласования пучка на выход резонаторов HWR. В первом варианте фокусирующей структуры канала фокусировка пучка осуществляется с помощью трех дублетов линз, установленных по краям криостатов. Для удержания огибающей протонного пучка по 98% частиц в пределах канала с апертурой радиуса 18 мм в канале и 15 мм в резонаторах достаточно градиентов линз  $\leq 10$  Тл/м. Во второй версии структуры фокусировка осуществляется соленоидами, расположенными между криостатами. Вместо трех дублетов квадрупольных линз используется один соленоид с эффективной длиной 220 мм с полем 2,15 Тл. В третьей версии структуры используется один соленоид с полем 2,4 Тл и две квадрупольных линзы для согласования пучка на выход. В результате моделирования выбран оптимальный вариант магнитной структуры канала.

### Список литературы

1. E. Syresin *et al.*, "Status of Accelerator Complex NICA", in *Proc. RUPAC'18*, Protvino, Russia, Oct 2018, pp. 12-16. DOI:10.18429/JACoW-RUPAC2018-MOXMH03
2. H. Hoeltermann *et al.* "Light Ion Injector for NICA", *Proc. of NAPAC2019*, Lansing, MI, USA, Sep 2021, pp. 834-836. DOI:10.18429/JACoW-NAPAC2019-WEPLH15
3. A.V. Butenko *et al.*, "New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron-Nica: Current Results", in *Proc. of RuPAC'16*, St. Petersburg, Russia, Nov 2016, pp. 626-628. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2016-THPSC041
4. A. Butenko *et al.*, "Status of the SC HWR Cavities Production for NICA Project", in *Proc. of RuPAC2021*, Alushta, Russia, Oct 2021, pp. 85-88. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-THA01
5. S.V. Matsievskiy, D. Bychanok, M. Gusarova, and M.V. Lalayan, "Adjustable Power Coupler for NICA HWR Cavities", in *Proc. SRF'19*, Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, pp. 260-262. doi:10.18429/JACoW-SRF2019-MOP07



С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, А. АКСЕНТЬЕВ, Ю. СЕНИЧЕВ, А. МЕЛЬНИКОВ

*Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,*

## СПИНОВАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ И БЕТАТРОННАЯ ХРОМАТИЧНОСТЬ ДЕЙТРОННОГО ПУЧКА В РЕЖИМЕ КВАЗИЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА

Отличительной особенностью режима квазизамороженного спина в синхротроне является установка специальных E+B элементов на прямых участках, которые компенсируют вращение спина на арках. Более того, из-за наличия продольного размера и разброса по импульсу внутри пучка, вращение может происходить некогерентно. С целью подавления этого эффекта устанавливаются секступоли, которые также влияют и на подавление хроматичности.

S. KOLOKOLCHIKOV, A. AKSENTIEV, Yu. SENICHEV, A. MELNIKOV

*Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia*

## SPIN COHERENCE AND BETATRON CHROMATICITY OF A DEUTERON BEAM IN THE QUASI-FROZEN SPIN MODE.

A distinctive feature of the quasi-frozen spin mode in the synchrotron is the installation of special E+B elements on straight sections that compensate spin rotation on arcs. Moreover, due to the presence of the longitudinal emittance and the momentum spread inside the beam, spin rotation may occur incoherently. In order to suppress this effect, sextupoles are installed, which also affect the suppression of chromaticity.

Возможность управления спином для экспериментов по поиску ЭДМ может быть реализована путем установки элементов со скрещенными электрическим и магнитным полями, Wien Filters, на прямых участках. Они гарантируют, что спин дейтронов сохраняет направление в соответствии с режимом «квазизамороженного спина» [1].

Однако спин частиц, из-за их различного движения в трехмерном пространстве, в любом случае вращается с несколькими разными частотами вокруг инвариантной оси, что нарушает спиновую когерентность. Рассмотрим выражение для энергетического разброса частиц относительного равновесного уровня имеет вид [2, 3]:

$$\Delta\delta_{eq} = \frac{\gamma_s^2}{\gamma_s^2\alpha_0 - 1} \left[ \frac{\delta_m^2}{2} \left( \alpha_1 + \frac{3\beta^2}{2\gamma^2} - \frac{\alpha_0}{\gamma_s^2} + \frac{1}{\gamma_s^4} \right) + \frac{\pi}{2L} (\varepsilon_x v_x + \varepsilon_y v_y) \right]_{\beta} \quad (1),$$

где  $\gamma_s$  — равновесная энергия;  $\alpha_0, \alpha_1$  — первый и второй порядок коэффициента уплотнения орбиты;  $\delta_m$  — разброс по импульсу;  $L$  — равновесная длина;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  — эмиттансы пучка;  $v_x, v_y$  — бетатронная частота.

Из Выражения (1) видно, что для достижения одинаково энергетического уровня различных частиц, необходимо влиять как на синхротронное движение, так и на бетатронное. Для обеспечения спиновой когерентности, нелинейные элементы, секступоли, должны быть установлены на арках, в места с ненулевой дисперсией для варьирования  $\alpha_1$ . Однако, секступоли одновременно с этим влияют и на бетатронную хроматичность. С учётом этой особенности, необходимо гарантировать стабильность поляризованного дейтронного пучка.

### *Список литературы*

1. Quasi-frozen spin concept of magneto-optical structure of NICA adapted to study the electric dipole moment of the deuteron and to search for the axion, Y. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, A. Melnikov, V. Ladygin, E. Syresin and N. Nikolaev, Journal of Physics: Conference Series, 2420 (2023) 012052, doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012052.
2. Spin Tune Decoherence in Multipole Fields, Yu. Senichev, A. Ivanov, A. Lehrach, R. Maier, D. Zyuzin, S. Andrianov, IPAC2014, Dresden, Germany, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-THPRO062
3. Investigation of Spin-Decoherence in the NICA Storage Ring for the Future EDM-Measurement Experiment, A. E. Aksentev, A. A. Melnikov, Y. V. Senichev, V. P. Ladygin, E. M. Syresin, IPAC2022, Bangkok, Thailand, doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT006

А.А. НИКИТИН<sup>1</sup>, С.В. РОГОЖКИН<sup>2</sup>, О.В. ОГОРОДНИКОВА<sup>2</sup>, П.А. ФЕДИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский Институт", Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СПЛАВЕ ВОЛЬФРАМА W-10Cr С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В настоящей работе проведено комплексное исследование образца сплава W-10Cr после ускоренного облучения ионами до повреждающей дозы порядка 10 смещений на атом при температурах 300 и 500°C. Проведен детальный химический анализ методами просвечивающей электронной и томографической атомно-зондовой микроскопии. Показано, что в результате облучения в материале происходит распад твердого раствора с образованием наноразмерных кластеров, обогащенных хромом. Кроме того, в области повреждения материала обнаружена высокая плотность (порядка  $10^{24} \text{ м}^{-3}$ ) кластеров точечных дефектов.

A.A. NIKITIN<sup>1</sup>, S.V. ROGOZHNIKIN<sup>2</sup>, O.V. OGORODNIKOVA<sup>2</sup>, P.A. FEDIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SIMULATION OF RADIATION DAMAGE IN W-10Cr TUNGSTEN ALLOY USING ION BEAMS

In this work, a comprehensive study of a W-10Cr alloy sample after accelerated irradiation with ions to a damage dose 10 displacements per atom at temperatures of 300 and 500°C was carried out. A detailed chemical analysis of radiation induced defects carried out using transmission electron microscopy and atom probe tomography. It is shown that, as a result of irradiation, nanosized clusters enriched in chromium are formed. In addition, a high density (of the order of  $10^{24} \text{ m}^{-3}$ ) of clusters of point defects was found in the area of material damage.

Использование термоядерного синтеза крайне привлекательно и перспективно с точки зрения концепции экологически чистых и возобновляемых источников энергии. Существенной проблемой для создания реальной энергетической установки является выбор конструкционных материалов для активной зоны реактора. Конструкции из данных материалов будут располагаться в непосредственной близости к горячей плазме. Именно на них будут приходиться основные радиационные и тепловые воздействия. Материалы, на основе вольфрама обладают рядом преимуществ за счет высокой жаропрочности и достаточной теплопроводности. Тем не менее, его радиационная стойкость остается под вопросом. Уже при дозах радиационного повреждения, характерного для термоядерных установок вольфрам охрупчивается и теряет конструкционные свойства. Для преодоления этих проблем в настоящее время разрабатываются материалы на основе вольфрама, которые должны обеспечить повышенный эксплуатационный ресурс реактора. В работе представлены результаты исследований по ускоренным испытаниям сплава W-10Cr и моделированию радиационных повреждений с использованием ионного облучения.

Проведено два сеанса облучения материала на линейном ускорителе ТИПр (Тяжело-ионный прототип). Первый эксперимент производился пучком ионов  $\text{Fe}^{2+}$  с энергией 5,6 МэВ в импульсном режиме с длительностью импульса 450 мкс и частотой повторений до 0,5 Гц. Температура образца во время облучения составляла 500 °С. Второе облучение производилось ионами  $\text{Co}^{2+}$  с энергией 5,9 МэВ при температуре образца 300 °С. Интегральный ионный поток в результате облучения в каждом из экспериментов составил  $1,2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Проведено сравнение режимов облучения и формирующихся радиационно-индуцированных особенностей.

После облучения на глубине до 1,65 мкм от поверхности методами просвечивающей микроскопии обнаружен сильный дифракционный контраст совпадающий с расчетами профиля повреждений в программе SRIM. Анализ зерен показал, что контраст обусловлен высокой плотностью структурных дефектов представляющих собой «черные точки», либо дислокационные петли очень малого размера (3-5 нм). Методами атомно-зондовой томографии [1, 2] в области облучения обнаружены наноразмерные кластеры хрома. Количественный анализ показал, что содержание хрома в кластерах при температуре облучения 300 °С составляет 48 ат.% и увеличивается до 78 ат.% при температуре облучения 500 °С. При этом средний размер кластера снижается с 2,0 до 1,8 нм. При этом объемная доля кластеров сохраняется на уровне  $6 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

### Список литературы

1. Miller M.K. Atom Probe Tomography: Analysis at the Atomic Level. 2000. New York: Kluwer Academic.
2. Philippe T., Duguay S., Blavette D. Clustering and pair correlation function in atom probe tomography. Ultramicroscopy. 2010, Vol. 110, P. 862-867

## ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ИСТОЧНИКА ИОНОВ БАЯРДА-АЛЬПЕРТА ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

Рассмотрено влияние конфигурации источника ионов типа Баярда-Альперта газонаполненной нейтронной трубки на его выходной ток. Анализ проводился посредством численного моделирования динамики заряженных частиц в источнике ионов PIC методом, реализованном в коде KARAT. В результате моделирования была выявлена оптимальная конфигурация источника ионов Баярда-Альперта с точки зрения величины выходного тока и рабочего давления молекулярного дейтерия.

A.P. SKRIPNIK, D.S. STEPANOV, N.V. VARLAMOV, M.A. GORBUNOV,  
V.I. KOROTEEV, V.K. SHILOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OPTIMAL CONFIGURATION OF THE BAYARD-ALPERT ION SOURCE OF A GAS-FILLED NEUTRON TUBE

The influence of the configuration of the Bayard-Alpert ion source of a gas-filled neutron tube on its output current is considered. The analysis was carried out by numerical simulation of charged particle dynamics in the ion source by the PIC method, implemented in the KARAT code. As a result of the simulation, the optimal configuration of the Bayard-Alpert ion source was revealed in terms of the magnitude of the output current and the operating pressure of molecular deuterium.

Газонаполненная нейтронная трубка (ГНТ) с источником ионов Баярда-Альперта [1] применяется в нейтронном каротаже нефтегазовых скважин. Важнейшим отличием таких нейтронных генераторов от подобных по назначению, является значительно меньшая величина длительности переднего и заднего фронтов нейтронного импульса, способная достигать значений меньших 1.0 мкс. При этом, импульсный ток источника ГНТ должен составлять величину не менее 400 мкА. Подобные значения должны достигаться при минимальном давлении рабочего газа, т.к. это продлевает срок эксплуатации прибора. Практическая реализация такой нейтронной трубки требует исследования воздействия конфигурации источника на извлекаемый из него ионный ток, которое целесообразно провести посредством методов численного моделирования, реализованных, например, в KARAT [2].

Первоначальный вариант конструкции источника Баярда-Альперта [1], представлял собой металлический диск с цилиндрической сеткой, являющиеся анодом (+300 В), за ним располагался экстрагирующий ионы электрод (+100 В), рядом с боковой поверхностью цилиндрической сетки устанавливался термокатод на 50 мА тока, а вся камера источника заполнялась молекулярным дейтерием при давлении от 0.5 до 20 мТорр. Последовательное моделирование динамики электронов и ионов в объеме источника при различных конфигурациях электродов и при минимальном давлении в 0.5 мТорр, проводимое совместно с анализом распределения токов заряженных частиц на поверхности источника привели, в итоге, к конфигурации источника, представленной на рис. 7, для которой достигается необходимая величина ионного тока (рис. 8) при минимальном давлении молекулярного дейтерия.

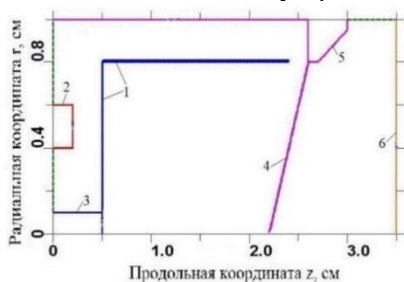


Рис. 5. Модель ионного источника в KARAT: 1 – анодная сетка, 2 – катод, 3 – анодный штырь, 4 – сетка экстрактора,

5 – экстрактор, 6 – эквивалентный мишенный электрод

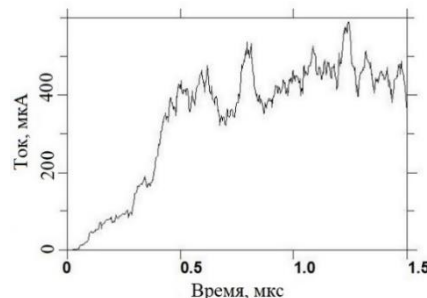


Рис. 6. Временная зависимость тока молекулярных ионов дейтерия на мишенный электрод.

Таким образом, была выявлена оптимальная конфигурация источника ионов Баярда-Альперта ГНТ, позволяющая получать необходимые для нейтронного каротажа нефтегазовых скважин 400 мкА тока молекулярных ионов дейтерия, при минимальном рабочем давлении в 0.5 мТорр.

### Список литературы

1. Chen F.K., Liberman A.D. Neutron Generator: pat. № 5292 419 USA. USA, 1994.
2. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KARAT: дис. д-ра физ. мат. наук. ОИВТ РАН и ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, 2011.

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ВЫХОДНОМУ СИГНАЛУ В МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ

Рассмотрена проблема распознавания и классификации нагрузок на выходе формирующих и передающих линий с распределенными параметрами в мощных импульсных устройствах по амплитуде и форме выходного сигнала с применением математических моделей на основе методов машинного обучения и нейросетей. На основе исследованных математических моделей разработано веб-приложение, распознающее паразитных параметры, возникающие в устройствах на основе ЛРП.

G.P. AVERYANOV, V.V. DMITRIYEVA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS AND NEURAL NETWORKS FOR RECOGNITION OF PARASITIC PARAMETERS BY THE OUTPUT SIGNAL IN POWERFUL PULSED ELECTROPHYSICS DEVICES

The problem of recognition and classification of loads at the output of generating and transmitting lines with distributed parameters in high-power pulse devices by the amplitude and shape of the output signal using mathematical models based on machine learning methods and neural networks is considered. Based on the studied mathematical models, a web application that recognizes the parasitic parameters was developed.

Моделирование мощных импульсных устройств с ЛРП предполагает в качестве исходных данных систему дифференциальных уравнений, описывающих схему устройства и значения параметров элементов моделируемой схемы. Результатом моделирования в этом случае является сигнал на выходе схемы. Наличие паразитных параметров проявляется через характерное искажение формы сигнала на выходе схемы. Таким образом для детектирования паразитных параметров в формирующих и передающих ЛРП необходимо решить обратную задачу по восстановлению конфигурации схемы и значений параметров её элементов по форме и амплитуде выходного сигнала.

Решение прямой задачи – моделирование формирующих и передающих ЛРП позволяет получить вектор признаков  $(x_i, i=1, N)$ , описывающий известные исходные данные для решения обратной задачи и вектор результатов  $(y_i, i=1, N)$ . При этом получается конечная совокупность из  $N$  прецедентов (соответствий) пар  $(x_i, y_i)$ . В вектор признаков  $x_i$  входят параметры схемы и осциллограммы (ее оцифрованное изображение) на выходе ЛРП, а в вектор результата входит тип нагрузки с признаком наличия или отсутствия паразитного параметра, классификация паразитного параметра (паразитная емкость или паразитная индуктивность) и параметры нагрузки (значения сопротивления, емкости, индуктивности).

На основе обучающей выборки строится алгоритм, который для любого вектора признаков  $x$  уже не входящего в обучающую выборку выдает достаточно точный ответ – о наличии или отсутствии в схеме паразитного параметра, его классификации и значении.

Для измерения точности результатов используется функционал качества, характеризующий среднюю ошибку (эмпирический риск) алгоритма на произвольной выборке  $X^m$ :  $Q(a, X^m) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathcal{L}(a(x_i), y^*(x_i))$ . Функция потерь  $\mathcal{L}(y, y')$ , характеризует величину отклонения результата  $y = a(x)$  от правильного ответа для произвольного  $x \in X$ . Для выбора оптимального алгоритма и настройки его параметров были рассмотрены основные методы решения задачи “обучения с учителем”. При оценке точности исследованных алгоритмов использована метрика среднего абсолютного отклонения – Mean Absolute Error (MAE).

Разработанная модель детектора позволяет оценить качество конструкции формирующих и передающих ЛРП в мощных импульсных устройствах. Детектирование паразитных параметров может быть весьма актуальным при монтаже и наладке оборудования для физических экспериментов. Помимо этого, данный алгоритм может оказаться эффективным в составе специализированных САПР, позволяя значительно расширить круг решаемых задач, связанных с проектированием, в приложениях по моделированию аналоговых цепей

### Список литературы

1. Аверьянов Г.П., Дмитриева В.В., Конев А.М., Кунов И.А., Носова Е.М. Оценка паразитных параметров мощных импульсных устройств методами распознавания образов и машинного обучения (VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ 2021. – 481 с.)
2. G. P. Averyanov, V. V. Dmitrieva, N. Kornev Modelling of the forming devices of high-current pulsed accelerators Published 1 December 2017 Physics Journal of Physics: Conference Series

## РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ НА ЭНЕРГИЮ ПУЧКА 200 МЭВ

На базе линейного электронного ускорителя Linac-200 (ОИЯИ) разработана схема ионной оптики установки для высокоэнергетической электронной радиографии статических и динамических объектов при энергии электронного пучка 200 МэВ. Разработаны две конфигурации ионно-оптической схемы установки, одна для исследования быстропротекающих процессов с большим полем обзора, но с меньшим разрешением, вторая - для дефектоскопических исследований, обладает пространственным разрешением 2-10 мкм, но меньшим полем обзора. Ожидаемое разрешение по плотности исследуемых объектов составит ~2%.

Метод высокоэнергетической электронной радиографии обладает рекордным (1-10 мкм) пространственным и временным разрешением (100 нс) при точности определения плотности на уровне нескольких процентов [1,2] при исследовании малоплотных, т.е. с толщиной до 1/3 радиационной длины, статических и динамических объектов. Разработана схема ионной оптики установки для высокоэнергетической электронной радиографии статических и динамических объектов при энергии электронного пучка 200 МэВ на линейном ускорителе Linac-200 (ОИЯИ, г. Дубна). Ионно-оптическая схема установки состоит из секции согласования пучка и секции формирования изображения. Данная геометрия использовалась нами ранее при разработке протонно- радиографических микроскопов с энергией от 247 до 3000 МэВ [3-5]. Секция согласования служит для подготовки оптимальных параметров электронного пучка в плоскости размещения исследуемого объекта, компенсации первого порядка хроматических aberrаций, и состоит из электромагнитных квадрупольных линз (MQ1-MQ3) с апертурой 57 мм, длиной ярма 180 мм и градиентом поля 11 Тл/м. Секция формирования и увеличения изображений включает 4 линзы на постоянных магнитах (MQ5-MQ8) с апертурой 40 мм, градиентом поля 28 Тл/м, длинами 40 и 80 мм и нелинейностью поля <0.75%. Регулировка контраста радиографических изображений производится изменением размера эллиптического коллиматора в плоскости Фурье.

Разработаны две конфигурации ионно-оптической схемы установки: первая - для исследования быстропротекающих процессов (рис.1 слева), имеет коэффициент увеличения ~4, поле обзора в плоскости образца ~20 мм, пространственное разрешение <100 мкм; и вторая - для дефектоскопических исследований (рис.1 справа), обладает коэффициентом увеличения ~10 при поле обзора ~10 мм и пространственном разрешении 2-10 мкм при временном разрешении ~ 100 нс и частоте сбросов пучка до 50 Гц.

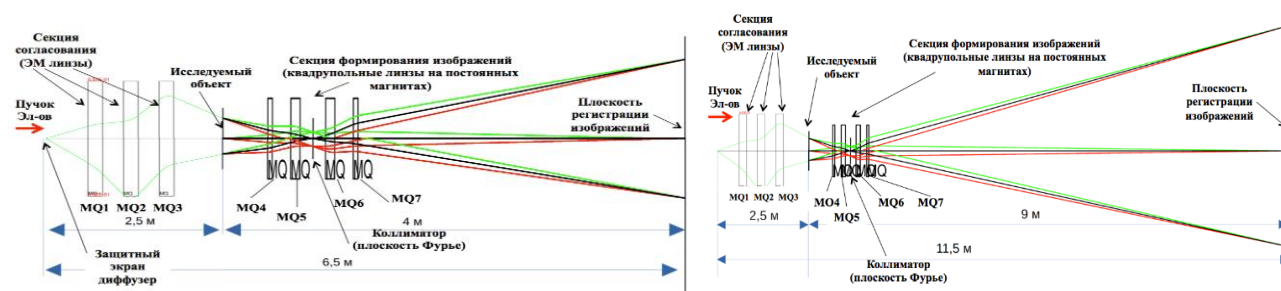


Рис. 1. Ионно-оптические схемы установки для высокоэнергетической электронной радиографии при энергии пучка 200 МэВ, слева – для исследования ударно-волновых процессов, справа – для дефектоскопических исследований.

1. F. E. Merrill, et al., Demonstration of transmission high energy electron microscopy. // Applied Physics Letters. 2018. Vol. 112(14). 144103. DOI: 10.1063/1.5011198.
2. Zhaohui Ranet, et al. Demonstration of high energy electron radiography with sub-micron spatial resolution. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. A 2021. Vol. 1015. 165769.
3. Kantsyrev A.V., et al., TWAC-ITEP microscopy facility. // Instrum. Exp. Tech. 2014. Vol. 57, No. 1. P. 1–10.
4. Varentsov D., et al., Commissioning of the PRIOR proton microscope. // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. 023303.
5. Kantsyrev A.V., et al., Monte-Carlo Geant4 numerical simulation of experiments at 247 MeV proton microscope. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. 012019.

П.А. ФЕДИН<sup>1,2</sup>, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ЗИЯТДИНОВА<sup>1,2</sup>, А.В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, В.К. СЕМЯЧКИН<sup>1</sup>, Р.П. КУЙБИДА<sup>1</sup>, Т.В. КУЛЕВОЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ДВОЙНОЙ ПУЧОК НА УСТАНОВКЕ ТИПр ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Ионный ускоритель - это многофункциональный инструмент, который, в том числе, может быть использован для моделирования эффектов нейтронного облучения в реакторных материалах. Под действием нейтронов в конструкционных материалах ядерных установок возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. В Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККТЭФ) ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжело-ионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах с помощью пучка ионов Fe<sup>2+</sup> 5,6 МэВ. Для одновременной имплантации гелия (или водорода) в область дефектов на установке ТИПр проектируется второй канал, обеспечивающий пучок ионов гелия с энергией до 300 кэВ. В докладе представлено описание проектируемой установки и статус работ по созданию.

P.A. FEDIN<sup>1,2</sup>, K.E. PRYANISHNIKOV<sup>1,2</sup>, A.V. ZIATDINOVA<sup>1,2</sup>, A.V. KOZLOV<sup>1</sup>, V.K. SEMYACHKIN<sup>1</sup>, R.P. KUIBEDA<sup>1</sup>, T.V. KULEVOY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## DOUBLE BEAM AT THE HIPR FACILITY FOR SIMULATION OF THE NEUTRON IMPACT ON THE NUCLEAR REACTORS STRUCTURAL MATERIALS

Ion accelerator facility is a powerful tool to simulate neutron irradiation effects in reactor materials. Defects in the crystal lattice arise and the accumulation of transmutation products (helium and hydrogen) occurs in the structure of the material under the action of neutrons in the structural materials of nuclear installations. At Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics the heavy ion accelerator HIPr (heavy ion prototype) is used to simulate radiation damage in steels and alloys using a 5.6 MeV Fe<sup>2+</sup> ion beam. The second beam line is designed at the HIPr facility to simultaneously implant helium (or hydrogen) into the region of defects. The second beam line provides a beam of helium ions with energy up to 300 keV. The report presents a description of second beam line design and a status of construction the second beam line.

В ККТЭФ проводятся имитационные эксперименты по облучению пучками тяжелых ионов на ускорителе ТИПр. Ускоритель работает с длительностью импульса 475 мкс, с частотой повторения один импульс в 2 секунды. В качестве ионного источника используется вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ). На ускорителе ТИПр ионы Fe<sup>2+</sup> достигают энергии 101 кэВ/нуклон в структуре RFQ. Максимальный набранный флюенс на образцы составил  $2,0 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Максимальная температура, которую обеспечивает система нагрева образцов составляет 600°C [1]. На рис. 1 представлена схема ускорителя ТИПр и проектируемого второго канала. В качестве источника ионов гелия или водорода планируется использовать ЭЦР источник, расположенный на высоковольтной платформе до 300 кВ. На высоковольтной платформе располагаются элементы транспортировки пучка: импульсный соленоид, поворотный магнит, триплет квадрупольных линз. В канале после ускорительной трубки устанавливаются 2 дублета квадрупольных линз. Пучки сходятся в мишенной камере под углом 30° [2]. Электропитание на высоковольтной платформе осуществляется через разделительный трансформатор.

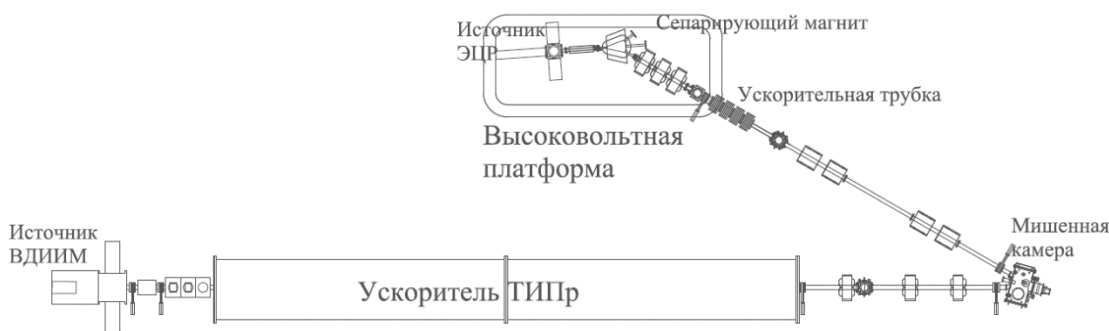


Рис. 1. Схема установки ТИПр вместе с проектирующимся вторым каналом.

### Список литературы

1. Рогожкин С.В. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. Том 9, №3. 2018. С. 245-258.
2. Fedin P.A. and others // J. Phys.: Conf. Ser. 2020 **1686** 012073



## КОРОТКИЙ ФРОНТ ИОННОГО ТОКА ИСТОЧНИКА БАЯРДА-АЛЬПЕРТА ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

Рассмотрены способы укорочения фронта ионного тока источника Баярда-Альперта газонаполненной нейтронной трубки. Анализ проводился с помощью численного моделирования динамики заряженных частиц PIC методом, реализованном в коде KARAT. В результате было показано, что минимальный фронт ионного тока – 0.15 мкс (амплитуда – 400 мкА) достигается при эллиптической форме анодной сетки и ее потенциале в +300 В, при давлении молекулярного дейтерия – 0.5 мТорр.

A.P. SKRIPNIK, D.S. STEPANOV, N.V. VARLAMOV, M.A. GORBUNOV,  
V.I. KOROTEEV, V.K. SHILOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SHORT FRONT OF AN ION CURRENT OF THE BAYARD-ALPERT SOURCE OF A GAS-FILLED NEUTRON TUBE

Ways for shortening the ion current front of the Bayard-Alpert source of a gas-filled neutron tube are considered. The analysis was carried out using the numerical simulation of charged particles dynamics by the PIC method implemented in the KARAT code. As a result, it was shown that the minimum front of the ion current – 0.15  $\mu$ s (amplitude – 400  $\mu$ A) is achieved with an elliptical shape of the anode grid and its potential of +300 V, at a pressure of molecular deuterium – 0.5 mTorr.

Использование источника ионов Баярда-Альперта [1] в составе каротажных газонаполненных нейтронных трубок является одним из путей достижения коротких фронтов нейтронного импульса, что уменьшает ошибки разделения спектров гамма излучения, снижает число непригодных к анализу импульсов из-за их наложений и пр. При этом, импульсный ток источника должен составлять величину не менее 400 мкА. Повышение качества нефтегазового каротажа требует исследования способов укорочения фронта ионного тока в источнике Баярда-Альперта, которое целесообразно провести посредством численного моделирования, реализованного, например, в коде KARAT [2].

Способность источника ионов Баярда-Альперта генерировать импульсы ионного тока с короткими фронтами обусловлена наличием электронного эмиттера, обеспечивающего быстрый рост скорости ионизации рабочего газа. Большее увеличение скорости ионизации возможно осуществить путем смещения области наиболее сильного ионообразования как можно ближе к экстрагирующему электроду. Рассмотрение множества конфигураций электродов показало, что наилучшим образом это условие реализуется при эллиптической форме анодной сетки, обладающей потенциалом +300 В (рис. 7), для которой время нарастания ионного тока составляет 0.15 мкс (рис. 8), при амплитуде ионного тока в 400 мкА и давлении молекулярного дейтерия в 0.5 мТорр. Данный результат обусловлен способностью эллиптической сетки фокусировать электронный поток в область вблизи экстрагирующего электрода, что значительно сокращает время дрейфа образующихся там ионов.

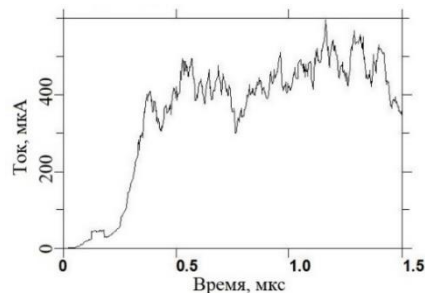
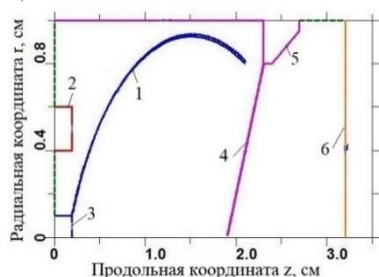


Рис. 7. Модель ионного источника в KARAT: 1 – анодная сетка, 2 – катод, 3 – анодный штырь, 4 – сетка экстрактора,

5 – экстрактор, 6 – эквивалентный мишенный электрод

Рис. 8. Временная зависимость тока молекулярных ионов дейтерия на мишенный электрод.

Таким образом, была получена эллиптическая конфигурация источника ионов Баярда-Альперта газонаполненной нейтронной трубки, позволяющая получать фронты импульсов ионного тока величиной 0.15 мкс, при амплитуде тока молекулярных ионов дейтерия в 400 мкА и минимальном рабочем давлении в 0.5 мТорр.

### Список литературы

1. Chen F.K., Liberman A.D. Neutron Generator: pat. № 5292 419 USA. USA, 1994.
2. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KARAT: дис. д-ра физ. мат. наук. ОИВТ РАН и ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, 2011.



П.В. ФЕДОРЕЦ, П.В. БАЛАНУЦА, А.С. ГЕРАСИМОВ, А.А. ГОЛУБЕВ, Л.Н. ГУСЕВ, А.Г. ДОЛГОЛЕНКО, А.В. КАНЦЫРЕВ, В.И. КАРАСЕВ, Н.М. КРИСТИ, Е.М. ЛАДЫГИНА, С.А. МАКАГОНОВ, В.А. ПАНЮШКИН, А.Н. ПАНЮШКИНА, И.А. ТАРАСЕНКО, А.Б. ХАЛЯВИН

*НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия*

## **КРИОГЕННАЯ КОРПУСКУЛЯРНАЯ КСЕНОНОВАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ЛИТОГРАФИИ**

Представлена конструкция криогенной корпускулярной мишени, способная создавать регулярный монодисперсный поток сферических микромишеней из замороженного газа Xe с варьируемым диаметром от 15 до 40 мкм и частотой от нескольких десятков до нескольких сотен кГц. Рассмотрен вариант использования микромишеней из ксенона для фотолитографии в глубоком ультрафиолете (EUV).

P.V. FEDORETS, P.V. BALANUTSA, A.S. GERASIMOV, A.A. GOLUBEV, L.N. GUSEV, A.G. DOLGOLENKO, A.V. KANTSYREV, V.I. KARASEV, N.M. KRISTI, E.M. LADYGINA, S.A. MAKAGONOV, V.A. PANYUSHKIN, A.N. PANYUSHKINA, I.A. TARASENKO, A.B. KHALYAVIN

*NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

## **CRYOGENIC CORPUSCULAR XENON TARGET FOR LITHOGRAPHY**

A design of a cryogenic corpuscular target is presented that is capable of creating a regular monodisperse flow of spherical microtargets from frozen Xe gas with a variable diameter from 15 to 40  $\mu\text{m}$  and a frequency from several tens to several hundreds of kHz.

A variant of using xenon microtargets for extreme ultraviolet lithography (EUV) is considered.

Криогенная корпускулярная водородная мишенная установка предназначена для применения в научных экспериментах на ускорителях и лазерах. Регулярный монодисперсный поток сферических микромишеней из твердого замороженного газа с варьируемым диаметром от 15 до 40 мкм и частотой от нескольких десятков до нескольких сотен кГц востребован в качестве внутренних мишеней в физических экспериментах на ускорителях [1]. Планируется использование данной мишени в эксперименте PANDA (Proton ANihilation in Darmstadt).

В НИЦ “Курчатовский институт” разработан и создан полномасштабный макет криогенной мишенной установки, в которой для генерации потока водородных микромишеней созданы необходимые термо и гидродинамические условия течения для трансформации поступающего в установку рабочего газа в цепочку твердых гранул. В установке реализуются процессы криогенного охлаждения и оживления газов, формирования жидкой микроструи и управляемого монодисперсного разбиения ее на капли одинакового размера, с последующим замораживанием капель и образованием твердых гранул при инъекции в вакуумный тракт. Охлаждение осуществляется маловибрационным охладителем замкнутого типа. Установка включает криогенную, вакуумную и газовую системы, а также системы контроля, оптической диагностики и управления [2]. Достигнуты требуемые температурные диапазоны и первые режимы генерации монодисперсных микромишеней из водорода.

Накопленный опыт работы и научно-техническая база дает возможность адаптации и использования данной установки в технологии производства микрочипов на основе фотолитографии в глубоком ультрафиолете (EUV).

Имеется несколько альтернативных материалов мишени для генерации EUV. Основными являются олово и ксенон. В настоящее время преимущественно используется олово, по причине более высокой конверсионной эффективности. Но главной проблемой при использовании олова является создание многочисленных осколков взаимодействия, которые оседая на зеркалах установки, снижают качество генерируемого излучения. Ксенон, несмотря на меньшую конверсионную эффективность, лишен этого недостатка. Так как после взаимодействия с лазером переходит в газовое состояние и откачивается, не оставляя твердых осадков.

### *Список литературы*

1. Buscher M. et al. // AIP Conf. Proc. 2006. V. 814. P. 614.
2. Kantsyrev A.V. et al. // Phys.Atom.Nucl. 82 (2020) 12, 1665-1671

А.А. БАЛДИН<sup>1</sup>, В.В. КОБЕЦ<sup>1</sup>, В.В. БЛЕКО<sup>1</sup>, Н.В. ЧЕРНЕГА<sup>2</sup>, М.А. КАРПОВ<sup>2</sup>,  
С.Ф. УМАНСКАЯ<sup>2</sup>, М.А. ШЕВЧЕНКО<sup>2</sup>, Т.В. МИРОНОВА<sup>2</sup>, А.Д. КУДРЯВЦЕВА<sup>2</sup>,  
Н.А. КЛЕОПОВА<sup>3,4</sup>, М.В. ТАРЕЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Московская область, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова(ФГУП ВНИИА), Москва, Россия

<sup>4</sup>ООО «Даймонд Вижн», Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200

Рассмотрены возможности применения упорядоченных трехмерных матриц фотонных кристаллов для генерации терагерцового, оптического и нейтронного излучений при взаимодействии с ними пучка высокоэнергетических электронов.

A.A. BALDIN<sup>1</sup>, V.V. KOBETS<sup>1</sup>, V.V. BLEKO<sup>1</sup>, N.V. TCHERNIEGA<sup>2</sup>, S.F. UMANSKAYA<sup>2</sup>,  
M.A. KARPOV<sup>2</sup>, M.A. SHEVCHENKO<sup>2</sup>, T.V. MIRONOVA<sup>2</sup>, A.D. KUDRYAVTSEVA<sup>2</sup>, N.A.  
KLEKOVA<sup>3,4</sup>, M.V.TAREEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Moscow region, Dubna, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov(FSUE VNIIA), Moscow, Russia

<sup>4</sup>Diamond Vision LLC, Moscow, Russia

## APPLICATION OF PHOTONIC CRYSTALS TO GENERATE BROADBAND RADIATION AT THE LINAC-200 LINEAR ACCELERATOR

The possibilities of using ordered three-dimensional arrays of photonic crystals for the generation of terahertz, optical, and neutron radiation with the interaction of a high-energy electron beams are considered.

В рамках коллаборации FLAP в ОИЯИ [1] в настоящее время ведутся исследования взаимодействия высокоэнергетических пучков электронов с метаматериалами. Трехмерные фотонные кристаллы, состоящие из глобул плотно упорядоченных сфер диоксида кремния с характерными диаметрами в диапазоне от 10 нм до нескольких мкм, являются инструментом для решения важных задач по генерации как оптического, так и терагерцового излучений при прохождении вблизи их поверхности пучка заряженных частиц [2]. Также при взаимодействии пучка электронов определенных энергий с мишенями различного состава в области электроядерных, фотоядерных реакций и в области гигантского дипольного резонанса (несколько десятков МэВ) получают нейтронные потоки высокой интенсивности. Для разделения широкого нейтронного спектра по энергиям и для получения моноэнергетических нейтронов можно применять трехмерные фотонные кристаллы как дифракционную решетку для тепловых нейтронов [3] по аналогии с монохроматором. В ряде случаев эффективность такой решетки оказывается на порядок выше традиционной двумерной, изготовленной методом фотолитографии.

В работе представлены результаты измерений оптических, нейтронных и СВЧ спектров генерируемого излучения при взаимодействии электронных пучков с мишенями в виде фотонных кристаллов в различных режимах облучения и при различных температурах, в том числе криогенных. Показано, что спектры нейтронов, генерируемые электронным пучком из монокристаллических бинарных, тройных и других монокристаллов сложного состава, качественно отличаются от нейтронных спектров, полученных из мишеней моносостава и впоследствии прошедших через нейтронную дифракционную решетку на основе трехмерного фотонного кристалла. Также показано, что электромагнитное излучение, получаемое на выходе из фотонного кристалла при его бомбардировке электронным пучком, имеет ряд характерных пиков в спектре, чего не наблюдается при бомбардировке пучком металлических мишеней однородного состава. Полученные результаты расширяют полученные нами ранее данные [4].

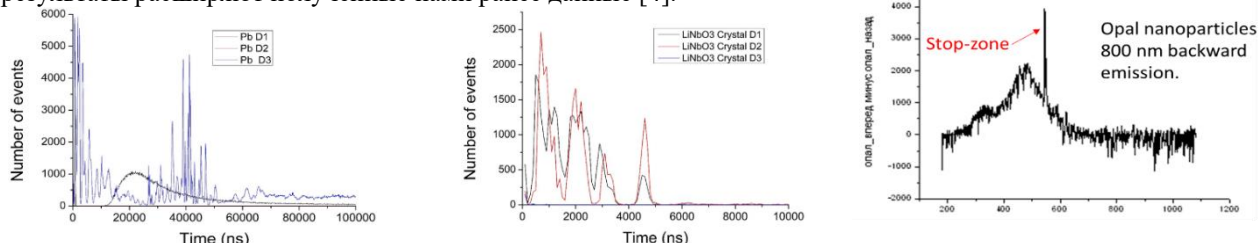


Рисунок 1. Спектры излучений (слева направо): свинцовой мишени; LiNbO<sub>3</sub>; опаловая матрица с глобулами 800 нм.

Список литературы

1. Baldin, A. et al. FLAP Collaboration: Tasks and Perspectives. Phys. Part. Nuclei Lett. 18, 338–353 (2021).
2. S. Yamaguti, et al. Photonic crystals versus diffraction gratings in Smith-Purcell radiation. Phys. Rev. B 66, 7 November 2002.
3. M Fally et al. Experimental determination of nanocomposite grating structures by light- and neutron-diffraction in the multi-wave-coupling regime, Opt. Express 29, 16153-16163 (2021).
4. Shevchenko, M.A. et al. Electromagnetic microwave generation by acoustic vibrations gives rise to nanoradiophotonics. Sci Rep 11, 7682 (2021).

**ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ SDTL**

В коротких резонаторах структуры SDTL, работающей на колебании TM010, не предусматривается элементов для стабилизации распределения ускоряющего поля и смещения нерабочих колебания. Рассмотрены дисперсионные свойства резонаторов SDTL оптимизированного для максимального эффективного шунтового сопротивления. Дополнительными ограничениями при разработке резонаторов SDTL является нежелательная близость частот мод TM011 и TE111 к рабочей.

V. PARAMONOV

INR RAS, 117312B Moscow, Russia

**DISPERSION PROPERTIES OF THE SDTL ACCELERATING STRUCTURE**

In short SDTL cavities, operating in TM010 mode, there are no elements for accelerating field distribution stabilization and parasitic modes removal. Dispersion proportion of cavities, optimized for maximal shunt impedance, are considered. An additional limitation in cavities development is undesirable proximity of TM011 and TE111 modes to the operating one.

Достоинствами структуры SDTL, [1], Рис. 1а, является относительная простота изготовления, настройки, юстировки и обслуживания. В трубках дрейфа нет фокусирующих элементов, вынесенных за пределы резонатора. В широком диапазоне частот рассмотрены дисперсионные характеристики резонаторов, возможных для ускорения протонов в диапазоне энергий от 4 МэВ до 200 МэВ. Для обеспечения постоянства амплитуды ускоряющего поля все периоды резонатора должны быть настроены на рабочую частоту  $f_w$ , [2]. Низшей всегда является полоса мод TEM1 штанг как четверть волновых вибраторов, Рис. 1б. С увеличением числа периодов N и скорости частиц  $\beta$  понижаются частоты мод TM01n, что можно оценить по (1а). Неизбежные при изготовлении отклонения размеров элементов ведут к отклонениям частот периодов с дисперсией  $sf$ , что ведет к неравномерности ускоряющего поля с дисперсией  $sE$ , (1б), [3].

$$f_{TM01n} = f_w \sqrt{1 + \left(\frac{2n}{N\beta}\right)^2}, \text{ (a)}, \sigma_E^2 = \sigma_f^2 \frac{4}{N} \sum_{n=1}^N \left[1 + \left(\frac{2N\beta}{n}\right)^2\right]^2, \text{ (b)}, \quad (1)$$

В области частот свыше  $1.3f_w$  наблюдается многообразие взаимодействующих всевозможных мод резонатора, практическая и методическая ценность исследования которых не очевидна.

В цилиндрическом волноводе волна TE11 является основной и в резонаторе моды с вариацией поля по азимуту расщепляются по частоте из-за наличия необходимых штанг. Низшая по частоте мода TE111 по частоте опасно приближается к рабочей частоте, Рис. 1б,в.

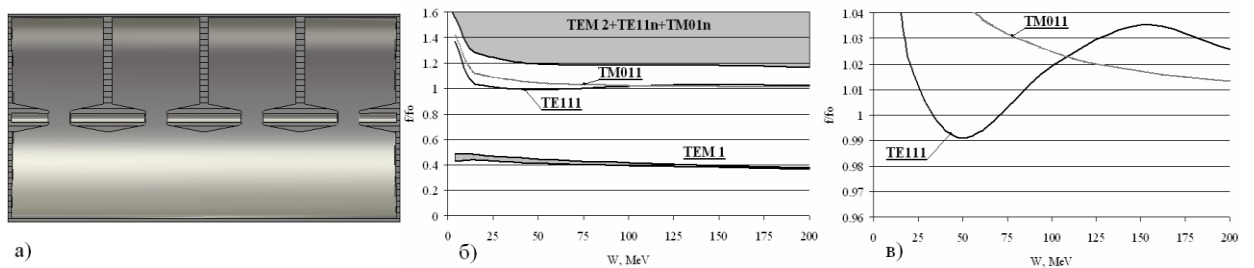


Рис.1. Резонатор SDTL (а), полосы частот колебаний в широком диапазоне (б) и зависимости частот мод TM011 и TE111 в окрестности частоты рабочей моды, N=5.

Приближение по частоте мод TM011 и TE111 является дополнительным ограничивающим фактором при разработке резонаторов SDTL.

Список литературы

1. T.Kato // Proposal of a Separated-type Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure. KEK report 92-10, 1992
2. S. Wang, T. Kato, V. Paramonov. Improvements in the SDTL of the J-PARC Proton Linac. Proc. Linac 2004, p. 489, 2004
3. V. Paramonov, T. Kato, Y. Yamazaki et.al./ Bridge Coupling Cavities in the SDTL Structure. Proc. Linac 1998, p. 582, 1998

Л.Ю. ОВЧИННИКОВА<sup>1,2</sup>, В.В. ПАРАМОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЯИ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург, Россия

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЧ СИГНАЛА В ТW СТРУКТУРЕ УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Описана методика моделирования распространения СВЧ сигнала в ускоряющей структуре на бегущей волне методом эквивалентных схем. Выполнены расчёты распространения сигнала с частотой 2856 МГц в ускоряющей структуре с постоянным градиентом, состоящей из 102 ячеек. Показана возможность изменения энергии ускоренного пучка за счёт вращения фазы сигнала внутри длинного импульса.

L. OVCHINNIKOVA<sup>1,2</sup>, V. PARAMONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INR RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ferrite Domen Co., St. Petersburg, Russia

## SIMULATION METHOD OF THE RF SIGNAL PROPAGATION IN A TW STRUCTURE FOR MEDICAL PROTON LINAC

Simulation method of the RF signal propagation in a traveling wave accelerating structure by the method of equivalent circuits is described. Calculations were made for the propagation of a signal with the frequency of 2856 MHz in an accelerating structure with the constant gradient, consisting of 102 cells. The possibility of changing the energy of the accelerated beam due to the rotation of the phase of the signal within a long pulse is shown.

Управление глубиной дозового воздействия осуществляется регулировкой энергии протонов. В [1] показана возможность изменения выходной энергии пучка от импульса к импульсу за счёт изменения только фазы СВЧ сигнала. В развитии этой методики сформулирована идея изменения выходной энергии пучка за счёт изменения фазы во время одного длинного СВЧ импульса. Моделирование распределения поля для СВЧ сигнала с изменяющейся фазой и распространяющегося в Ускоряющей Структуре (УС), содержащей до 100 ячеек с переменными параметрами, проводится методом эквивалентных схем [2]. Написана и протестирована программа расчёта характеристик распространяющейся в УС волны, входными параметрами которой являются длины, шунтовые сопротивления, добротности ячеек УС, групповая скорость волны  $\beta_g$  и скорость равновесной частицы  $\beta_p$ , несущая частота, общая длительность, форма и длительность фронтов, время и величина изменения фазы СВЧ сигнала на входе в УС. Отсутствие отражённой волны обеспечивается согласующим сопротивлением на конце структуры. Связь переменной групповой скорости волны  $\beta_g$  в структуре с переменным коэффициентом связи  $k$  между моделирующими ячейками даётся соотношением:  $k = \Xi / (\sin \Theta - \Xi \cos \Theta)$ ,  $\Xi = 2\beta_g / (\Theta\beta_p)$ , где  $\Theta$  - сдвиг фазы поля на период УС. Необходимые электродинамические характеристики ячеек берутся из электродинамического расчёта УС на бегущей волне с постоянным градиентом. Во временной области решается система дифференциальных уравнений для эквивалентной напряжённости поля в ячейках. В постпроцессоре программы выводятся эквивалентные значения полей в ячейках ускоряющей структуры в зависимости от времени, на основе которых проводится расчёт разности фаз между ячейками, формируются огибающие и т.п. В качестве примера приведено моделирование распространения прямоугольного СВЧ импульса, длительностью 7 мкс (при времени заполнения УС ~1.0 мкс) со скачком фазы на  $60^\circ$  в момент времени 3.5 мкс. Показана возможность изменения напряжённости поля, в которое попадает частица (чёрная кривая на рисунке 3, и как следствие изменение набора энергии в процессе ускорения.

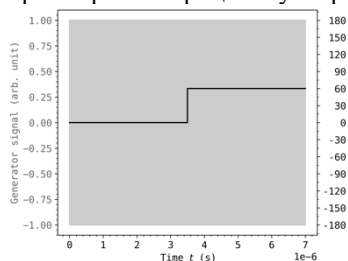


Рис. 1. Сигнал на входе в УС. В 3.5 мкс задан скачок фазы от 0 до  $60^\circ$ .

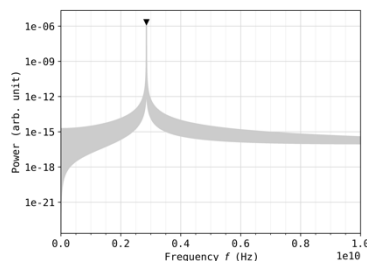


Рис. 2. Периодограмма входного сигнала. Частота 2856 МГц.

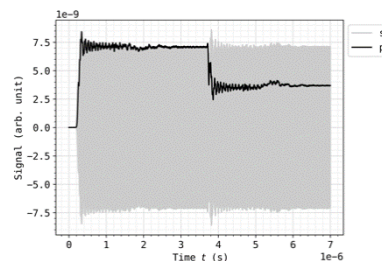


Рис. 3. Поле в 50 ячейке. Чёрная линия - поле в момент пролёта протона.

### Список литературы

1. Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A.A., "A Linear Accelerator for Proton Therapy", in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 117-119. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
2. D.E. Nagle, E.A. Knapp, and B.C. Knapp, "Coupled Resonator Model for Standing Wave Accelerator Tanks", Review of Scientific Instruments 38, 1583-1587 (1967) <https://doi.org/10.1063/1.1720608>

А.А. КУЛИКОВ<sup>1</sup>, А.О. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «НПП «Магрател», Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## МАГНЕТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ИНВЕРТОРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ

Рассмотрены источники микроволнового излучения на основе магнетронных генераторов с инверторными источниками анодного напряжения для использования в источниках ионов на основе микроволнового разряда в паровых и газовых средах. Изучена возможность использования магнетрона с инверторным источником высоковольтного питания для работы ЭЦР источников ионов. Проведено исследование зависимости энергетических и частотных характеристик магнетронов от инверторных источников питания с возможностью регулировки СВЧ мощности. Подготовлен эскизный проект системы СВЧ-питания источника ионов.

A.A. KULIKOV<sup>1</sup>, A.O. MOROZOV<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock Company 'NPP 'Magratel', Fryazino, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MAGNETRON GENERATORS WITH INVERTER POWER SUPPLY FOR ION SOURCES

The microwave sources based on magnetron generators with inverter anode voltage power supply for ion sources based on microwave discharge are considered. The possibility of using magnetron with high-voltage inverter power supply to power ECR ion sources has been studied. A study of energy and frequency characteristics the dependence of magnetron with inverter power supply sources with microwave power adjust was made. The preliminary design of a microwave power supply system for ion source has been prepared.

Источники ионов на основе ЭЦР-разряда применяются в ускорительной технике для получения ионов высокой зарядности и высоких импульсных токов. Рассмотрена возможность использования современных магнетронных генераторов [1] для питания источников ионов на основе ЭЦР разряда для получения легких ионов и протонов при использовании. Ранее изучалась возможность использования бытового магнетрона на частоте 2,45 ГГц для питания ЭЦР источников ионов с регулируемым трансформаторным источником высоковольтного анодного питания [2]. Было показано, что создание инверторного источника анодного тока магнетрона [3] для работы в непрерывном режиме в настоящее время является актуальной задачей.

Разработан высоковольтный инверторный источник питания с возможностью регулировки мощности магнетрона изменением анодного тока в широком диапазоне и обеспечивающим улучшенные характеристики СВЧ-излучения. Источник питания построен по схеме квазирезонансного мостового преобразователя с фазовым регулированием с частотой преобразования 100 кГц. Для обеспечения высокого КПД и улучшения коэффициента мощности источника питания применен корректор коэффициента мощности, построенный по схеме повышающего преобразователя. Силовой трансформатор имеет несколько выходных обмоток, каждая из которых работает на свой выпрямитель, реализованный по схеме удвоителя напряжения, со сглаживающим фильтром. Для получения требуемого высокого напряжения выпрямители включены последовательно. Источник питания работает в режиме стабилизации тока. Также для обеспечения минимальных пульсаций выходной СВЧ мощности разработан источник питания накала магнетрона, обеспечивающий питание накала напряжением постоянного тока. Исследована работа магнетрона с разработанным источником питания. Предложены меры по дополнительному улучшению характеристик выходного СВЧ излучения, в том числе для увеличения мощности.

На собранном испытательном стенде для измерения характеристик магнетрона [2] изучены характеристики работы магнетрона с разработанным инверторным источником питания. Используя разработанный источник питания, проведены исследования работы магнетрона при изменении анодного тока и построена зависимость выходной мощности магнетрона от анодного тока. Проведенные измерения показывают, что разработанный источник позволяет управлять генерируемой мощностью от 60 до 800 Вт. Выполнены исследования частотных характеристик излучения магнетрона при изменении анодного тока, которое показало, что с увеличением анодного тока генерируемая прибором частота увеличивается незначительно. На разработанном стенде исследована работа магнетрона с несколькими модификациями инверторных источников магнетронов фирмы Panasonic и показана невозможность получения непрерывного излучения при работе с данным типом источников питания.

Таким образом, в работе показана возможность использования бытового магнетрона для создания на его базе системы питания ЭЦР источника ионов и определены особенности их работы.

### Список литературы

1. А.Н. Каргин и др. Электронная оптика современных магнетронов / СВЧ- техника, выпуск 3(526) 2015. – С. 27 – 35.
2. А.А. Куликов, А.О. Морозов, А.В. Прокопенко Микроволновые генераторы для ионных источников // Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛАПЛАЗ-2022, 2022. С. 312.
3. К.В. Рогожин. Особенности работы магнетрона с инверторным блоком питания в микроволновых промышленных установках // Всероссийская конференция. Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербург. 2018. С. 165-167.

## ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ СТРУКТУРЫ SDTL СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ

Ускоряющая структура SDTL (Separated Drift Tube Linac), работающая на колебании TM010, не содержит фокусирующих элементов в трубках дрейфа. Применение SDTL на частотах порядка 320 МГц для ускорения ионов водорода на низких, порядка единиц МэВ, энергиях затруднено существенным распылением сгустков в межрезонаторных промежутках. Предложена методика формирования геометрии резонаторов SDTL, в которых частицы проходят один из зазоров в фазе  $-90^\circ$ . Определены границы регулировки величины поля в группирующем зазоре. Приводятся примеры резонаторов.

I.V. Rybakov, V.V. Paramonov  
 Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia

## CAVITIES FORMATION IN THE SDTL STRUCTURE WITH SPECIAL PARTS

The accelerating structure SDTL (Separated Drift Tube Linac), operating in TV010 mode, doesn't contain focusing elements in the drift tubes. SDTL application at frequencies on the order of 320 MHz for hydrogen ions acceleration at few MeV energy scale is hindered by the significant bunch spreading in the intercavity gaps. A method is proposed for SDTL geometry forming in which particles pass one gap with the phase  $-90^\circ$ . The limits for the field value adjusting in bunching gap are determined. Examples of cavities are presented.

Структура SDTL, [1], работающая на колебании E010, (4-7 ускоряющих зазоров), реализует короткие резонаторы, в сравнении с классическими резонаторами Альвареца, и не содержит фокусирующих элементов в трубках дрейфа. Это позволяет лучше оптимизировать структуру по ВЧ характеристикам, упрощает изготовление и настройку структуры. Но при применении SDTL для ускорения ионов водорода на малых энергиях, порядка единиц МэВ, происходит значительное продольное распыление сгустков в межрезонаторных промежутках. Для компенсации этого эффекта рассмотрена возможность построения резонаторов с изменениями в геометрии отдельных периодов, позволяющими им проводить продольное группирование сгустков.

Для обеспечения постоянного ускоряющего поля на оси резонатора все периоды должны быть настроены на рабочую частоту, [2], и для подстройки крайних периодов, отличающихся от внутренних, используются дополнительные настроенные кольца на торцевых стенках (рис. 1 б, в). Из уравнений Максвелла следует

$$\mu_0 \omega \int_S H_\varphi dr dz = \oint_{ABCD} E_\tau dl = \int_B^C E_z dz = E_{z0} D, \quad (1)$$

где контурный интеграл берется по ограничивающему период контуру, а интеграл по площади – по площади, ограниченной контуром, (рис. 1 а).

Если регулярные ускоряющие зазоры частица проходит в синхронной фазе поля  $\varphi_s$ , то группирующий зазор проходится при фазе  $-90^\circ$ , причем длина периода SDTL  $D = \beta\lambda$  соответствует  $360^\circ$ . Для формирования первого (входного) зазора как группирующего его центр необходимо расположить на расстоянии  $\Delta l = (360^\circ + 90^\circ - |\varphi_s|) / 360^\circ \beta\lambda$  от центра последующего, как показано на рис. 1 а. Для формирования последнего (выходного) зазора как группирующего его центр должен находиться соответственно на расстоянии  $\Delta l = (360^\circ - 90^\circ + |\varphi_s|) / 360^\circ \beta\lambda$  (рис. 1 б) от предыдущего. Нет ограничения и на изменение геометрии одновременно первого и последнего зазоров, рис. 1 в.

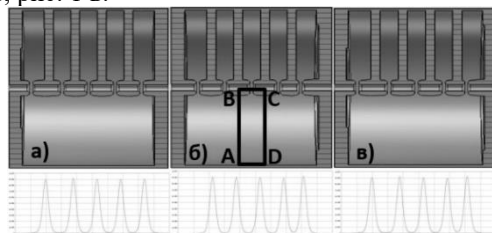


Рис. 1. Распределения  $E_z$  по оси резонатора с группирующим входным зазором, а), выходным, б) и одновременно группирующими входным и выходным зазорами, в)

При выполнении условия (1) в группирующих зазорах реализуется равная с регулярными зазорами величина поля  $E_z$ . Снижение величины продольного электрического поля в группирующих зазорах, согласно (1), возможна за счет уменьшения площади ограничивающего период контура при необходимом поддержании постоянства собственной частоты периода. Изменением конфигурации торцевых стенок и расположенных на них полу трубок, без нарушения характеристик прилегающих регулярных периодов, возможно понижение амплитуды  $E_z$  в группирующих зазорах до  $\sim 30\%$ - $40\%$  от амплитуды в регулярных.

### Список литературы

1. T.Kato // Proposal of a Separated-type Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure. KEK report 92-10, 1992
2. S. Wang, T. Kato, V. Paramonov // Proc. Linac 2004, p. 489, 2004



К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ,  
Т.В. КУЛЕВОЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКИ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЭЦР-ИСТОЧНИКА ЛЕГКИХ ИОНОВ

В Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается мишенный комплекс для проведения экспериментов по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов с использованием многопучковых технологий. В состав комплекса входит канал ускорения и транспортировки легких ионов. Для этого канала разрабатывается ЭЦР-источник легких ионов (гелий, водород). В докладе представлена работа по определению сопротивления плазмы ЭЦР-источника.

K.E. PRYANISHNIKOV, A.B. ZARUBIN, N.N. VINOGRADSKY, D.N. SELEZNEV, T.V. KULEVOY  
*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## DETERMINATION OF THE PLASMA LOAD RESISTANCE OF A MAGNETRON GENERATOR FOR THE LABORATORY ECR SOURCE OF LIGHT IONS

The Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics of the National Research Center "Kurchatov Institute" is developing a target complex for conducting experiments on express analysis of the radiation resistance of structural materials of nuclear and thermonuclear reactors using multi-beam technologies. The complex includes a channel for the acceleration and transport of light ions. An ECR source of light ions (helium, hydrogen) is being developed for this channel. The report presents the work on the determination of the resistance of the plasma of the ECR source.

Рабочий вариант конструкции разрабатываемого ионного источника [1] основан на прямоугольном волноводе. Профиль волновода, подводящей ВЧ-мощности части, совпадает с профилем разрядной камеры. Источником электромагнитной волны в источнике служит магнетрон мощностью 700 Вт, работающий на частоте 2,465 ГГц. Режим работы источника – импульсный с частотой повторения импульсов до 2 Гц при длительности импульса 1 мс. Вакуумное ВЧ-окно в данном источнике представляет собой диэлектрическую прямоугольную вставку в волновод.

Плазма в ЭЦР-источнике является нагрузкой магнетронного генератора после зажигания разряда. В разных источниках приводят сопротивление плазмы в ЭЦР-источниках ионов равное 100 Ом [2,3] или 120 Ом [4]. Величина сопротивления плазмы зависит от свойств плазмы на которые влияют геометрическая структура источника ионов, состав газа и магнитное поле. Обеспечив условия устойчивой работы источника, с целью улучшения ВЧ-связи волноводного тракта с разрядной камерой было измерено сопротивление плазмы. Измерения сопротивления плазмы выполнены согласно рисунку 1.

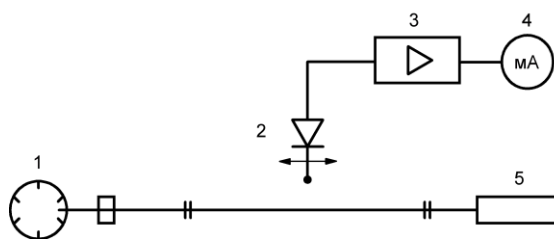


Рис. 1. Схема измерения плазменной нагрузки: 1-магнетрон, 2-диод, 3-усилитель, 4-измеритель тока, 5-плазменная нагрузка

В измерительной секции источника с использованием диодного детектора измерен коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) и положения минимума стоячей волны во время работы источника. В среде моделирования воспроизведена конструкция ВЧ-тракта и определены условия согласования.

Знание сопротивления плазмы позволяет рассчитать согласующие элементы в ЭЦР-источнике, что позволит оптимизировать высокочастотную часть ЭЦР-источника ионов.

### Список литературы

1. Селезнев Д.Н., Зарубин А.Б., Виноградский Н.Н. и др. // СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ. 2022. 1. С.318.
2. Misra A., Pandit V.S. //Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85, №. 6, P. 063301.
3. Jo J. G. et al. //Physics of Plasmas. 2021. Vol. 28, № 9, P. 093502.
4. Swaroop R, Kumar N., Rodrigues G. //Review of Scientific Instruments. 2021. Vol. 92, №. 5. P. 053306.



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСКОРИТЕЛЮ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ИМПУЛЬСА К ИМПУЛЬСУ

Проведено расчётное моделирование рабочих режимов линейного ускорителя электронов с перестройкой энергии от импульса к импульсу, предназначенного для инспекционных комплексов изделий и грузов. Результаты моделирования позволили сформулировать технологические требования на изготовление ускоряющих секций, элементов СВЧ тракта ускорителя, а также эксплуатационные требования к системам ускорителя, при реализации которых обеспечивается стабильная работа ускорителя.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR ELECTRON ACCELERATOR WITH ENERGY TUNING FROM PULSE TO PULSE

Computational modeling of operating modes of linear electron accelerator with energy tuning from pulse to pulse, intended for inspection complexes of products and cargo, has been carried out. Simulation results made it possible to formulate technological requirements for manufacture of accelerating sections, elements of microwave tract of accelerator, as well as operational requirements for accelerator systems, the implementation of which ensures accelerator stable operation.

Обеспечение режима двух энергий в установке инспекции грузов, осуществляется различными методами [1]. Одним из этих методов является перестройка мощности, поступающей в ускоряющие секции от импульса к импульсу. Важными задачами создания и эксплуатации установки для инспекции является определение и реализация технологических и эксплуатационных требований к системам и узлам ускорителя, при реализации которых обеспечивается эффективная работа установки.

В рассматриваемом ускорителе [2] перестройка энергии обеспечивается переключением мощности, поступающей в ускоряющие секции. На рис.1: 1, 2 – ускоряющие секции со стоячей волной, 3 – питающий генератор, 4 – ферритовый циркулятор, 5 – фазовращатель, 6 – режекторный фильтр, работающий в импульсном режиме, 7 – нагрузка.

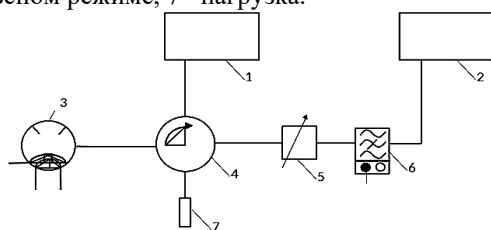
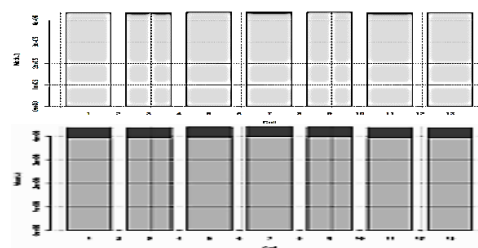


Рис. 1. Схема ускорителя



$\Delta f = 0.3 \text{ МГц}$

Рис. 2. Распределение поля в ускоряющих секциях при расстройке частот ячеек

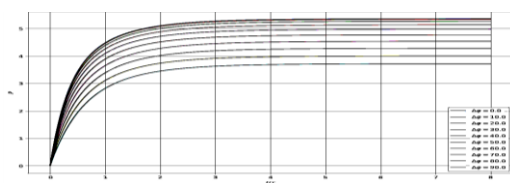


Рис. 3. Зависимость мощности в секциях от фазы влёта сгустков из первой во вторую секцию

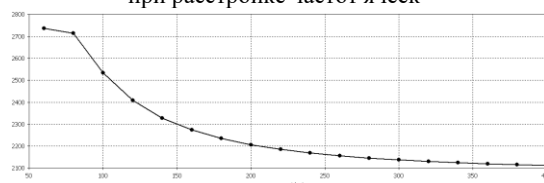


Рис. 4. Зависимость частоты второй секции от перемещения закоротки на её входе в режиме низкой энергии

В работе проведены расчёты распределения полей в секциях при идеальной настройке секций и при некоторой расстройке отдельных ячеек (рис.2), зависимости мощности в секциях от фазы влёта сгустков и первой секции во вторую (рис.3), рабочей частоты второй секции при различных положениях «закоротки», моделирующей режекторный фильтр во включённом состоянии (рис.4) и ряд других характеристик. Указанные расчёты позволили сформулировать технологические и эксплуатационные требования к ряду систем ускорителя, определяющие эффективность его функционирования в составе инспекционного комплекса.

### Список литературы

1. Завадцев А.А. и др. / Система инспекции грузов на основе дуального линейного ускорителя электронов // ПТЭ 2, 2011, с. 151–159.
2. Каминский В.И., Мациевский С.В. / Анализ характеристик линейного ускорителя электронов с импульсной перестройкой энергии // VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии Лаплаз-2022», Сборник научных трудов, М., 2022, с.311.

А. СУХОЦКИЙ, Г. ВОЛЫНЕЦ, Е. ГУРНЕВИЧ, Д. БЫЧЕНОК, М. ЛАЛАЯН, М. ГУСАРОВА,  
С. ПОЛОЗОВ

Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛУВОЛНОВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

Рассмотрены общие принципы работы системы фазовой автоподстройки частоты при тестировании ниобиевых полуволновых резонаторов в сверхпроводящем состоянии. Показано отличие работы резонатора при фазовой автоподстройке частоты и при ручной подстройке.

A. SUKHOTSKI, G. WALYNETS, E. GURNEVICH, D. BYCHANOK  
Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus  
M. LALAYAN, M. GUSAROVA, S. POLOZOV  
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## USE OF A PHASE-LOCKED FREQUENCY LOOP IN STUDYING THE ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF COAXIAL HALF-WAVE SUPERCONDUCTING CAVITIES

The general principles of the phase locked loop system operation for testing niobium half-wave accelerating cavities in the superconducting state are considered. The difference between cavity operation with phase locked loop and manual tuning is shown.

Одной из проблем при тестировании работы сверхпроводящих резонаторов с высокой добротностью является тот факт, что ширина резонансного пика в сверхпроводящем состоянии соизмерима или меньше диапазона нестабильности частоты всей тестируемой системы [1,2]. Кроме нестабильности частоты генератора в системе со сверхпроводящим резонатором присутствуют колебания его резонансной частоты, вызванные вибрациями, исходящими от вакуумного, криогенного и иного промышленного оборудования, градиентом температур, силой Лоренца и т.п.

При тестировании резонаторов в сверхпроводящем состоянии необходимо подводить мощность различной величины к резонатору, тем самым «закачивая» в него энергию. При значительном отклонении частоты подаваемого сигнала от резонансной частоты системы (более полуширины резонансного пика) практически вся подаваемая мощность не проходит в резонатор и отражается, что приводит к возникновению различного рода проблем:

1. невозможность возбуждения в резонаторе колебаний с требуемой напряжённостью электромагнитного поля;
2. искажение временного/частотного спектра и сложность интерпретации измеряемых величин;
3. при работе на большой мощности значительный перегрев оборудования и повышение вероятности его выхода из строя.

Все это приводит к необходимости реализации автоподстройки частоты подаваемого сигнала к изменяющейся резонансной частоте системы. Подстройка заключается в автоматической дополнительной регулировке частоты генератора по информации о рассогласовании частоты из цепи обратной связи. Цепь обратной связи реализуется через сигнал, выходящий из полевой антенны в резонаторе. Из-за особенностей фазового сдвига возле области резонанса применяется фазовая автоподстройка частоты. Информация по рассогласованию частоты в цепи обратной связи сводится к рассогласованию сдвига фаз.

На рисунке 1 показаны типичные временные зависимости сигналов, выходящих из полевой антенны ниобиевого полуволнового резонатора HWR-325 в сверхпроводящем состоянии при фазовой автоподстройке частоты и при ручной подстройке частоты.

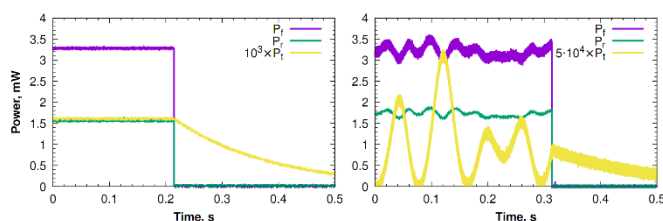


Рис. 1. Мощность сигнала полевой антенны резонатора  $P_t$ , а также подаваемая в резонатор  $P_f$  и отраженная  $P_r$  мощности при наличии фазовой автоподстройки (слева) и без нее (справа).

При отключенной автоподстройке частота подаваемого сигнала иногда попадает в область резонансного пика и происходит частичная накачка резонатора. Если характеристику затухания в этом случае отследить ещё возможно, то установившихся электромагнитных параметров достичь нельзя. Система фазовой автоподстройки частоты позволяет преодолеть указанные выше трудности.

### Список литературы

1. Н. Padamsee, J. Knobloch, and T. Hays, Rf superconductivity for accelerators John Wiley and Sons, Inc., New York, 199 (1998).
2. T. Powers, Practical aspects of SRF cavity testing and operations. SRF workshop proceedings (2011). pp. 60-63
3. D. Bychanok et al, Control of electromagnetic properties during prototyping, fabrication and operation of low-beta 325 MHz half-wave resonators, Journal of Physics D: Applied Physics 54, 255502 (2021).

А.О. ГРЕБЕШКОВ<sup>1,2</sup>, С.Н. АНДРЕЕВ<sup>1,2</sup>, А.Л. СИТНИКОВ<sup>1</sup>, А.И. СЕМЕННИКОВ<sup>1</sup>,  
Г.Н. КРОПАЧЕВ<sup>1</sup>, Т.В. КУЛЕВОЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА DARIA

В ИТЭФ ведется разработка линейного ускорителя для проекта DARIA (DARIA-neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial). Линейный ускоритель, состоящий из двух типов ускоряющих резонаторов: RFQ и IH-DTL, должен обеспечить ускорения протонного пучка с током до 100 мА до энергии 13 МэВ. В работе представлены результаты расчета системы охлаждения резонаторов при работе в импульсном режиме с коэффициентами заполнения 1-5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения №075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.

A.O. GREBESHKOV<sup>1,2</sup>, S.N. ANDREEV<sup>1,2</sup>, A.L. SITNIKOV<sup>1</sup>, A.I. SEMENNIKOV<sup>1</sup>,  
G.N. KROPACHEV<sup>1</sup>, T.V. KULEVOY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research University “Moscow Power Engineering Institute”

## MODELING OF A COOLING SYSTEM OF RESONANT STRUCTURES OF A LINEAR ACCELERATOR FOR A COMPACT NEUTRON SOURCE DARIA

ITEP is developing a linear accelerator for the DARIA project (DARIA-neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Application). A linear accelerator consisting of two types of accelerating resonators: RFQ and IH-DTL, should provide acceleration of a proton beam with a current of up to 100 mA to an energy of 13 MeV. The paper presents the results of calculating the cooling system of resonators when operating in pulsed mode with duty factor of 1-5%.

Work financially supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in framework of Agreement No.075-15-2022-830.

Проекту DARIA для получения потока нейтронов требуется протонный пучок с током до 100 мА и энергии 13 МэВ при длительности импульса 100 мкс и частоте повторения 100 имп/с (коэффициент заполнения 1 %). Ускорение протонного пучка происходит в линейном ускорителе, который состоит из двух типов ускоряющих резонаторов: ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, международная аббревиатура RFQ), ускоряющий пучок протонов до 3 МэВ, и нескольких ускорителей с трубками дрейфа (DTL), ускоряющих протоны до 13 МэВ[1].

Для формирования ускоряющего электрического поля в резонаторах возбуждается электромагнитное высокочастотное (ВЧ) поле. ВЧ поле приводит к индуцированию поверхностного тока, протекающего по внутренним поверхностям резонаторов, который в свою очередь из-за омического сопротивления материала приводит к нагреву. Термические деформации, могут привести к таким изменениям электродинамических характеристик (ЭДХ), которые выведут резонатор из рабочего режима. Для предотвращения этого резонаторы необходимо обеспечить системой охлаждения как внутренних элементов конструкции (электродов в RFQ, трубок дрейфа в DTL), так и наружных.

В работе проводилось численное моделирование тепловой нагрузки структур RFQ и DTL с системой охлаждения при работе в импульсном режиме при коэффициентах заполнения вплоть до 5 %. Моделирование теплообмена проводилось путем расчета среднего коэффициента теплоотдачи (КТО) на стенках каналов охлаждения, который в свою очередь рассчитывался в зависимости от скорости и режима течения охлаждающей жидкости, с учетом ее нагрева. В качестве основного ограничения выступала максимальная допустимая температура - 50°C, ниже которой, согласно расчету, не возникает «критических» термодформаций. В результате данной работы были определены минимальные значения расхода жидкости для охлаждения всего ускорителя (см. рис.1) при которых температура резонаторов не превысит допустимую.

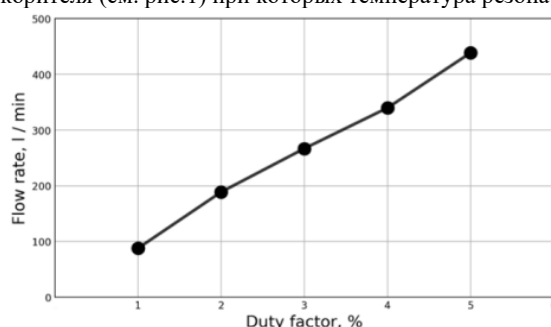


Рис. 1. Зависимость необходимого расхода охлаждающей жидкости от коэффициента заполнения  
Список литературы

1. G.Kropachev, A.Sitnikov, T.Kulevoy, The parameters of radio frequency quadrupole linear accelerator for DARIA project. Cybernetics and Physics. 205-209, 2022

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЗОНАТОРОВ Н-ТИПА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПИКОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ

Выявлены области наибольшей напряженности электрического поля на поверхности пяти зазорных резонаторов *И*-типа ускорителя легких ионов, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ. Определены требования к минимальному радиусу скругления опоры трубок дрейфа.

A.A. GORCHAKOV Y. V. SHASHKOV  
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

## OPTIMIZATION THE GEOMETRY OF H-TYPE RESONATORS IN ORDER TO REDUCE THE PEAK VALUES OF THE ELECTRIC FIELD ON THE SURFACE

The areas of the biggest electric field intensity on the surface of five *I*H-type laser resonators of the light ion accelerator being developed at the MEPHI Research Institute have been identified. The requirements for the minimum radius of rounding of the support of the drift tubes are determined

Для ускоряющих резонаторов *И*-типа ускорителя легких ионов, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ [1-6] для источника синхротронного излучения, проведены расчеты пиковых значений напряженности поля на поверхности. Резонаторы имеют 5 ускоряющих зазоров (Рис.1а), геометрическая скорость резонаторов первой группы *И*H-1 составляет 0,057с, второй группы *И*H-2 0,099с. Максимальные значения напряжения на резонаторах составляют 1,5 МВ и 3,0 МВ соответственно.

Величина поля на поверхности для медных структур в данном частотном диапазоне ограничена величиной определяемой согласно критерию Килпатрика [7] и составляет 10,535 МВ/м на частоте 81,25 МГц в непрерывном режиме. При длительности импульса менее 1 мс данное значение вводится поправочный коэффициент *b* лежащий в диапазоне от 1 до 2.

Результаты моделирования показали, что для резонаторов первой группы максимальная напряженность электрического поля локализуется только на поверхности трубок дрейфа и не превышает величин допустимых согласно критерию Килпатрика. Для резонаторов второй группы было выявлено, что при напряжении 3 МВ наблюдаются напряженности поля превышающие допустимые в области крепления трубок дрейфа рис. 1а. Для снижения величины напряженности поля в этой области был увеличен радиус скругления и проведены расчеты зависимости коэффициента *b* от радиуса скругления торцов балки опоры трубок дрейфа. Показано, что скругление должно составлять не менее 5,0 мм.

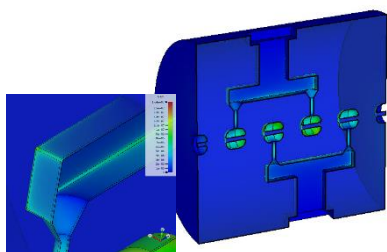


Рис. 1. Локальное повышение напряженности электрического поля на балке опоры трубок дрейфа

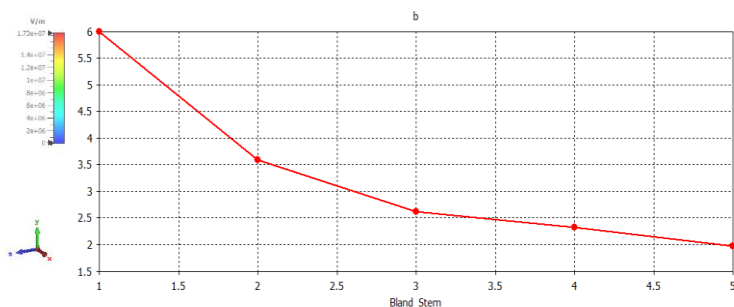


Рис. 2. Зависимость коэффициента *b* от радиуса скругления торцов балки опоры трубок дрейфа при напряжении на резонаторе 3 МВ

### Список литературы

1. S.M. Polozov et al., "The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector", in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 51-54. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07
2. А.А. Горчаков и др., Разработка ускоряющих структур Н-типа // Proc. in LaPlas 2021, P.404-405.
3. Gorchakov A.A. et al., Development of *I*H-type accelerating structures, Physics of Atomic Nuclei. 2021. Т. 84. № 12. С. 2018-2021.
4. Булгачева М.М и др., Выбор геометрии пелли связи устройства ввода мощности для резонаторов Н-типа, Сборник научных трудов VIII Международной конференции ЛАПЛАЗ-2021. Москва, 2022. С. 315.
5. Горчаков А.А. и др., Компенсация дипольной составляющей ускоряющего поля в структурах Н-типа, Сборник научных трудов VII Международная конференция ЛАПЛАЗ-2021. Москва, 2021. С. 410-411.
6. Шарков Г.Б. и др., Унифицированная линейка твердотельных усилителей 40, 81 и 162 МГц для ускорителей лёгких и тяжёлых ионов, Сборник научных трудов VII Международная конференция ЛАПЛАЗ-2021. Москва, 2021. С. 368-369.
7. Kilpatrick, W. D. (1957). "Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc". Review of Scientific Instruments. 28 (10): 824–826. Bibcode:1957RScI...28..824K. doi:10.1063/1.1715731

## КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК БИПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Представлены результаты решения проблемы отклонения соотношения электромагнитных полей в прототипе группирователя ускоряющей секции линейного ускорителя электронов прикладного назначения от расчётных значений. Проведена корректировка модели структуры, рассмотрены возможные причины и пути решения задачи.

A.A. BATOV, R.A. ZBRUEV, M.V. LALAYAN, S.M. POLOZOV  
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

## SUPERVISION OF ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF THE BIPERIODIC ACCELERATING STRUCTURE'S CELLS DURING MANUFACTURING

The results are given to solve the problem of an electromagnetic field deviation in the buncher's prototype of the accelerating section of a linear electron accelerator. The adjustment of the structure model was carried out, possible causes and ways of solving the problem were outlined.

Коллективами НИЯУ МИФИ и НПП «Корад» разработана серия линейных ускорителей электронов прикладного назначения. В статье описаны работы по контролю электродинамических характеристик ячеек (ЭДХ) бипериодической ускоряющей структуры (БУС), выполняемые в ходе изготовления таких ускорителей. Ускоряющая секция разрабатывалась на базе БУС с повышенным коэффициентом связи [1-3].

После изготовления одной из секций было выявлено, что соотношения полей в соседних ячейках группирователя отличаются от расчётных. Необходимо было выяснить возможные причины отклонения соотношений поля и на основании данного анализа предложить варианты доработки. Расчет вариационных характеристик позволил выявить параметры, отклонение которых при изготовлении оказывает сильное влияние на соотношение полей в соседних ячейках группирователя, при этом не оказывая существенного влияния на резонансную частоту.

Таблица. Влияние геометрических параметров на ЭДХ структуры.

Название параметра	Угол раствора	Ширина окон связи	Толщина окон связи	Радиус носика
Изменение значение параметра	+1 °	+0,1 мм	-0,1 мм	+0,1 мм
Влияние на соотношение полей	-0,02	-0,014	-0,016	-0,01
Влияние на поле в ячейке связи, МГц	-10	-6	-1,5	
Влияние на ускоряющее поле, МГц	-0,6	-0,5	-2,5	-1,2

На основании полученных в ходе моделирования данных, среди возможных причин возникновения просадки поля были названы: изменение конфигурации носиков в результате подбивки ячейки, изменение толщины или площади окон связи. Для случая возникновения просадки поля из-за изменения размера окон связи рассчитаны граничные значения, при которых эффект проявляется из-за отклонения одного параметра (для ширины окна – 0,94 мм, для угла раствора окна – 10 градусов).

Были выработаны возможные пути решения проблемы возникновения просадки поля: для компенсации просадки поля за счет угла раствора окон связи необходимо расточить окно связи в ячейке группирователя на 5 градусов. Если после расточки проблема просадки останется, предлагается последовательно растачивать окна связи между другими ячейками группирователя. Предложен вариант изготовления части ячеек группирователя заново.

### Список литературы

1. Polozov S. M., Rashchikov V. I., Demsky M. I. Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application //25th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2016. – 2016. – Т. 63. – №. 1999. – С. 493-495.
2. Basyl D. S. et al. New 10 MeV high-power electron linac for industrial application //IPAC 2016-Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. – 1794. – Т. 1796.
3. Polozov S. M. et al. Commissioning and first tests of the new standing wave 10 MeV electron accelerator //Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2016. – 2016. – С. 173-176.

Д.А. БАЛЮК, И.Р. КАЛИЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведено моделирование электродинамической, тепловой и механической задачи для ускоряющего сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора основного накопительного кольца – источника синхротронного излучения (СИ) проекта СИЛА [1]. Проведен расчет системы охлаждения медного резонатора, работающего в непрерывном режиме. Предложена конфигурация системы термостабилизации резонатора.

D.A. BALYUK, I.R. KALIEVA

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## THERMAL OPERATING MODE OF THE ACCELERATING CAVITIES OF A SYNCHROTRON RADIATION SOURCE

The simulation of the electrodynamic problem of an accelerating microwave cavity for the main storage ring for SILA synchrotron radiation source is considered. The calculation of the cooling system for the continuously-operated copper cavity was carried out; as a result, a heat-extraction system from the one was proposed.

При работе ускоряющего резонатора магнитная компонента электромагнитного ВЧ поля в резонаторе приводит к появлению высокочастотных токов на поверхности структуры, что является причиной потерь энергии электромагнитной волны и как следствие нагрева стенок.

Поскольку форма резонатора отличается от цилиндрической (рис.1а) [2], в области торцевых крышек, имеющих скосы и выступы в форме усеченных конусов в области пролетного канала для пучка, точный аналитический расчет электромагнитных полей практически невозможен. Проведённые методами численного моделирования расчеты дают возможность получить информацию о распределении напряженности полей в среде CST. Первоначально проводился электродинамический расчет, результаты которого были импортированы в тепловой расчет Thermal Solver [3].

В связи с тем, что нагрев модели не должен превышать 50 градусов, была построена система отвода тепла в виде цилиндрических каналов охлаждения, расположение которых иллюстрируется рис. 1а. Варьируя параметры, можно получить зависимость температуры нагрева от расхода воды. Вследствие чего выясняется, что оптимальный расход воды лежит в пределах 10...15 л/с, дальнейшее увеличение расхода не приводит к существенным изменениям. На рис. 1б приведено распределение температуры. Чтобы провести механический расчет резонатора, тепловое распределение конвертируется в Structural Mechanics Solver в CST, распределение деформаций изображено на рис. 1в. Смещение резонансной частоты равно 0,04 МГц и находится в пределах допустимых значений.

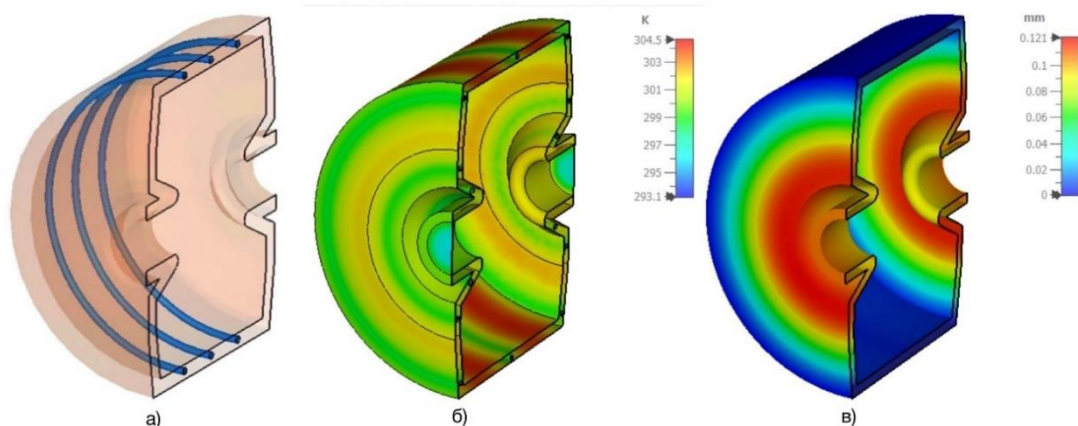


Рис. 1. а) Резонатор с каналами для циркуляции воды; б) Распределение температуры; в) Распределение деформаций;

### Список литературы

1. Conceptual Design of a Dedicated Fourth-Generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute. Ashanin I., Gusarova M., Lalayan M. et.al. Physics of Atomic Nuclei. 2018. 81. pp.1646-1651.
2. Zbruev, R.A., Gusarova, M.A., Lalayan, M.V. // Analysis of the Maximum Accelerating Field Limitations for a Bipierodic Structure of the SILA Project Injection Linear Accelerator. Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, №11. P. 1862–1865.
3. Gusarova M., Kostin R., Lalayan M., Savin E., Sobenin N., Tikhonov D // Thermal Calculation of Accelerating Structures in Electron Linacs. Technical Physics. 2013. Vol.58, №4.



## РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ УРОВНЕЙ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В РЕЗОНАТОРЕ-БАНЧЕРЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ

В четвертьволновом резонаторе линейного ускорителя легких ионов исследовано явление мультипакторного разряда, обусловленное появлением большого потока низкоэнергетичных электронов, вызванных вторичной электронной эмиссией. Проведено моделирование данного явления и получены области возникновения мультипакторного разряда.

N.F. DREBEZOVA, A.A. TUMANOVA

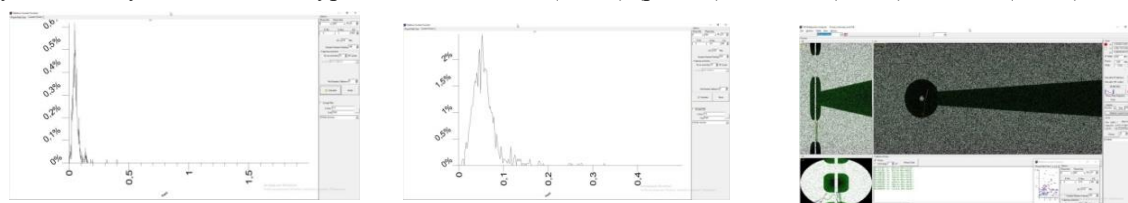
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF THRESHOLD LEVELS OF A MULTIPACTOR DISCHARGE IN A BANCHER CAVITY OF A LINEAR ACCELERATOR OF LIGHT IONS

The phenomenon of multipactor discharge caused by the appearance of a large flow of low-energy electrons caused by secondary electron emission has been studied in a quarter-wave cavity of a linear accelerator of light ions. Modeling of this phenomenon is carried out and the areas of occurrence of a multipactor discharge are obtained.

Возникновение мультипакторного разряда в ускоряющих структурах нарушает нормальный режим их работы, приводит к потере СВЧ мощности, нагреву и требует длительной тренировки резонаторов [1]. Используемая программа MultP-M [2-4] предназначена для определения потенциально опасных областей и пороговых уровней мультипакторного разряда. В работе моделирование проводилось для группирующего резонатора линейного ускорителя легких ионов [5]. Рабочее напряжение резонатора составляет 1,2 МВ, это напряжение соответствует двум единицам нормированного поля в программе MultP-M.

Проведен расчет в нормированном диапазоне от 0 до 2 (см. рис.1а), показано, что траектории частиц наблюдаются только в начальной области диапазона от 0 до 0.5 (рис.1б). Анализируя стабильные траектории, получены следующие опасные уровни поля: 5.4 кВ (0.009) (рис.1в), 14.4 кВ (0.024) и 27 кВ (0,045).



а)б)в)

Рис. 1. Результаты расчета с помощью функции счетчика частиц Electron Counter Function для диапазонов а) 0-2 и б) 0-0.5,

в) Пример резонансных траекторий в программе MultP-M при уровне напряжения 5.4 кВ.

Исследование траекторий показало, что при напряжениях на резонаторе 4.2- 11.4 кВ область электронной активности находится вблизи ускоряющего зазора, при напряжениях 11.4-27.6 кВ – в коаксиальной части резонатора, а при уровнях порядка 18.0-66.6 кВ – в области дна резонатора.

Аналитически рассчитана напряженность электрического поля в зазоре по формуле  $E = 4\pi f^2 d / e(2n - 1)$ , где  $n$ -порядок мультипакторного разряда, получено значение 36,8 кВ/м. При моделировании получен график напряженности электрического поля в области зазора (рис.2). Показано, что напряжении на резонаторе 10 кВ величина напряженности поля в области зазора совпадает с величиной полученной при расчёте в приближении плоского зазора.

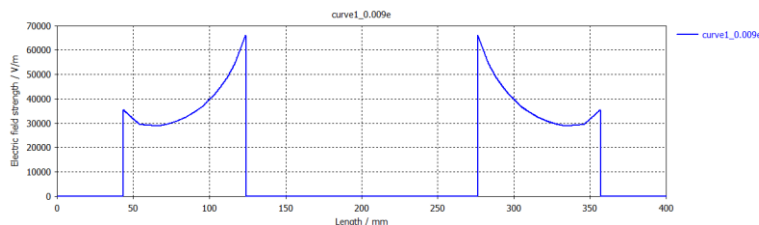


Рис. 2. График напряженности электрического поля от длины ускоряющего зазора.

### Список литературы

1. Гусарова М.А., Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П. // Мультипакторный разряд в сверхвысокочастотных узлах и элементах ускорителей заряженных частиц. Москва, 2011.
2. M. A. Gusarova et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 599, 100 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.09.047>
3. S. Khudyakov et al., in Proc. RuPAC 2014, Obninsk, Russia, p. 169.
4. M. A. Gusarova et al., Probl. At. Nauki Tekh., Ser.: Yad. Issled. 49 (3), 123 (2008).
5. Polozov, S.M. et al., CERN-Proceedings, 2021, 2021-September, pp. 51–54



Д.А. БАЛЮК, Н.Ф. ДРЕБЕЗОВА, И.Р. КАЛИЕВА, А.А. ТУМАНОВА  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ВОЛНОВОДНЫЙ ПЕРЕХОД-АДАПТЕР ДЛЯ ВЫХОДНОГО ПОРТА МАГНЕТРОНА e2v MG7095

Разработан волноводный переход – адаптер для выходного порта магнетрона e2v MG7095. В результате проведённого численного моделирования по заданным значениям электродинамических характеристик подобраны оптимизированные параметры геометрии и разработана конструкция волноводного перехода.

D.A.BALYUK, N.F.DREBEZOVA, I.R.KALIEVA, A.A.TUMANOVA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## WAVEGUIDE TRANSITION-ADAPTER FOR e2v MG7095 MAGNETRON OUTPUT PORT

A waveguide transition – adapter has been developed for the output port of the e2v MG7095 magnetron. As a result of the numerical simulation, according to the given values of the electrodynamic characteristics, the optimized geometry parameters were selected and the design of the waveguide transition was developed.

Импульсные магнетроны часто используются в системах высокочастотного питания промышленных и медицинских ускорителей заряженных частиц качестве источников высокочастотной мощности [1]. Высокие надёжность и КПД, меньшие по сравнению с клистронными усилителями габариты и стоимость позволяют реализовать востребованные на рынке конкурентноспособные установки.

Предполагавшийся к использованию в составе создаваемой совместно в НИИТФА и НИЯУ МИФИ установки радиационной терапии Торус импульсный магнетрон MG7095 производства e2v [2] имеет выходной порт в виде волновода круглого сечения диаметром  $85,7\pm 0,2$  мм. Так как волноводный тракт реализован на основе волновода прямоугольного сечения WR284 ( $72\times 34$ мм), требуется переходный элемент с круглого на прямоугольное сечение. Штатный для данного магнетрона переход [3] в РФ более не поставляется.

Для проведения численного моделирования в среде CST Studio была создана параметризованная расчётная модель. Определены все размеры и внутренняя конструкция, удовлетворяющая требуемым электродинамическим характеристикам. Для рабочей частоты 2998 МГц произведен подбор оптимальных параметров самого перехода и согласующей диафрагмы. Удалось добиться согласования расчетной модели порядка -65дБ на рабочей частоте и не хуже -50дБ в полосе частот 10 МГц (рис.1, а). Контрольная проверка конструкторской модели с упрощенной геометрией показала допустимое (до -25 дБ в рабочей полосе частот магнетрона) ухудшение ЭДХ.

Построено распределение напряженности электрического поля в адаптере (рис.1, б). Наибольшая напряженность электрического поля при мощности 4,5 МВт находится в области соединения прямоугольного волновода с круглым и равна 1,9 МВ/м, при напряженности поля в прямоугольном волноводе 2,8 МВ/м. Полученные результаты позволяют судить о малой вероятности пробоя при работе волноводного тракта в штатном режиме.

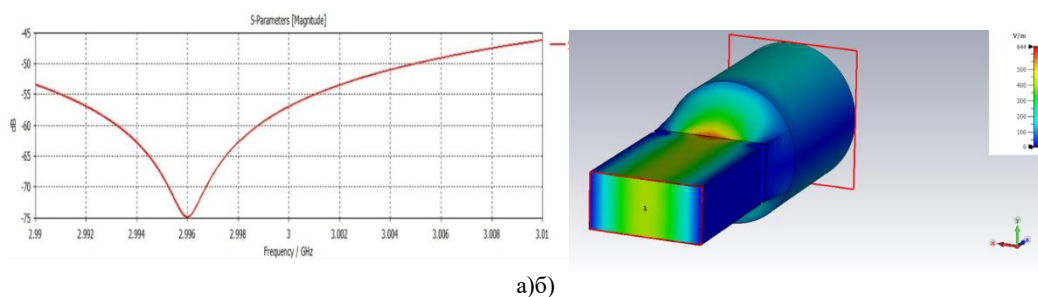


Рис. 1. а) Зависимость коэффициента отражения от частоты, б) Распределение напряженности электрического поля в модели

### Список литературы

1. Батов А.А., Збруев Р.А., Гусарова М.А., Лалаян М.В. // Оптимизация геометрии компактной ускоряющей структуры S-частотного диапазона установки радиационной терапии. Сборник трудов VIII международной конференции ЛАПЛАЗ-2022. с.313. Москва, 2022.
2. Магнетрон MG7095 – техническое описание. Режим доступа: <https://www.aepint.nl/wp-content/uploads/2014/12/MG7095-Datasheet.pdf>
3. Волноводный переход M4152S – техническое описание. Режим доступа: <https://www.aepint.nl/wp-content/uploads/2014/12/M4152S.pdf>

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ В СТРУКТУРАХ ИИ ТИПА НА ДИНАМИКУ ЧАСТИЦ

Рассмотрены распределения электромагнитных полей на оси ускоряющей структуры ИИ-типа, представлены результаты моделирования динамики заряженных частиц в заданной конфигурации полей с учетом начальной скорости частиц, проведена оценка поперечного отклонения после прохождения структур для протона и иона кислорода  $O^{+5}$  при заданных значениях напряжения на резонаторе

A.S. SULIMOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

### EVALUATION OF THE EFFECT OF THE TRANSVERSE ACCELERATING FIELD IN II-TYPE CAVITIES ON PARTICLE DYNAMICS.

The distributions of electromagnetic fields on the axis of an II-type accelerating structure are considered, the results of modeling the dynamics of charged particles in this configuration of fields with a given initial velocity are presented, and the transverse deviation after passing through the structures for a proton and an oxygen ion  $O^{+5}$  at specific values of the resonator voltage is estimated.

Для ускоряющих резонаторов ИИ-типа ускорителя легких ионов, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ [1-6] для источника синхротронного излучения, приведены результаты расчета отклонения заряженных частиц от оси после прохождения одного резонатора с учетом изменения скорости частиц в поперечном направлении. Отклонение вызывают поперечные компоненты электрического  $E_y$  и магнитного  $B_x$  полей на оси, возникающие из-за несимметричности геометрии системы креплений трубок дрейфа [5]. Геометрическая скорость резонаторов первой группы ИИ-1 составляет 0,057с, второй группы ИИ-2 0,099с. При расчете учитывалось начальное значение скорости по оси z. Начальная скорость в поперечном направлении была принята равной 0.

Все характерные участки в распределении полей были заменены на прямоугольные импульсы, фаза которых была выставлена так, чтобы частица влетала в ускоряющее продольное электрическое поле синфазно. На этих промежутках поля считались постоянными и однородными, вследствие чего удалось получить аналитическое решение уравнений движения - зависимости координат и скоростей на конкретных участках от времени. Это позволило получить величину поперечного отклонения, а также поперечную скорость на выходе из структуры для протона и иона кислорода  $O^{+5}$  для значений входной относительной скорости в структуру  $\beta_z=0.057$  (для ИИ-1) и  $\beta_z=0.099$  (для ИИ-2).

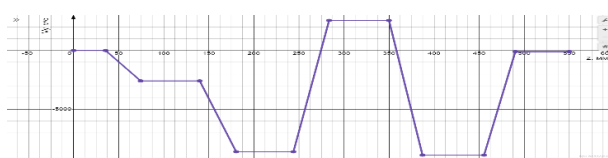


Рис. 1.. Зависимости поперечного отклонения (по оси OY) и проекции поперечной скорости ( $V_y$ ) от продольной координаты в резонаторе ИИ-1 на примере протона.

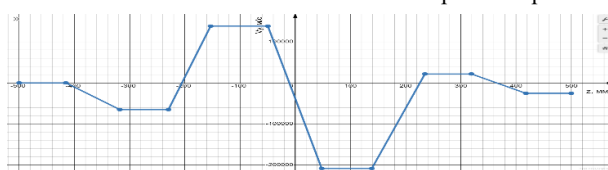
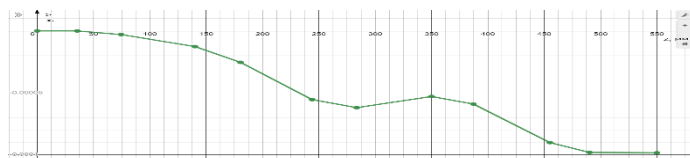


Рис. 2. Зависимости поперечного отклонения (по оси OY) и проекции поперечной скорости ( $V_y$ ) от продольной координаты в резонаторе ИИ-2 на примере протона.

Показано, что при заданных условиях с учетом вышеуказанных приближения отклонение в резонаторе ИИ-1 составит 98 мкм для протона и 105 мкм для  $O^{+5}$ . В резонаторе ИИ-2 –292 мкм для протона и 250 мкм для  $O^{+5}$ .

#### Список литературы

1. S.M. Polozov et al., "The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector", in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 51-54. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07
2. А.А. Горчаков и др., Разработка ускоряющих структур ИИ-типа // Proc. in LaPlas 2021, P.404-405.
3. Gorchakov A.A. et al., Development of II-type accelerating structures, Physics of Atomic Nuclei. 2021. Т. 84. № 12. С. 2018-2021.
4. Булгачева М.М и др., Выбор геометрии петли связи устройства ввода мощности для резонаторов ИИ-типа, Сборник научных трудов VIII Международной конференции ЛАПЛА3-2021. Москва, 2022. С. 315.
5. Горчаков А.А. и др., Компенсация дипольной составляющей ускоряющего поля в структурах ИИ-типа, Сборник научных трудов VII Международная конференция ЛАПЛА3-2021. Москва, 2021. С. 410-411.
6. Шарков Г.Б. и др., Унифицированная линейка твердотельных усилителей 40, 81 и 162 МГц для ускорителей лёгких и тяжёлых ионов, Сборник научных трудов VII Международная конференция ЛАПЛА3-2021. Москва, 2021. С. 368-369.

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОГО РЕЗОНАТОРА-ДЕБАНЧЕРА

Решена самосогласованная задача для четвертьволнового резонатора-дебанчера ускорителя протонов и легких ионов. Методом численного моделирования последовательно решаемые электродинамическая, теплофизическая, механическая и повторно электродинамическая задачи позволили выявить отклонения резонансной частоты за счет деформаций. Определены параметры охлаждающих каналов для предотвращения отклонений от резонансной частоты.

D.A. BALYUK, I.R. KALIEVA

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## THERMAL BEHAVIOUR OF COAXIAL QUARTER-WAVE DEBUNCHER CAVITY

A self-consistent problem has been solved for a quarter-wave debuncher cavity of a proton and light ion accelerator. The method of numerical simulation consistently solved electrodynamic, thermophysical, mechanical and repeatedly electrodynamic problems allowed us to identify deviations of the resonant frequency due to deformations. The parameters of the cooling channels are determined to prevent deviations from the resonant frequency.

Одной из существенных проблем, которая может возникнуть при работе высокочастотного резонатора ускорителя заряженных частиц, это изменение его электродинамических характеристик, вызываемое нагревом и последующей деформацией. Происходит смещение резонансной частоты и распределения полей из-за геометрических искажений. Для решения задачи была построена параметрическая модель четвертьволнового резонатора в CST Studio, после чего предложен способ корректировки резонансной частоты.

В ходе моделирования было построено распределение электрического поля для четвертьволнового резонатора-дебанчера с рабочей частотой около 81 МГц [1]. Материал оболочки – нержавеющая сталь с медным покрытием, пролетный канал и центральный проводник коаксиала – медь. Из моделирования динамики пучка следует, что на частицу действует суммарное напряжение 1,2 МВ. Резонатор работает в импульсном режиме, и по заданным временным параметрам были определены коэффициенты пересчета мощности тепловыделения в стенках резонатора, необходимые для передачи результатов из eigenmode-solver (стационарный режим) в модуль решения тепловой задачи [2].

При моделировании тепловой задачи также был учтен теплообмен с окружающей средой путем конвекции и в результате найдено распределение температур в резонаторе. Максимальный нагрев приходится на пролетный канал и составляет без дополнительного охлаждения  $T=545\text{K}$  (рис. 1а). При этом максимальная деформация составляет 2,49 мм (рис. 1б). С учетом полученных результатов отклонение от резонансной частоты составило  $\Delta f = -0,34\text{МГц}$ .

Для уменьшения влияния деформаций на резонансную частоту через конусную часть резонатора проведен охлаждающий канал с водой, для которого предварительно проведено исследование влияния расхода воды на охлаждение в диапазоне 5...20 л/мин. При оптимальном расходе воды  $Q=10$  л/мин и соответственно коэффициенте теплоотдачи  $\alpha=2821,82$  Вт/(м<sup>2</sup>·град), охлаждение пролетного канала происходит в достаточной мере. Максимальный нагрев в таком режиме составил  $T=299,8\text{K}$  (рис. 1в), максимальная деформация 0,0587мм (рис. 1г), смещение резонансной частоты  $\Delta f = -0,0066\text{МГц}$ . Такое смещение может быть легко скорректировано.

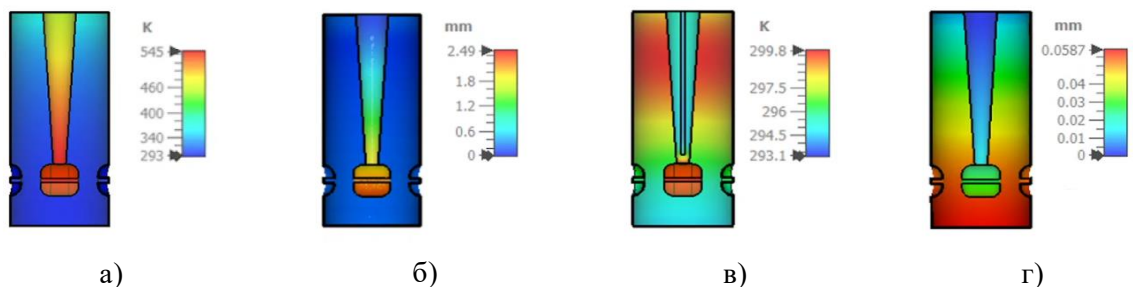


Рис.1. а) Распределение температур; б) Распределение деформаций; в) Распределение температур с каналом охлаждения; г) Распределение деформаций с каналом охлаждения.

### Список литературы

1. Горчаков А.А., Гусарова М.А., Лалаян М.В., Топорков С.Е. // Разработка ускоряющих структур Н-типа. Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021. Сборник научных трудов VII Международная конференция. Москва, 2021. С. 404–405.
2. Gusarova M., Kostin R., Lalayan M., Savin E., Sobenin N., Tikhonov D // Thermal Calculation of Accelerating Structures in Electron Linacs. Technical Physics. 2013. Vol.58, №4.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ (LEBT)

Рассмотрены различные методики расчета вакуумных условий внутри камер с разветвленной структурой линейного ускорителя ионов. Выполнен расчет динамики давления при импульсной газовой нагрузке аналитически и численными методами. Дана оценка способности откачного оборудования обеспечить требуемый вакуум.

M.S. DMITRIEV, A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN  
 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SIMULATION OF THE PULSED GAS LOAD OF THE LOW ENERGY BEAM TRANSPORT CHANNEL (LEBT)

Various methods for calculating vacuum conditions inside chambers of complex structure for a linear ion accelerator are considered. The pressure dynamics under pulsed gas load is calculated by means of analytical and numerical methods. An assessment of the pumping equipment's ability to provide the required vacuum is given.

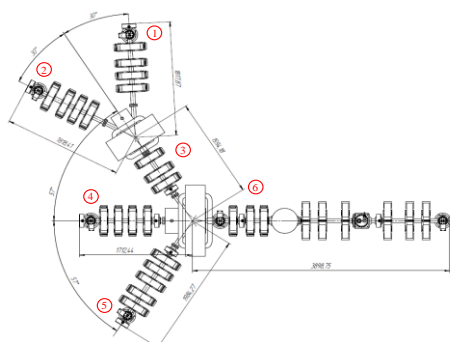


Рис. 1. LEBT

Канал транспортировки низкой энергии (LEBT) [1] предназначен для передачи ионного пучка от различных ионных источников (ИИ) до резонатора с ПОКФ и представляет собой разветвленную структуру каналов с внутренним диаметром 62 мм, соединяющую ИИ, блоки диагностики пучка, камеры поворотных магнитов, резонатор-группирователь.

В данной работе моделировалась вакуумная откачка при импульсной нагрузке от одного из лазерных источников. Откачка производилась в следующей конфигурации: тепловая десорбция со стен камеры отсутствует, импульсная нагрузка водородом от ИИ №3 в виде прямоугольного импульса  $t_{\text{имп}} = 10$  мкс, амплитудой  $Q = 2.6 \cdot 10^{-2}$  мбар·л/с и частотой следования 5 Гц (рис. 2), быстрота действия насосов  $S = 700$  л/с, объем камеры ИИ  $V =$

0,2 л.

Давление в такой системе будет изменяться по экспоненциальному закону:

$$\begin{cases} P_{\text{инж}}(t) = \frac{Q}{S} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right), & t \leq t_{\text{имп}} \\ P_{\text{отк}}(t) = P_{\text{инж}}(t_{\text{имп}}) \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{\text{имп}}}{\tau}\right), & t > t_{\text{имп}} \end{cases}$$

Согласно расчетам, можно ожидать давление в ИИ в конце импульса на уровне  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па, а через 1 мс после импульса оно снизится до  $7,1 \cdot 10^{-6}$  Па, что удовлетворяет требованию ТЗ.

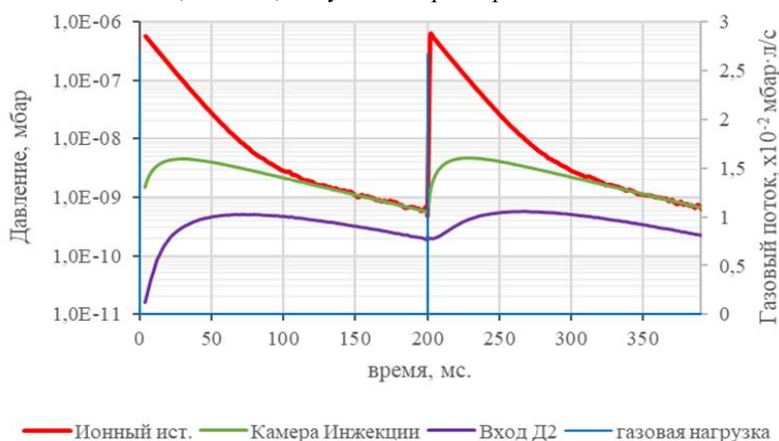


Рис. 2. Параметры импульса газа и график давления в некоторых точках участка

Для проверки теоретических расчетов и учета влияния сложной геометрии вакуумных камер в программе Molflow+ [2] была создана модель LEBT и запущен расчет откачки в динамическом режиме с параметрами, указанными выше. Результаты на рисунке 2. При заданных начальных условиях импульсного потока выбранная схема откачки справляется с газовой нагрузкой от ИИ, производительности насосов достаточно для нейтрализации скачка давления, влияние работы ИИ не распространяется дальше камеры дипольного магнита (Д2).

### Список литературы

1. Polozov, S.M., Panishev, A.S., Shatokhin, V.L. (2021). Optimization of accelerators vacuum structures pumping. 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS10.
2. Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow.

Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭЦР-ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ С РЕЗОНАНСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ**

В рамках проекта BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator), предназначенного для решения различных задач, создается инжекционный комплекс на базе нескольких ионных источников. Одной из задач является много пучковое облучение конструкционных материалов ядерных и термоядерных энергетических установок для анализа их радиационной стойкости. Тяжелые (Fe) и легкие (H<sub>2</sub>/He) ионные пучки будут облучать мишень в одной и той же камере одновременно. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается компактный ионный источник на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР источник). Статья представляет исследования зависимостей работы ЭЦР- источника легких ионов с резонансной разрядной камерой от давления рабочего газа, величины и распределения магнитного поля, а также масс-зарядовый спектр пучка ионов гелия.

D. N. SELEZNEV, A.B. ZARUBIN, N.N. VINOGRADSKI,  
K.E. PRYANISHNIKOV, T.V. KULEVOY  
*National Research Center "Kurchatov Institute"*

## **LABORATORY ECR-LIGHT ION SOURCE WITH A RESONANT DISCHARGE CHAMBER FOR INSTALLATION ON A HIGH-VOLTAGE PLATFORM**

In the framework of the BELA project (Based on ECR ion source Linear Accelerator), an injection complex based on several ion sources is designed for various experimental tasks. One of the tasks is irradiation of structure materials for fusion and fusion reactors by several ion beams for the analysis of the material radiation resistance. Heavy (Fe) and light (H<sub>2</sub> / He) ion beams will irradiate the target in the same chamber simultaneously. The article presents studies of the dependences of the operation ECR source of light ions with a resonant discharge chamber on the pressure working gas, the magnitude and distribution of the magnetic field, as well as the mass-charge spectrum of a helium ion beam.

Для проведения исследований новых конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов, востребованы методы экспресс-анализа радиационной стойкости этих материалов. Такими методами являются имитационные эксперименты по облучению материалов ускоренными пучками тяжелых ионов. Для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок при их эксплуатации, применяют технологию одновременного облучения материала тремя ионными пучками. Ионы Fe используются в качестве основного радиационного дефектообразующего пучка, а ионы водорода и гелия имплантируются в область дефектообразования от основного пучка. Т.к. в реальных условиях нейтронного облучения в результате реакций ядерной трансмутации в материалах образуются газообразные примеси: гелий и водород, которые накапливаются одновременно с накоплением радиационных дефектов. Поэтому возникла необходимость создания установки для проведения имитационных экспериментов с одновременной имплантацией ионов газов [1]. В НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ ведется разработка такой многофункциональной установки BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator). Статья представляет описание исследований зависимостей работы ЭЦР- источника легких ионов с резонансной разрядной камерой от давления рабочего газа, величины и распределения магнитного поля, а также масс-зарядовый спектр пучка ионов гелия.

Структурная схема лабораторного ЭЦР источника легких ионов с резонансной разрядной камерой и основные его параметры представлены в работе [2]. Плазма в разрядной камере генерировалась импульсной СВЧ мощностью с частотой посылок до 2 Гц и длительностью импульса 1 мс. Источник устойчиво работал при давлении в разрядной камере  $p=(1,4-9)\times 10^{-3}$  Торр, при этом расход газа гелия составил (0,3-3) см<sup>3</sup>/мин. Измеренный цилиндром Фарадея максимальный полный ток пучка составил ( $I=7$  мА). Измерения масс зарядового состава пучка показали наличие ионов гелия до 80%. Исследования влияния на работу источника величины и продольного распределения магнитного поля с минимумом В(в виде магнитной ловушки) показали, что для устойчивой работы источника при формировании конфигурации магнитного поля достаточно устанавливать величину магнитного поля с точностью до 25-30% от номинальной, величину «зеркального отношения» иметь в диапазоне 1,3-1. В районе ВЧ окна номинальная величина магнитного поля приближалась к  $V_{ном}=875$  Гс .

### *Список литературы*

1. Fedin P. A. et al. REQUIREMENTS FOR THE DUAL Fe+ H/He BEAM AT THE ACCELERATOR HIPR FOR SIMULATION OF NEUTRON INFLUENCE ON NUCLEAR REACTOR MATERIALS //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publiing, 2020. – Т. 1686. – №. 1. – С. 012073
2. Селезнев Д.Н., Зарубин А.Б., Виноградский Н.Н. и др. // СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ. 2022. 1. С.318.



Б.В. ГОЛОВЕНСКИЙ, К.А. ЛЕВТЕРОВ, А.А. МАРТЫНОВ, В.А. МОНЧИНСКИЙ, В.В. МЯЛКОВСКИЙ

*Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ND-YAG ЛАЗЕРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИОНОВ C<sup>4+</sup> И FE<sup>14+</sup> В УСКОРИТЕЛЬНЫХ СЕАНСАХ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА NICA**

Инжектор ускорительного комплекса NICA на основе линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) предназначен для инжекции ионов Au<sup>31+</sup> в сверхпроводящий накопительный синхротрон Бустер. Первые сеансы по ускорению и инжекции в Бустер проводились с использованием пучков ионов He<sup>+</sup> от плазменного источника и C<sup>4+</sup> и Fe<sup>14+</sup> от лазерного источника на основе Nd-YAG лазера. Приводятся результаты и особенности производства ионов C<sup>4+</sup> и Fe<sup>14+</sup> лазерным источником для их инжекции в Бустер.

B.V. GOLOVENSKIY, K.A. LEVTEROV, A.A. MARTYNOV,  
V.A. MONCHINSKY, V.V. MIALKOVSKY

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

## **USE OF A LASER SOURCE BASED ON THE ND-YAG LASER FOR THE C<sup>4+</sup> AND FE<sup>14+</sup> IONS PRODUCTION IN THE ACCELERATING RUNS OF THE NICA INJECTION FACILITY**

The injector of the NICA accelerator facility based on the heavy ion linear accelerator (HILAC) is intended for injection of Au<sup>31+</sup> ions into the Booster superconducting storage synchrotron. The first runs of acceleration and injection into the Booster were carried out using beams of He<sup>+</sup> ions from a plasma source and C<sup>4+</sup> and Fe<sup>14+</sup> from a laser source based on a Nd-YAG laser. The results and features of the C<sup>4+</sup> and Fe<sup>14+</sup> ions production by a laser source for their injection into the Booster are presented.

Линейный ускоритель тяжелых ионов (ЛУТИ) нового инжектора ускорительного комплекса NICA предназначен для ускорения ионов с  $A/Z \leq 6.35$  до энергии 3.2 МэВ/н с максимальным значением импульсного тока 10 мА длительностью 8-30 мкс. [1]. Максимальная частота инжекций в накопительный синхротрон Бустер составляет 10 Гц. Новый лазерный источник ионов на основе ND-YAG лазера был создан с целью испытаний ускорителя ЛУТИ по ускорению ионов с проектными параметрами. Кроме того, применение нового лазерного источника совместно с ЛУТИ позволяет рассчитывать на получение пучков ионов с  $A \sim 90$  для использования на ускорительном комплексе.

Исследования на стенде зарядового состава углеродной и железной лазерной плазмы, произведенной Nd-YAG лазером, показало наличие ядер углерода и ионов Fe<sup>17+</sup> [2]. При вводе в эксплуатацию ЛУТИ использовался лазер LPY7864G (2.8 Дж, 10 нс, M<sub>2</sub>=2) с неустойчивым задающим генератором с градуированным коэффициентом отражения выходного зеркала. Были ускорены ионы углерода C<sup>2+</sup>, C<sup>3+</sup>, C<sup>4+</sup>, C<sup>5+</sup>, C<sup>6+</sup>. Ускорение ионов C<sup>2+</sup>, имеющих отношение  $A/Z=6$ , практически показало возможность ускорения в ЛУТИ ионов с проектным значением  $A/Z=6.35$  [2]. Длительность импульса ионного тока на полувысоте составила 8 мкс для C<sup>2+</sup> и 4 мкс для C<sup>4+</sup>.

В первых ускорительных сеансах по инжекции из ЛУТИ в Бустер использовались пучки ионов He<sup>+</sup>, произведенных плазменным источником однозарядного гелия, и пучки ионов Fe<sup>14+</sup> и C<sup>4+</sup>, произведенных лазерным источником с использованием лазера LPY7864 (1 Дж, 10 нс, M<sub>2</sub>=1.3) со стабильным диафрагмированным генератором. Для обеспечения на выходе ускорителя пучков ионов с достаточно стабильной интенсивностью рабочую точку мишени приходилось менять с частотой следования импульсов инжекции. Использование цилиндрической мишени с большой площадью рабочей поверхности обеспечивало возможность длительной работы без остановок для ее замены. Переход на новую рабочую точку осуществляется поворотом мишени шаговым двигателем на малый угол. Длительность импульса ионного тока на полувысоте составила ~1 мкс для Fe<sup>14+</sup> и ~2 мкс для C<sup>4+</sup> [3,4]. Инжектированные ионы Fe<sup>14+</sup> были ускорены в Бустере до энергии 578 МэВ/н, ионы C<sup>4+</sup> - до энергии 263 МэВ/н.

### *Список литературы*

1. A.V. Butenko, K.A. Levterov et al. Injection complex development for the NICA project. Proc. of LINAC'18, pp. 663-665, 2018. doi:10.18429/JACoW-LINAC2018-TH1P02
2. A.M. Bazanov, K.A. Levterov et al. Laser Ion Source in Injection Facility of NICA project. Physica Scripta, V.95, No. 5, 2020 <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab7aab>
3. V.P. Akimov, K.A. Levterov et al. Acceleration the Beams of He<sup>+</sup> and Fe<sup>14+</sup> Ions by HILAC and its Injection into Booster in its Second Run. Proc. of RUPAC2021, pp. 65-67, 2021. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEA02
4. A.V. Butenko, K.A. Levterov et al. First Experiments with Accelerated Beams in the Booster of the NICA Accelerator Complex. Proc. of IPAC2021, pp. 123-125, 2021. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB025

А.Ю. БОЙЦОВ, Е.А. БУТЕНКО, Е.Е. ДОНЕЦ, Д.Е. ДОНЕЦ, Н.А. МАЛЫШЕВ, Д.О.  
ПОНКИН, А.Ю. РАМЗДОРФ, Д.Н. РАССАДОВ, В.Б. ШУТОВ  
*Лаборатория Физики Высоких Энергий, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Московская область,  
Россия*

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-СТРУННОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ КРИОН 6Т

Источник ионов КРИОН-6Т [1] разработанный в ЛФВЭ ОИЯИ является ключевым элементом инжектора тяжелых ионов ускорительного комплекса NICA [2]. В статье описываются электронные модули и системы на их основе, обеспечивающие функционирование источника высокозарядных тяжелых ионов КРИОН-6Т.

A.YU. BOYTSOV, E.A. BUTENKO, E.E. DONETS, D.E. DONETS, N.A. MALYSHEV, D.O.  
PONKIN, A.YU. RAMZDORF, D.N. RASSADOV, V.B. SHUTOV  
*Laboratory of High Energy Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia*

## THE ELECTRON STRING ION SOURCE KRION 6T ELECTRONICS DEVELOPMENT

The ion source KRION-6T [1], developed at VBLHEP, JINR, is an important element of the heavy ion injector of the NICA accelerator complex [2]. The article describes the electronic modules and systems that ensure the functioning of the source of highly charged heavy ions KRION-6T.

Электронно-струнный источник ионов (англ. - ESIS) является относительно новым типом ионных источников, который находится в стадии разработки с 1994 года в ЛФВЭ ОИЯИ, когда впервые наблюдалось явление «электронной струны» [1]. Источник КРИОН-6Т представляет собой сложную модификацию электронно-лучевого источника ионов (англ. - EBIS), работающего в отражательном режиме работы при определенных условиях. В основе действия источника ионов КРИОН-6Т лежит ионизация атомов с помощью нового стационарного состояния горячей магнитосжатой плазмы, называемого «электронной струной».

В апреле 2022 г. КРИОН-6Т был установлен на высоковольтную платформу нового инжектора тяжелых ионов, входящего в состав ускорительного комплекса NICA/MPD, создаваемой в настоящее время в ЛФВЭ ОИЯИ (Рис. 1). В рамках четвертого цикла пусконаладки на комплексе NICA были получены ионные пучки  $\text{Xe}^{28+}$ , ускоренные и использованные в дальнейшем для физических экспериментов.

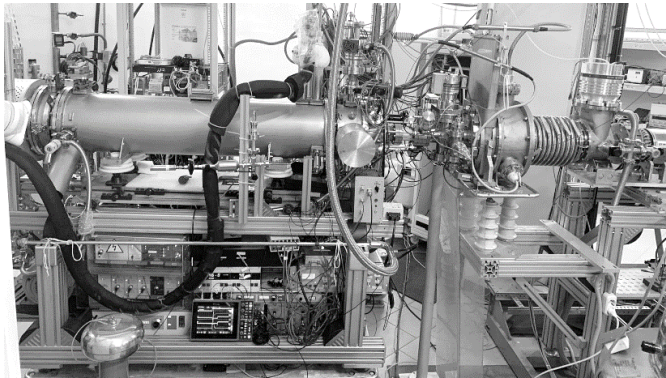


Рис. 1. КРИОН-6Т на высоковольтной платформе инжектора ЛУТИ комплекса NICA; Октябрь 2022

Источник ионов КРИОН-6Т представляет собой сложную криогенную установку, состоящую из нескольких систем и частей: сверхпроводящего соленоида, криогенной и вакуумной систем, электронной пушки внутри катодного узла, электронного отражателя, электронной и ионно-оптической систем, системы термометрии на криогенных термодатчиках, аварийной системы и т.д.

Для каждой из систем были разработаны специальные электронные модули. Для контроля процессов охлаждения, поддержания сверхпроводимости соленоида и его прогрева при работе КРИОН 6Т был разработан блок термометрии ПКТ-8. При подготовке эксперимента по внешней инжекции была разработана система диагностики пучка, основанная на проволочном профилометре. Также при подготовке физических экспериментов с источником ионов необходимо применять специальное распределение потенциала для ионизации частиц и вывода пучка. Для этих целей разработана система управления движением ионов.

### Список литературы

1. D.E. Donets et al., Production of highly charged ion beams  $\text{Kr}^{32+}$ ,  $\text{Xe}^{44+}$ ,  $\text{Au}^{54+}$  with Electron String Ion Source (ESIS) Krion-2M and corresponding basic and applied studies // Journal of Instrumentation, September 2010, DOI: 10.1088/1748-0221/5/09/C09001
2. E. Syresin et al., NICA ion collider at JINR // Proceedings of RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021
3. E.D. Donets et al., ESIS ions injection, holding and extraction control system // EPJ Web of Conferences 177, 08002 (2018)



## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Высокоэнергетичный канал транспортировки (НЕВТ - High Energy Beam Transport channel) предназначен для транспортировки пучка ионов с  $A/Z = 4\div 8$  и энергией 4 МэВ/нуклон, ускоренных в линейном резонансном ускорителе, к мишени по обдирки ионов. В результате моделирования динамики частиц определены основные элементы канала и их параметры, обеспечивающие поперечную фокусировку пучка и минимизацию импульсного разброса частиц на мишени.

E.R. KHABIBULLINA, V.I. NIKOLAEV, G.N. KROPACHEV, T.V. KULEVOY  
NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF THE HIGH-ENERGY TRANSPORT CHANNEL (HEBT) FOR THE HEAVY ION ACCELERATOR

The High Energy Beam Transport channel (HEBT) is designed to transport 4 MeV/u ion beams with  $A/Z = 4\div 8$  from linear resonant accelerator to stripping target. As a result of beam dynamic simulation the main elements of the channel and their parameters were determined. This ensures transverse beam focusing and minimization of the particles momentum spread on the target.

В НИЦ "Курчатовский институт" – ККТЭФ (Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики) разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа с энергией 4 МэВ/нуклон, рабочей частотой 162.5 МГц и током до 10 мА.

В настоящей работе рассмотрен вариант канала транспортировки пучка ионов высокой энергии (НЕВТ) с  $A/Z = 4\div 8$  для последующей инжекции пучка в бустер.

Поперечная фокусировка пучка обеспечивалась с помощью цепочки одинаковых электромагнитных квадрупольных линз, разделенных на участки:

- «Периодический» участок: на входе в каждый период участка расчётные параметры Твисса повторяются;
- Согласующий участок: согласование пучка на выходе ЛУ со входом в «периодический» участок;
- Участок формирования: фокусировка пучка на обдирочную мишень.

Для минимизации импульсного разброса частиц в пучке используется двухззорный дебанчер, работающий на частоте 162.5 МГц. Он позволяет снизить разброс частиц в пучке по импульсу с  $\pm 0.8\%$  до  $\pm 0.3\%$ .

Динамические расчеты в канале НЕВТ проводились с использованием трехмерной карты магнитного поля квадрупольной линзы и электрического поля дебанчера, модели которых разрабатывались в ККТЭФ. Дополнительно канал транспортировки пучка высокой энергии позволяет расположить корректирующие устройства, диагностическое оборудование и оборудование для вакуумной откачки ионопровода НЕВТ.

В канале транспортировки тяжелых ионов предусмотрено место для установки дипольного магнита, предназначенного для перевода частиц, ускоренных в другом ускорителе-инжекторе.

С помощью двух независимых пар корректоров осуществляется дополнительная корректировка траектории движения пучка. Это позволяет произвести полное согласование между осью пучка транспортируемых частиц и оптической осью канала.

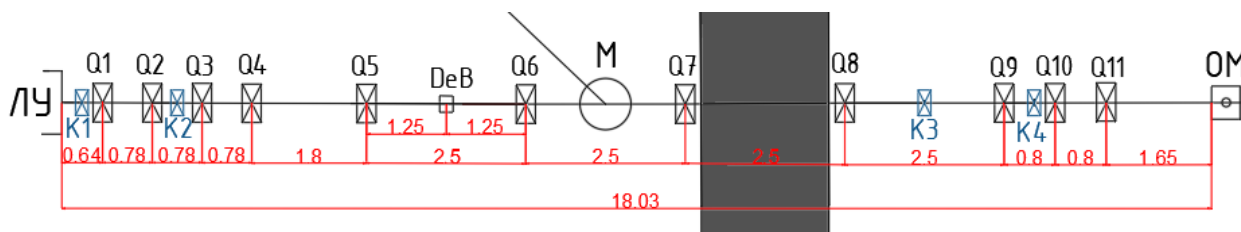


Рис. 1. Структурная схема НЕВТ, Q1-Q11 – квадрупольные электромагнитные линзы; K1-K4 – магнитные корректоры; М – поворотный магнит; DeB – дебанчер; ОМ – станция обдирки

Е.С. МАТЮХАНОВ<sup>1</sup>, Г.Г. ХОДЖИБАГИЯН<sup>1</sup>, М.С. НОВИКОВ<sup>1</sup>, А.В. ШЕМЧУК<sup>1</sup>, Е.Н. ИСКОРНЕВ<sup>1</sup>, А.В. МЕРКУРЬЕВ<sup>1</sup>, В.М. ДРОБИН<sup>1</sup>, Г.Л. ДОРОФЕЕВ<sup>1</sup>, Д.О. ПОНКИН<sup>1</sup>, В.А. КАШИРИН<sup>1</sup>, А.В. РЯБОВ<sup>1</sup>, Я.Ю. ВЕКЛИЧЕВ<sup>1</sup>, И.А. РУДНЕВ<sup>2</sup>, С.В. ПОКРОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА ВТСП КАБЕЛЕЙ НУКЛОТРОННОГО ТИПА В ОИЯИ

Разрабатывается технология изготовления кабелей нуклотронного типа из ВТСП 2-го поколения. Создана экспериментальная кабельная установка, методика для измерения критического тока ВТСП ленты при перемотке, спроектирована и строится кабельная машина для серийных изделий. Разработаны ВТСП кабели – прототип для модернизации магнитной системы Нуклотрона NICA, кабель для индуктивного накопителя энергии, и прототип гибкого высокопоточного кабеля большого диаметра для крупных магнитных систем и токоподводов.

E.S. MATYUKHANOV<sup>1</sup>, H.G. KHODZHIBAGIYAN<sup>1</sup>, M.S. NOVIKOV<sup>1</sup>, A.V. SHEMCHUK<sup>1</sup>, E.N. ISKORNEV<sup>1</sup>, A.V. MERKURYEV<sup>1</sup>, V.N. DROBIN<sup>1</sup>, G.L. DOROFEEV<sup>1</sup>, D.O. PONKIN<sup>1</sup>, V.A. KASHIRIN<sup>1</sup>, A.V. RYABOV<sup>1</sup>, YA.YU. VEKLCHEV<sup>1</sup>, I.A. RUDNEV<sup>2</sup>, S.V. POKROVSKIY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2</sup> National research nuclear university “МЭФИ”, Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF THE NUCLOTRON TYPE HTS CABLES AT JINR

The technology of 2G HTS cables of the Nuclotron type manufacturing is being developed. An experimental cabling device and a technique for reel-to-reel measuring of critical currents of the HTS tape have been created; a cabling machine for serial products has been designed and is being built. HTS cables have been developed – a prototype for upgrading the magnetic system of Nuclotron NICA, a cable for magnetic energy storage, and a prototype of a large-diameter high-current flexible cable for large-scale magnets and flexible bus-bars.

Обмотки новых магнитов синхротрона Нуклотрон могут быть изготовлены из ВТСП кабеля, с охлаждением до 50-65 К. В 24 году должен быть введен в эксплуатацию SMES (индуктивный накопитель энергии) в системе питания Бустера и Нуклотрона, его соленоид будет изготовлен из 1460 м ВТСП кабеля. Создана экспериментальная кабельная установка, управляемая частотными регуляторами, которая обкручивает протягиваемую трубку (формер и канал охлаждения) до 10 ВТСП лентами в 1 или 2 слоя [1]. На рисунке 1 изображен ВТСП кабель: 1 – мельхиоровая трубка, 2 – ВТСП ленты, 3 и 4 (опции) изоляция каптоном и препрегом. Кабель подобен НТ кабелю нуклотронного типа, разрабатываемому и изготавливаемому в ЛФВЭ ОИЯИ около 35 лет, и ВТСП кабелю CORCC [2]. Отлажена система натяжения ВТСП лент и трубки-формера, поддерживающая независимое от скорости натяжение с помощью электроники, также разработанной в ОИЯИ. Тестируется система измерения скорости вращения бобин и обкруточного узла кабельной машины, а также измерения длины намотанного участка кабеля. Разработана методика 3D FEM расчета деформации ВТСП слоя при изготовлении и последующих изгибах кабеля. На ее основе выбираются натяжения, углы и шаги, позволяющие сгибать кабели без деградации, в то же время обеспечивающие нужную плотность массива ВТСП лент для охлаждения и механической устойчивости. Ведется сборка кабельной машины для серийных ВТСП кабелей, изготавливающей кабель за 1 проход, изолирующей, и наматывающей на каркас соленоида SMES (рис. 2).

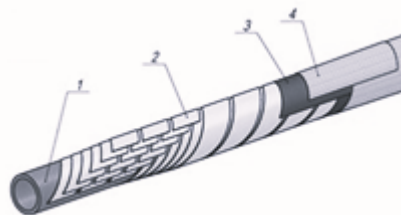


Рис. 1. Конструкция ВТСП кабеля

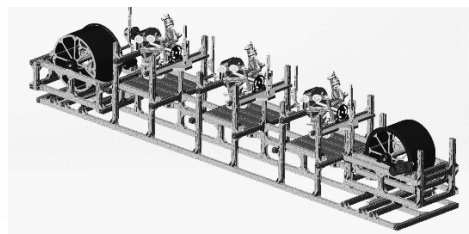


Рис. 2. 3D модель «серийной» кабельной машины

Для контроля ВТСП лент разработана установка для измерения критического тока при перемотке в жидком азоте. Разработаны конструкции кабеля из 18 лент на трубке 5 мм в изоляции, с возможностью изгиба на радиус 40 мм, и кабелей SMES (до 40 лент на трубке 8 мм, изоляция - каптон). Намотан кусок кабеля на трубке 12.7 мм с 7 лентами в каждом слое, сгибаемый на радиус менее 200 мм, он исследуется.

*Список литературы*

1. H Khodzhbagiyani, V Drobin, G Dorofeev, V Karpinskiy, A Shurygin, M Novikov, D Kashaev, M Zaslavskiy, G Kachlishvili, Journal of Physics: Conference Series 1590 (2020) 012057 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1590/1/012057
2. Van der Laan D C et al, 2019 *Supercond. Sci. Technol.* **32** 015002

А.В. ЗИЯТДИНОВА<sup>1,2,3</sup>, П.А. ФЕДИН<sup>1,2</sup>, Т.В. КУЛЕВОЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет "МАИ", Москва, Россия

## МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ТРАНСПОРТНОГО КАНАЛА «ВТОРОГО ПУЧКА» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В Лаборатории перспективных разработок Комплекса Теоретической и Экспериментальной Физики ведется работа по созданию второй линии транспортировки пучка ионов для проведения имитационных экспериментов для исследования радиационной стойкости реакторных материалов с применением одновременного облучения одной мишени двумя пучками ионов. Канал разрабатывается на базе моделирования динамики пучка с учетом технических, функциональных и экономических ограничений. Для моделирования динамики пучка были разработаны модели электромагнитных оптических устройств, обеспечивающих фокусировку (линзы), сепарацию (магнит) и ускорение (ускорительная трубка) пучка в проектируемом тракте. В данной работе описаны разработанные модели.

A.V. ZIATDINOVA<sup>1,2,3</sup>, P.A. FEDIN<sup>1,2</sup>, T.V. KULEVOY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

<sup>3</sup> National Research University "MAI", Moscow, Russia

## MODELS OF ELECTROMAGNETIC OPTICS OF THE "SECOND BEAMLINE" FOR IMITATION EXPERIMENTS

"Second beamline" is under development at the Laboratory of Advanced Developments of the Complex of Theoretical and Experimental Physics. This beamline is built for imitation experiments dedicated to study the radiation resistance of reactor materials using double beam irradiation. Beamline is based on beam dynamic simulation considering technical, functional and economic constraints. Models of electromagnetic optics are designed for beam dynamic simulation. The electromagnetic optics provide focusing, separation and acceleration of the beam. These models are described in this paper.

На рис.1 представлены модели электромагнитных оптических устройств, разработанные для моделирования динамики пучка с использованием «реальных» распределений полей в этих элементах: а) квадрупольная магнитная линза с радиусом апертуры 45 мм длиной 400 мм, б) квадрупольная магнитная линза с радиусом апертуры 38 мм длиной 200 мм, в) соленоид с радиусом апертуры 55 мм длиной 450 мм, г) ускорительная трубка с радиусом апертуры 50 мм, состоящая из четырех секций по 245 мм

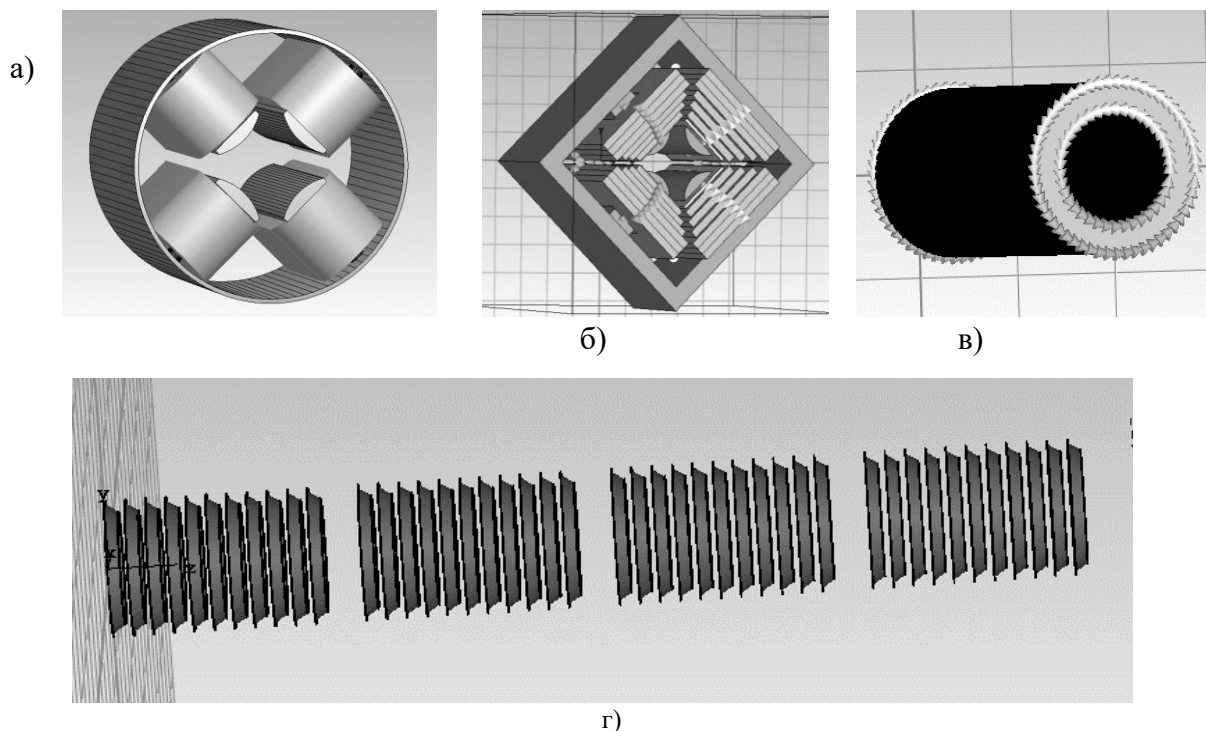


Рис. 1. Разработанные модели: а) квадрупольная магнитная линза длиной 400 мм, б) квадрупольная магнитная линза длиной 200 мм, в) соленоид длиной 450 мм, г) ускорительная трубка, состоящая из четырех секций по 245 мм

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КАТОДНОГО ЭЛЕКТРОДА

Аннотация: В ходе данной работы было изучено проникновение магнитного поля внутрь катодного электрода в зависимости от радиуса отверстий для откачки и их количества.

N.YU. SAMAROKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY OF THE CATHODE ELECTRODE

Annotation: In the course of this work, the penetration of the magnetic field into the cathode electrode was studied depending on the radius of the holes for pumping air and their number.

Для модифицированного термоэмиссионного источника электронов для линейных ускорителей [1, 2] была изучена зависимость проникновения магнитного поля внутрь катодного электрода от радиуса и количества отверстий для откачки.

Для модели компактной электронной пушки было создано 6 различных катодных электродов: с 4 отверстиями для откачки радиусом 3,5 мм, с 4 отверстиями радиуса 2,5 мм, с 6 отверстиями радиуса 2,5 мм, с 4 отверстиями радиуса 1,5 мм, с 6 отверстиями радиуса 1,5 мм и с 8 отверстиями радиуса 1,5 мм, общие виды трех различных катодных электродов с отверстиями для откачки представлены на рисунке 1 (а), (б) и (в) соответственно.

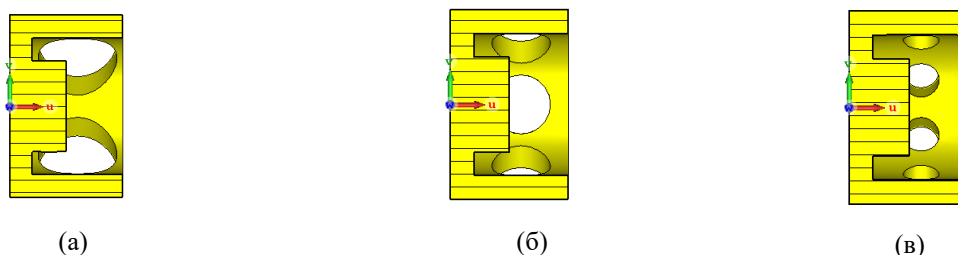


Рис. 1. Общий вид катодного электрода (а) с четырьмя отверстиями для откачки радиусом 3,5 мм, (б) с шестью отверстиями радиуса 2,5 мм, (в) с восемью отверстиями радиуса 1,5 мм.

На рисунках 2 представлены результаты моделирования пролета частиц в магнитном поле, смоделированном ранее (а) с катодным электродом с 4 отверстиями радиуса 3,5 мм и (б) с 6 отверстиями радиуса 2,5 мм.

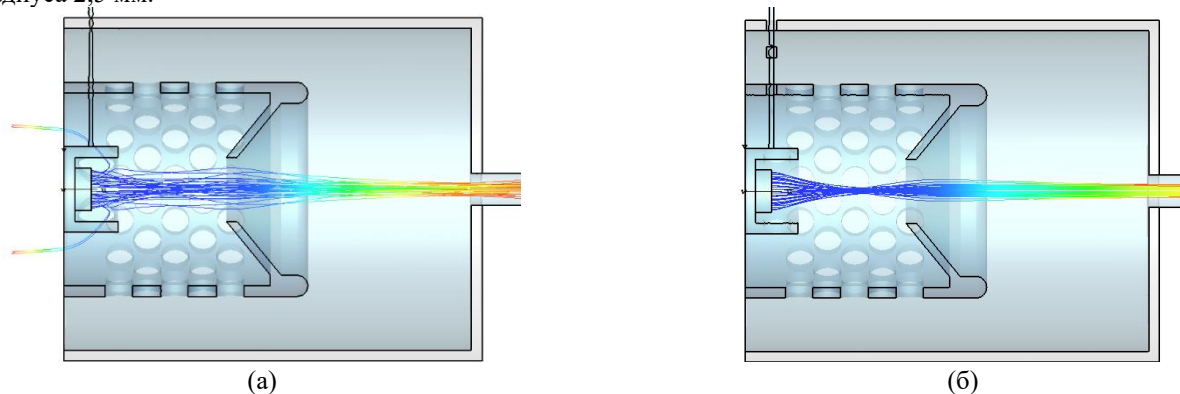


Рис. 2. Траектории пролета частиц в магнитном поле, смоделированном ранее (а) с катодным электродом с 4 отверстиями радиуса 3,5 мм и (б) с 6 отверстиями радиуса 2,5 мм

Полученные траектории наглядно показывают влияние проникающего магнитного поля, в результате расчетов был выбран катодный электрод с 6 отверстиями радиуса 2,5 мм.

### Список литературы

1. Lalayan M. et al. Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Applications //27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'21), Alushta, Russia, 27 September-01 October 2021. – JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2021. – С. 186-188.
2. Самароков Н. Ю., Модифицированный термоэмиссионный источник электронов для линейных ускорителей, ЛАПЛАЗ-2022. Москва, 2022. С. 321.

## РАЗРАБОТКА БЛОКА ПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА ДЛЯ ЭЦР ИОННОГО ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,46 ГГц

Рассмотрены схемы высоковольтного блока питания магнетрона. Разработана принципиальная схема силового модуля блока питания. Произведена сборка стенда для испытаний силовой части блока питания и проведена экспериментальная проверка силового модуля.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, S.A. TUMANOV  
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

### DEVELOPMENT OF A MAGNETRON POWER SUPPLY FOR 2,46 GHz ECRIS

The schemes of a high-voltage magnetron power supply are considered. A schematic diagram of the power module of the power supply unit has been developed. The assembly of the test bench for the power part of the power supply unit was carried out. The power module has been thoroughly tested.

Наиболее простым и дешевым источником СВЧ питания для ЭЦР источников ионов, работающих на частоте 2,46 ГГц, является магнетрон. В настоящее время в качестве источника питания маломощных магнетронов применяются схемы с высоковольтным трансформатором или инверторным блоком питания. При этом низкие частоты преобразования приводят к увеличению габаритов источников питания, а в случае трансформаторных блоков к этому недостатку добавляются ещё проблемы с регулированием мощности при работе блока питания в непрерывном режиме.

Блок питания магнетрона для ионного источника должен выдавать стабильное напряжение в несколько киловольт. Из-за малой инерционности плазмы важно чтобы питание, поступающее на магнетрон обладало малыми пульсациями, а блок питания работая в непрерывном режиме имел возможность плавной регулировки выдаваемой мощности. В связи с этим была поставлена задача создания соответствующего высоковольтного блока питания.

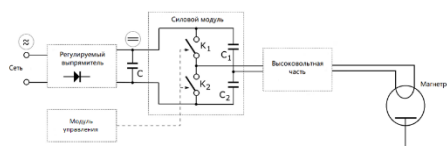


Рис.1. Схема блока питания магнетрона.

На рис. 1 представлена общая схема блока питания магнетрона. Она состоит из регулируемого выпрямителя, модуля управления, силового модуля, высоковольтной части блока питания и магнетрона.

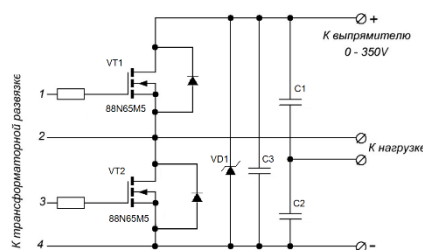


Рис.2 Схема силового модуля.

Представлена схема силового модуля (рис. 2). Она состоит из 2 транзисторов 88N65M5 с внутренними диодами, супрессора VD1, снабберного конденсатора  $C3 = 0,22 \text{ мкФ}$ , а также делителя напряжения из двух конденсаторов  $C1 = C2 = 1 \text{ мкФ}$ . Силовой модуль при испытаниях показал надёжную работу на частотах до 300 кГц, при этом на нагрузке были получены стабильные импульсы напряжения без опасных выбросов. Регулировка мощности на прошедшем этапе испытаний осуществлялась с помощью ЛАТРа.

На данный момент ведется разработка микропроцессорной системы управления мощностью блока питания магнетрона.

#### Список литературы

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021: Сборник научных трудов VII Международная конференция, Москва, 23–26 марта 2021 года. - Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2021. - С. 427-428.
2. Кухтецкий С. В. Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева //Институт химии и химической технологии, СО РАН, г. Красноярск. – 2010.
3. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021 : Сборник научных трудов VII Международная конференция, Москва, 23–26 марта 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2021. – С. 392-393.
4. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2022: Сборник научных трудов VIII Международная конференция, Москва, 22–25 марта 2022 года. - Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2022. - С. 325.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Разработана система экстракции и формирования пучка с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц. Выполнено моделирование динамики пучков протонов в источнике. Проведен сравнительный анализ ускоряющей асимметричной электростатической линзы и тормозящей электростатической линзы.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, O.A. IVANOV  
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

## OPTIMIZATION OF ELECTROSTATIC LENS PARAMETERS OF THE ECRIS

A system of extraction and beam formation has been developed with the possibility of longitudinal movement of the electrode system relative to the plasma electrode for an ECR source with an operating frequency of 2.46 GHz. The dynamics of proton beams in the source is simulated. A comparative analysis of an accelerating asymmetric electrostatic lens and a decelerating electrostatic lens is carried out.

В работе представлены результаты численного моделирования системы экстракции пучка для ЭЦР источника с рабочей частотой 2,46 ГГц [1-2] предназначенного для получения протонов и ионов  $\text{He}^{2+}$ . Выполнено моделирование системы экстракции пучка на основе пирсовской системы электродов и несимметричной ускоряющей электростатической линзы. Проведен сравнительный анализ ускоряющей асимметричной электростатической линзы и тормозящей симметричной электростатической линзы. Система извлечения и фокусировки ионов, показана на рис. 1.

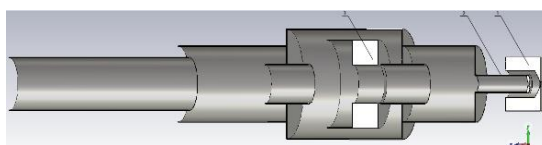


Рис. 1. Схема экстрактора: 1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – блок электродов электростатической линзы с несимметричным центральным электродом.

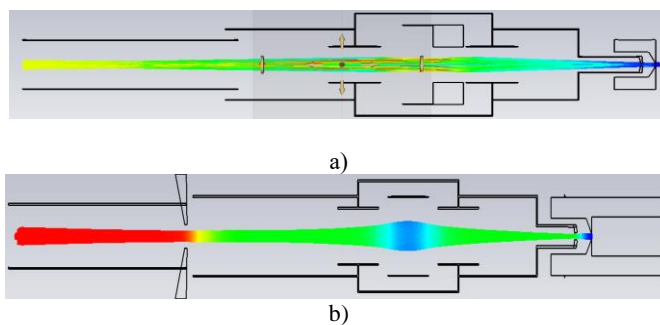


Рис. 2. Траектории пучка протонов в экстракторе: а) при использовании ускоряющей несимметричной линзы, б) при использовании тормозящей симметричной электростатической линзы.

При изменении конструкции электростатической линзы с тормозящей на ускоряющую асимметричную были получены следующие значения, приведенные в таблице 1.

Табл. 1. Параметры пучка протонов на выходе экстрактора

Параметр	Ускоряющая линза	Тормозящая линза
Эмиттанс, мм-рад	0,0057	0,028
Диаметр пучка, мм	8	14

### Список литературы

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В.// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021». Сборник научных трудов. Москва, 23–26 марта 2021 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 388-389.
2. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В. Иванов О.А., Краснов А.С.// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2022». Сборник научных трудов. Москва, 22–25 марта 2022 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 324.
3. A. Kitagawa et al. // Review of Scientific Instruments. 1998. Vol. 69. P. 674 – 676.



## РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

В работе приведены результаты моделирования системы экстракции лазерного источника ионов. На основе геометрии Пирса разработана система, состоящая из фокусирующих и ускоряющих электродов. Проведено моделирование для разных типов извлекаемых ионов с различными зарядами.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, A.S. KRASNOV  
 National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## DESIGN AND SIMULATION OF A LASER ION SOURCE EXTRACTION SYSTEM

This paper presents the results of the extraction system modeling of a laser ion source. A system based on the Pierce geometry consisting of focusing and accelerating electrodes has been developed. Simulations have been carried out for different types of extracted ions with different charges.

В работе предложена конструкция и представлены результаты численного моделирования системы экстракции пучка для лазерного источника легких многозарядных ионов. Выполнено моделирование системы экстракции пучка на основе пирсовской системы электродов.

Для получения, сходящегося пучка необходимо скомпенсировать влияние пространственного заряда ионов. Данная система основана на оптике Пирса, который предложил компенсировать пространственный заряд электрическим полем соответствующим образом выбранных электродов.

В первую очередь необходимо определить конструкцию электродов, позволяющих получить сходящийся пучок. На выходе из системы диаметр пучка должен быть менее 10 мм, эмиттанс менее 0,003 мм·рад. При расчетах важно учесть собственное поле частиц, от заряда которых зависит потенциал извлекающего электрода, например, для двухзарядного иона лития он составил 140 кВ. Схема расчетной модели вместе с траекторией частиц представлена на рис. 1.

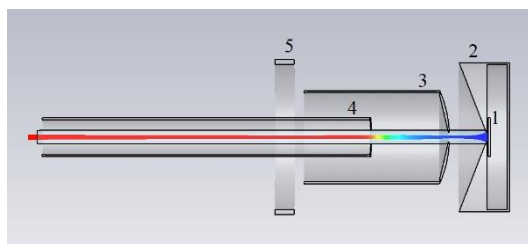


Рис. 1. Схема расчетной модели экстрактора и траектория ионов  $\text{Li}^{2+}$  после извлечения: 1 – мишень, 2 – плазменный электрод, 3 – извлекающий электроды, 4 – пролетная трубка с нулевым потенциалом, 5 – элемент фиксации электродов, с потенциалом плазменного электрода

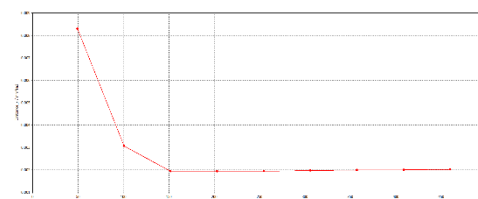


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного поперечного эмиттанса от координаты в системе извлечения для ионов  $\text{Li}^{2+}$ .

Выполнен подбор формы электродов для достижения минимального эмиттанса на выходе из системы на расстоянии 460 мм от плазменного электрода. Пучок на выходе из системы имеет диаметр 4,8 мм и эмиттанс 0,002 мм·рад.

Табл. 1. Параметры пучка на выходе экстрактора

Элемент	Зарядность	Среднеквадратичный поперечный эмиттанс, мм·рад	Диаметр пучка, мм	Напряжение платформы, кВ
Дейтерий	1	3,4		80
Литий	2	2,0	4,2	140
Бериллий	2	2,0	5,9	180
Бор	3	2,0	5,0	147
Углерод	4	2,1	4,9	120
Азот	5	2,2	5,1	112
Кислород	5	2,1	5,0	128

### Список литературы

1. М.С. Дмитриев, М.В. Дьяконов. Система экстракции пучка для лазерного источника легких ионов, ЛаПлаз-2021, с.419-420
2. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки.



А.А. ЛОСЕВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ, Е.Р. ХАБИБУЛЛИНА, А.В. ЗИЯТДИНОВА

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» -  
Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ И-4

Сеточные электростатические линзы часто используются в системах транспортировки пучка низкой энергии для согласования с ускорителями. Современная вычислительная техника и программное обеспечение позволяет рассматривать сетку, как набор проволок с заданным диаметром и размером ячейки. В работе представлены результаты численного моделирования с помощью программы Kobra3-INP электростатической линзы - системы согласования лазерно-плазменного источника ионов с линейным ускорителем И-4, и их сравнение с экспериментальными данными.

A.A. LOSEV, G.N. KROPACHEV, E.R. KHABIBULLINA, A.V. ZIATDINOVA

National Research Center «Kurchatov Institute» - Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

## NUMERICAL SIMULATION OF GRIDDED ELECTROSTATIC LENS FOR I-4 LINEAR ACCELERATOR

Gridded electrostatic lenses are frequently used in low energy beam transport systems for beam matching. Modern computer hardware and software allow to consider grid as a set of wires with given diameter and cell size. Numerical simulations of gridded electrostatic lens carried out by Kobra3-INP software package and comparison with experimental data are presented.

Численное моделирование - мощный метод изучения и оптимизации систем извлечения и транспортировки пучков заряженных частиц. Компьютерная программа Kobra3-INP [1] позволяет проводить такие расчеты. Она является трехмерной и может использовать неоднородную сетку, что дает возможность задавать сложную геометрию электродов и рассматривать линзу не как прозрачную для частиц плоскость с заданным потенциалом, а набор проволочек. Для моделирования ускорения ионного пучка в линейном ускорителе И-4 применена программа Dynamion [2]. Она позволяет производить расчеты динамики пучка, содержащего различные зарядовые состояния. Кроме того, она использовалась при разработке самого ускорителя И-4.

На рис. 1 изображена схема установки И-4. Лазерно-плазменный источник ионов основан на импульсно-периодическом CO<sub>2</sub>-лазере длительностью импульса 30 нс и энергией около 6 Дж в импульсе.

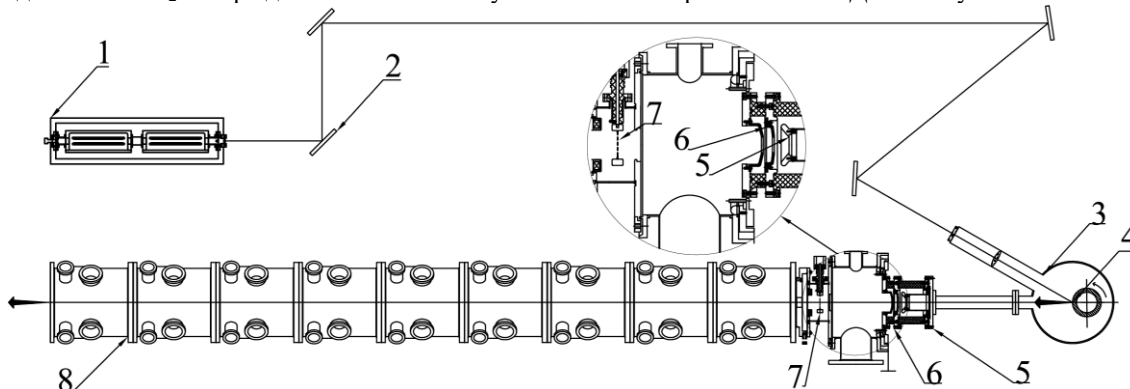


Рис. 1. Схема установки И-4. 1 - лазер, 2 - поворотные зеркала, 3 - вакуумная камера, 4 - мишень, 5,6 - электроды системы извлечения, 7 - электростатическая сеточная линза, 8 - ускоряющая структура ПКОФ

В работе представлены результаты компьютерного моделирования. Исходные данные для него, такие как распределение ионов углерода по зарядам и энергиям и парциальные токи, были получены в экспериментах на лазерно-плазменном источнике ионов. Результаты расчетов показывают хорошее соответствие с экспериментом [3] по ускорению пучка в ускорителе И-4.

### Список литературы

1. Spadtke P. // Kobra3-INP user manual. 2011.
2. Yaramyshev S. and others // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - section A, 2006. Vol. 558, Issue 1. P. 90-94
3. Losev A. and others // Proc. RUPAC'18, 2018. P. 498-500

## ГИБРИДНАЯ КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ DTL ЛИНАКА

Рассмотрена возможность использования для линейного ускорителя гибридной квадрупольной линзы на постоянных магнитах с корректирующей катушкой. Разработана конструкция линзы и проведена ее оптимизация для получения достаточного по величине магнитного поля в апертуре. В специализированном конечноэлементном 3D программном комплексе осуществлены расчеты для выявления соответствия градиента магнитного поля и других характеристик линзы предъявляемым требованиям.

T.R. DERBYSHEVA, E.I. ANTOKHIN  
*Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

## HYBRID QUADRUPOLE LENS FOR DTL LINAC

The possibility of using a hybrid quadrupole lens on permanent magnets with a correction coil for the linear accelerator is considered. The lens design was developed and optimized to obtain a sufficiently large magnetic field in the aperture. Calculations were performed in a specialized 3D FEM software package to determine whether the magnetic field gradient and other characteristics of the lens meet the requirements.

При конструировании квадрупольной линзы для конкретного ускорителя одной из основных проблем является подбор таких характеристик линзы, которые бы соответствовали предъявляемым требованиям к качеству поля.

В работе рассмотрена разработка квадрупольной линзы для проекта линейного 20 МэВ протонного ускорителя для нейтронной диагностики. Линза должна соответствовать следующим параметрам: магнитная апертура -  $\varnothing 47$  мм, градиент магнитного поля – 49 Тл/м, интеграл градиента магнитного поля - 6.32 Тл. При этом геометрическая длина линзы не должна превышать 130 мм, эффективная длина составляет 129 мм, а габариты линзы имеют значения  $450 \times 450 \times 130$  мм. Необходимость соблюдения ограничений по размерам накладывает особые условия на выбор типа линзы и материалов для нее.

Были рассмотрены широко распространенные линзы с применением электрообмоток. Недостатком этого типа является нагрев катушек в процессе эксплуатации, поскольку из-за ограничения на длину линзы установка системы охлаждения вызывает сложности. В работах [1, 2] описаны линзы на постоянных магнитах. Их преимущество состоит в создании более высокой эквивалентной плотности тока и экономии электроэнергии, но создаваемые ими поля не устойчивы к изменениям температуры окружающей среды. Кроме того, для данного типа линз невозможна регулировка поля.

В данной работе, а также в работе [3] рассмотрен вариант линзы, сочетающий в себе преимущества использования электрических обмоток и постоянных магнитов. С учетом описанных выше ограничений была предложена конструкция линзы с плитками постоянного магнита для создания основного магнитного потока. Постоянные магниты создают 80 % величины требуемого поля. На полюсах дополнительно размещены обмотки для получения оставшейся величины магнитного поля и ее возможного изменения. Ниже приведен рисунок линзы.

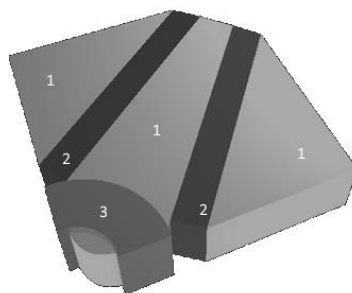


Рис. 1. Конфигурация линзы (1 – магнитопровод, 2 – плитки постоянного магнита, 3 – обмотка)

Проведенные в программном комплексе предварительные расчеты показали, что достигается требуемый интеграл градиента поля и однородность градиента в заданных граничных условиях работы линзы в составе линейного ускорителя.

### Список литературы

1. A Superstrong Adjustable Permanent Magnet for the Final Focus Quadrupole in a Linear Collider / T. Mihara, Y. Iwashita, M. Kumada, E. Antokhin, E. Sugiyama, C.M. Spencer // 2004. – SLAC-PUB-10877
2. Design, development and characterization of tunable Permanent Magnet Quadrupole for Drift Tube Linac / V Teotia, S Malhotra, E Mishra, P Kumar // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2022. – Vol. 982. – 164528.
3. Super hybrid quadrupoles / G. Tosin, P.P. Sanchez, J.F. Citadini, C.C. Vergasta // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2012. – Vol. 674. – P. 67 – 73.

А.А. МАЛЫШЕВ<sup>1,2</sup>, П.А. ФЕДИН<sup>2</sup>, В.С. СКАЧКОВ<sup>2</sup>, А.В. КОЗЛОВ<sup>2</sup>, Т.В. КУЛЕВОЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ

## ИДЕОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ CST-МОДЕЛИ РАЗДАТОЧНОГО МАГНИТА ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

Формирование постановки задачи к разработке модели раздаточного электромагнита в расчётной среде CST EMS для канала протонного ускорителя проекта DARIA. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к создаваемой расчётной модели, приведены начальные данные для моделирования, перечислены ключевые этапы построения модели.

A.A. MALYSHEV<sup>1,2</sup>, A.P. FEDIN<sup>2</sup>, V.S. SKACHKOV<sup>2</sup>, A.V. KOZLOV<sup>2</sup>, T.V. KULEVOY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRC "Kurchatov institute" - KCTEP

## IDEOLOGY OF DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNET MODEL IN CST EMS DEDICATED FOR COMPACT NEUTRON SOURCE DARIA

Technical task for development electromagnet model in CST EMS which provide for beam separation in proton linear accelerator transport channel of DARIA project were formulated. Basic requirements for creating CST model were considered, the initial data for physical modeling were shown. The main steps of model development were listed.

В связи с хронологией развития современного ядерного комплекса нейтронные источники на основе протонных ускорителей набирают всё большую популярность, за счёт отсутствия заряда нейтрон легко проникает в вещество и взаимодействует с ядром. Проведение нейтронных исследований материалов становится возможным не только на исследовательских ядерных реакторах, но и на компактных нейтронных источниках. Преимущество последних заключается в возможности расположения нейтроновода вблизи модератора за счёт отсутствия наведённой радиоактивности, отсутствие реакций деления вещества в процессе эксплуатации источника, плотность потока на образце сравнима с установками расположенными на ядерных реакторах средней мощности (10 МВт) [1]. Также стоимость компактного источника составляет 5-7 млрд. руб., что на 2 порядка меньше стоимости традиционных источников. Для разводки ускоренного протонного пучка по разным мишенным комплексам требуется использовать раздаточный магнит, работающий в режиме постоянного тока. Величина угла поворота пучка будет выбрана в зависимости от конфигурации экспериментального зала и требований экспериментаторов. На рисунке 1 показан общий вид транспортного канала протонного ускорителя, работающего в импульсном режиме на частоте 162,5 МГц, с интенсивностью пучка 100мА и выходной энергией 13 МэВ [2], с установленным раздаточным магнитом и тремя каналами вывода на нейтронные исследовательские установки.

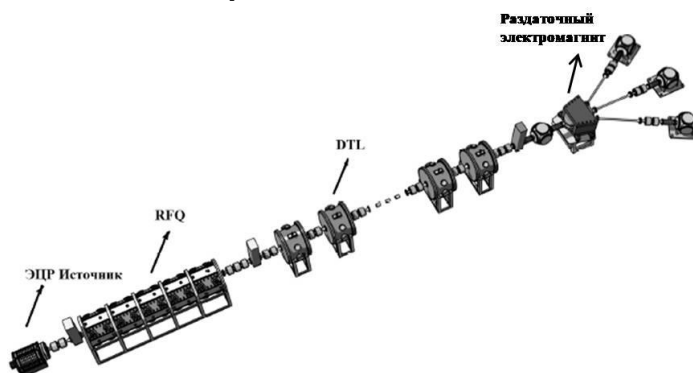


Рис. 1. Общий вид протонного ускорителя проекта DARIA

### Список литературы

1. К.А. Павлов, С.В. Григорьев и др.// Компактный источник нейтронов университетского класса для прикладных и промышленных исследований, Санкт-Петербург – Екатеринбург, ИОПФ РАН 2022
2. G. Kropachev, T.Kulevoy and A. Sitnikov // The proton linac for compact neutron source DARIA, Journal of Surface investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques:1126-1131,201

**Секция**  
**ДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ И УДАРНО-**  
**ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ**  
**УСЛОВИЯХ**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор  
Губин Сергей Александрович

Секретарь секции

– Маклашова  
Ирина Владимировна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9917

E-mail: [SAGubin@mephi.ru](mailto:SAGubin@mephi.ru), [IVMaklashova@mephi.ru](mailto:IVMaklashova@mephi.ru)

С. В. БОГОМОЛОВ

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

## ОСНОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧАСТИЦ

Методы частиц являются альтернативой разностным и конечных элементов. Их классификация объединяет традиционные неслучайные и новые стохастические представления. Первые включают в себя методы типов «частица - сетка» и «частица - частица», в том числе, разрывные и SPH.

Вероятностный подход, основанный на стохастических дифференциальных уравнениях, был разработан А.В. Скороходом, а применительно к кинетическим уравнениям - А.А. Арсеньевым при вычислительной поддержке А.В. Лукшина. Простейшая, но далеко не тривиальная модель газа из твердых сфер приводит к микро-мезо-макро иерархии в порядке убывания числа Кнудсена, благодаря переходам описания с использованием случайных процессов от прерывистого к диффузионному в шестимерном фазовом пространстве с редукцией к трехмерному. Такая цепочка позволяет нам уточнять уравнения Больцмана, Фоккера-Планка-Колмогорова и Навье-Стокса, обосновывает квазигазодинамику Б.Н. Четверушкина и Т.Г. Елизаровой, а также позволяет нам строить сквозные алгоритмы в рамках унифицированных методов частиц, стохастических и детерминированных.

S. V. BOGOMOLOV

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## FOUNDATIONS OF PARTICLE METHODS

Particle methods are an alternative to difference and finite element methods. Their classification combines traditional non-random and new stochastic representations. The former include methods of the "particle-mesh" and "particle-particle" types, including discontinuous and SPH.

The probabilistic approach based on stochastic differential equations was developed by A.V. Skorokhod, and applied to kinetic equations by A.A. Arsenyev with the computational support of A.V. Lukshin. The simplest, but far from trivial, model of a gas from solid spheres leads to a micro-meso-macro hierarchy in descending order of the Knudsen number, due to the transitions of the description using random processes from intermittent to diffusive in a six-dimensional phase space with reduction to three-dimensional. Such a chain allows us to refine the Boltzmann, Fokker-Planck-Kolmogorov and Navier-Stokes equations, substantiates the quasi-dynamics of B.N. Chetverushkin and T.G. Elizarova, and also allows us to build end-to-end algorithms within the framework of unified particle methods, stochastic and deterministic. of the scientific calculations are devoted to the computational experiment related to the Boltzmann equation, the substantiation of Monte Carlo methods. The probabilistic approach based on stochastic differential equations was developed by A.V. Skorokhod, and applied to kinetic equations by A.A. Arsenyev with the computational support of A.V. Lukshin. We will show how the simplest, but far from trivial, model of a gas from solid spheres leads to a micro-meso-macro hierarchy in descending order of the Knudsen number, due to the transitions of the description using random processes from discontinuous to diffusive in a six-dimensional phase space with reduction to three-dimensional. Such a chain allows us to refine the Boltzmann, Fokker-Planck-Kolmogorov and Navier-Stokes equations, and also allows us to build end-to-end algorithms within the framework of unified particle methods, stochastic and deterministic.

### *Список литературы*

1. Bogomolov S. V., Zakharova T. V. Boltzmann equation without the molecular chaos hypothesis // *Mathematical Models and Computer Simulations*. — 2021. — Vol. 13, № 5. — P. 743—755.
2. **Богомолов С. В.** Метод частиц. Несжимаемая жидкость // **Математическое моделирование**. — 2003. — Т. 15, № 1. — С. 46–58.

В.А. ШАРГАТОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И РАЗГОНА ФРАГМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

Представлен подход к трехмерному моделированию процесса образования ударных волн, фрагментации и разгона металлических оболочек продуктами высокоэнергетических соединений.

V.A. SHARGATOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF THE SHOCK WAVES GENERATION AND ACCELERATION OF METAL SHELL FRAGMENTS**

An approach to three-dimensional modeling of the process of shock wave formation, fragmentation and acceleration of metal shells by products of high-energy compounds is presented.

3D вычислительная программа позволяет проводить параллельные вычисления на высокопроизводительных вычислительных системах для упругопластических реагирующих течений пространственно-неоднородных сред, возникающих при выделении химической энергии высокоэнергетического вещества.

Производится расчет всех стадий процесса от инициирования химического превращения в высокоэнергетическом соединении до распространения ударной волны в окружающей среде, разлета фрагментов оболочки, перемешивания продуктов с воздухом и их догорания.

Состав высокоэнергетического соединения может иметь неоднородное распределение по пространству.

Высокоэнергетического соединения может быть заключено в металлическую оболочку. Предполагается, что заряд находится над поверхностью земли в воздухе в, возможно, загроможденном пространстве. При распространении ударной волны в воздухе поверхность земли считается недеформируемой и непроницаемой, либо является упруго-пластической или пористой средой с упруго-пластическим скелетом.

Расчет происходит в два этапа. На первом этапе происходит выделение энергии, разрушение оболочки, образование и разлет фрагментов, формирование ударной волны в воздухе. На этом этапе расчета используется метод сглаженных частиц (SPH) на основе варианта, предложенного в [1].

Второй этап начинается, когда расстояние между ударной волной и контактной поверхностью продукты/воздух становится порядка характерного размера области, занятой продуктами разложения, и продолжается до уменьшения давления в ударной волне ниже заданного значения. На этой стадии расчет проводится на регулярной сетке с помощью численного метода, в основе которого лежит метод семейства Годунова с линейной реконструкцией параметров среды внутри ячейки [2].

Представлено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

### *Список литературы*

1. Паршиков А. Н. Численный метод SPH, использующий соотношения распада разрывов, и его применение в механике деформируемых гетерогенных сред : Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Паршиков А. Н. — Москва, 2013.
2. Колган В. П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Ученые записки ЦАГИ. — 1972. — Т. 3, № 6. — С. 68—78. — С. 202.

А.Р. КАСИМОВ, А.Ю. ГОЛДИН

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

## УПРОЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ВДЕТОНАЦИЮ

В данной работе проанализирована упрощённая математическая модель для описания волн медленного горения, слабонелинейной детонации, а также перехода между ними. Рассмотренная модель получена «интерполяцией» между простой моделью горения, которая состоит из уравнений реакции- диффузии для температуры и продуктов реакции, и моделью слабонелинейной теории детонации.

A.R. KASIMOV, A.Yu. GOLDIN

Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russia

## A SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL FOR DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION

The paper presents a simplified mathematical model that describes flames, weakly nonlinear detonations, and the transition of deflagration to detonation. The proposed model is based on a kind of "interpolation" between a simple model of combustion, which consists of reaction-diffusion equations for temperature and reaction products, and a model of weakly nonlinear detonation theory.

Рассматриваемая математическая модель состоит из следующей системы уравнений:

$$u_t + u_x + \varepsilon u u_x = -\frac{\varepsilon}{2} T_x + \frac{4\delta}{3\varepsilon} Pr u_{xx}, \quad (1)$$

$$T_t - u_t = q\omega + \delta T_{xx}, \quad (2)$$

$$\lambda_t = \omega + \frac{\delta}{Le} \lambda_{xx}. \quad (3)$$

Эта система была предложена ранее в работе [1], в которой были получены предварительные результаты по решениям в виде бегущих волн. В данной работе мы подробно исследуем нестационарные задачи для этой системы, в том числе задачу об инициировании от горячего источника и переходе медленного горения в детонацию. Первое уравнение этой системы представляет собой уравнение переноса со слабой нелинейностью, вязкой диссипацией и источниковым членом тепловой природы. Второе уравнение описывает энерговыделение за счет химических реакций и диффузию тепла. Третье является уравнением кинетики с учетом диффузии. Переменные  $u$ ,  $T$ ,  $\lambda$  являются возмущениями скорости, температуры и доли продуктов реакции, соответственно. Индексы  $t$ ,  $x$  обозначают частные производные по времени и пространству. Параметры системы:  $\varepsilon \ll 1$  – степень нелинейности,  $\delta \ll 1$  – коэффициент теплопроводности,  $Pr$  – число Прандтля,  $Le$  – число Льюиса,  $q$  – теплота реакции.

Численное решение системы получено на основе метода расщепления по процессам второго порядка точности по времени и пространству, и оно подтверждает, что представленная модель содержит бегущие волны как с числом Маха  $M \ll 1$ , так и с  $M = 1 + o(1)$ , а также предсказывает переходные режимы между ними. На рисунке показана температура на  $(x, t)$ -диаграмме для задачи инициирования в канале от закрытого торца. Видна волна-прекурсор, за которой следует волна медленного горения, которая затем резко ускоряется и переходит в волну детонации.

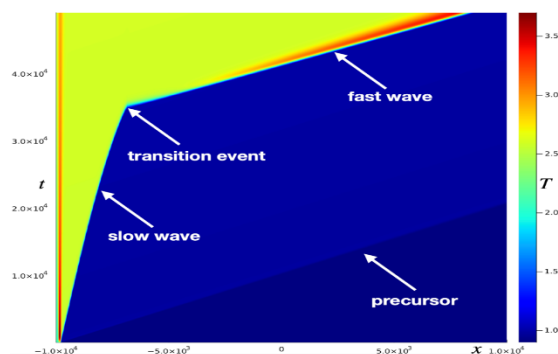


Рис. 1.  $x$ - $t$  диаграмма температуры при переходе медленной волны горения в детонацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 22-21-00902.

Список литературы

1. L. M. Faria, S. Lau-Chapdelaine, A. R. Kasimov, and R. R. Rosales // A toy model for detonations and flames. In 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS, Boston, USA), 2017.



О.П. СТОЯНОВСКАЯ

*Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

## **ГИБРИДНЫЙ МЕТОД SPH-IDIC ДЛЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СРЕД С РАЗНОМАСШТАБНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Для моделирования на макроуровне динамики газозвесей с полидисперсными частицами необходимо численно решать уравнения газодинамического типа с релаксационными слагаемыми, описывающими передачу импульса и энергии от газа к частицам и наоборот. В работе развит метод SPH-IDIC, основанный на лагранжевом методе гидродинамика сглаженных частиц. Погрешность SPH-IDIC при фиксированных счетных параметрах стремится к нулю при бесконечно малых и бесконечно больших временах релаксации.

O.P. STOYANOVSKAYA

*Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

## **HYBRID SPH-IDIC METHOD FOR SUPERCOMPUTER SIMULATION OF DUSTY GAS WITH MULTISCALE RELAXATION PARAMETERS**

To simulate the dynamics of dusty gases with polydisperse particles at the macroscale level, it is necessary to solve numerically equations of the gas-dynamic type with relaxation terms describing the transfer of momentum and energy from gas to particles and vice versa. We have developed the SPH-IDIC method based on the Lagrangian method Smoothed Particle Hydrodynamics. The error of SPH-IDIC at fixed numerical parameters tends to zero at infinitely small and infinitely large relaxation times.

Для моделирования на макроуровне динамики газозвесей с полидисперсными частицами необходимо численно решать уравнения газодинамического типа с релаксационными слагаемыми, описывающими передачу импульса и энергии от газа к частицам и наоборот. Для ультрадисперсных частиц время скоростной и тепловой релаксации намного короче, чем время, на котором рассматривается динамика среды. В этом случае время релаксации является малым параметром задачи, который делает задачу жесткой.

В работе развит метод SPH-IDIC, основанный на лагранжевом методе гидродинамика сглаженных частиц. Погрешность SPH-IDIC при фиксированных счетных параметрах стремится к нулю при бесконечно малых и бесконечно больших временах релаксации. Такие методы называются методами, сохраняющими асимптотику. Они имеют преимущество при решении жестких задач, так как позволяют выбирать счетные параметры независимо от малых физических параметров задачи. В SPH-IDIC все силы кроме межфазного обмена рассчитываются с помощью подхода частица-частица, а межфазный обмен рассчитывается неявно с использованием сетки [1,2]. Это определяет устойчивость и асимптотические свойства метода. Впервые получены дисперсионные соотношения для методов моделирования динамики газозвесей на основе SPH. Из этих соотношений установлено, что традиционно используемые подходы расчета межфазного взаимодействия частица-частица не сохраняют асимптотику. Подход IDIC с использованием сетки для расчета трения сохраняет асимптотику.

Разработана и верифицирована реализация SPH-IDIC для моделирования трехмерной динамики газодисперсных сред на суперкомпьютерах с распределенной памятью и машинах с графическими ускорителями [3].

Метод разрабатывается, в первую очередь, для моделирования астрофизических объектов - околосветных дисков [4], а также для реакторов газохимии с мелкодисперсным катализатором [5].

### *Список литературы*

1. Stoyanovskaya, O. P., Glushko, T. A., Snytnikov, N. V., & Snytnikov, V. N. (2018). Two-fluid dusty gas in smoothed particle hydrodynamics: Fast and implicit algorithm for stiff linear drag. *Astronomy and Computing*, 25, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2018.08.004>
2. Stoyanovskaya, O., Davydov, M., Arendarenko, M., Isaenko, E., Markelova, T., & Snytnikov, V. (2021). Fast method to simulate dynamics of two-phase medium with intense interaction between phases by smoothed particle hydrodynamics: Gas-dust mixture with polydisperse particles, linear drag, one-dimensional tests. *Journal of Computational Physics*, 430, [110035]. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.110035>
3. Stoyanovskaya, O. P., Grigoryev, V. V., Suslenkova, A. N., Davydov, M. N., & Snytnikov, N. V. (2022). Two-Phase Gas and Dust Free Expansion: Three-Dimensional Benchmark Problem for CFD Codes. *Fluids*, 7(2), [51]. <https://doi.org/10.3390/fluids7020051>
4. Vorobyov, E. I., Akimkin, V., Stoyanovskaya, O., Pavlyuchenkov, Y., & Liu, H. B. (2018). Early evolution of viscous and self-gravitating circumstellar disks with a dust component. *Astronomy and Astrophysics*, 614, [A98]. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731690>
5. Снытников В.Н., Пескова Е.Е., Стояновская О.П. Математическая модель двухтемпературной среды газ-твердые наночастицы с лазерным пиролизом метана. Принята в Математическое моделирование.

М.Н. ДАВЫДОВ<sup>1</sup>, О.П. СТОЯНОВСКАЯ<sup>1</sup>, Т.А. САВВАТЕЕВА<sup>1</sup>, В.Н. СНЫТНИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

## РЕГУЛЯРНЫЙ РАЗЛЕТ ГАЗОВОГО ШАРА В ВАКУУМ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ SPH

Аналитическое решение задачи о разлёте газового шара в вакуум предложено для тестирования трехмерных реализаций численных моделей газовой динамики. Тест позволяет оценить сферическую симметричность численного решения при использовании декартовой системы координат, диссипативные и дисперсионные свойства метода при конвективном переносе, точность воспроизведения решения на свободной границе. Представлены результаты численного решения задачи методом гидродинамика сглаженных частиц (SPH) в трехмерной программе, показана воспроизводимость аналитического решения в расчетах.

M.N. DAVYDOV<sup>1</sup>, O.P. STOYANOVSKAYA<sup>1</sup>, T.A. SAVVATEEVA<sup>1</sup>, V.N. SNYTIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

<sup>2</sup> Borekov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

## REGULAR EXPANDING OF A GAS BALL INTO VACUUM: ANALYTICAL SOLUTION AND (SPH) SIMULATION

An analytical solution of the problem of gas ball expanding into vacuum is written out in an explicit form. The solution is designed for benchmarking of three-dimensional gas dynamics solvers. The test makes it possible to evaluate a spherical symmetry of a numerical solution when using a Cartesian or cylindrical coordinate system. Moreover, the actual order of approximation of an implemented numerical algorithm, and the accuracy of reproducing the solution on a moving free boundary can be estimated. We present the results of numerical solution of the problem by using three-dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) simulations.

В работе описана задача о сферически-симметричном разлете газового шара в вакуум, при котором плотность шара в каждый момент времени однородна по пространству, а скорость линейно зависит от радиуса. Задача ставится для уравнений Эйлера идеального газа. Приведен способ построения аналитического решения этой задачи с самим решением для некоторых значений показателя адиабаты. Данную задачу рекомендуется использовать как тест при разработке численных моделей трехмерной динамики газа.

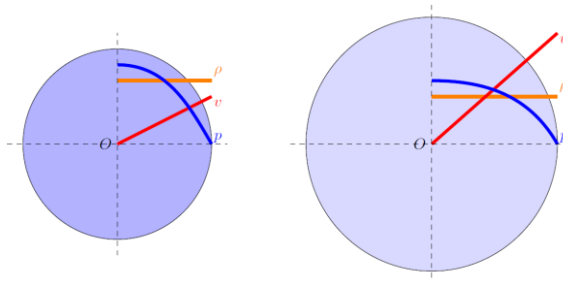


Рис. 1. Схема сферически симметричного регулярного разлета газового шара в вакуум.

Численное решение задачи о разлете газового шара выполнено методом SPH. Показано хорошее соответствие результатов численной реализации в трехмерном случае и аналитического решения. Продемонстрировано, что тест позволяет оценить сферическую симметричность численного решения при использовании декартовой системы координат, диссипативные и дисперсионные свойства метода при конвективном переносе, точность воспроизведения решения на свободной границе. Отметим, что при использовании относительно небольшого пространственного разрешения (40 модельных частиц на радиус шара), погрешность при расчете плотности разлетающегося шара не превосходит 1 процента при сохранении равномерного характера распределения плотности.

Моделирование выполнено для двух способов расчёта плотности в методе SPH (по распределению масс частиц и по уравнению неразрывности), в обоих случаях имеется соответствие аналитического решения и численных результатов. Детально описан алгоритм расчёта динамики частиц на границе газ-вакуум. Проведена оценка сохранения в расчете сферической симметрии и точности выполнения условий на границе газ-вакуум.

### Список литературы

1. J. F. Giron, S. D. Ramsey, and R. S. Baty. Nemchinov-Dyson solutions of the two-dimensional axisymmetric inviscid compressible flow equations. // Phys. Fluids 32, 127116 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0032170>
2. M. N. Davydov, O. P. Stoyanovskaya, T. A. Glushko. Numerical modelling of a gas-dust sphere scattering by SPHIDIC method. // Journal of Physics Conference Series 1675, 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012071>

Г.Д. РУБЛЕВ, С.А. ДЬЯЧКОВ, А.Н. ПАРШИКОВ

ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

## МЕТОД MUSCL-SPH ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЯЗКИХ И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД

Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с решением задачи Римана на контакте частиц [1] широко используется для моделирования вязких и упругопластических сред с разрывами. В этом методе используется кусочно-постоянная аппроксимация физических величин на контактах между частицами, что является причиной значительной схемной вязкости и приводит к сглаживанию фронта ударной волны. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается метод SPH, где на контактах между частицами используется кусочно-линейная реконструкция физических величин, аналогично схеме MUSCL в сеточном методе Эйлера.

G.D. RUBLEV, S.A. DYACHKOV, A.N. PARSHIKOV

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

## MUSCL-SPH METHOD FOR MODELLING VISCOUS AND ELASTIC-PLASTIC MEDIA

Smoothed particle hydrodynamics (SPH) method with Riemann problem solution on particle contact [1] is widely used for simulation of viscous and elastic-plastic media with discontinuities. This method uses a piecewise constant approximation of the physical quantities at the contacts between the particles, which causes significant numerical viscosity and leads to smoothing of the shock wave front. To solve this problem, this work proposes the SPH method, which uses a piecewise linear reconstruction of the physical quantities at the contacts between the particles, similar to the MUSCL scheme in the Euler grid method.

Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с решением задачи Римана на контакте частиц [1] широко используется для моделирования вязких и упругопластических сред с разрывами. Этот метод не требует использования искусственной вязкости для устойчивости решения в окрестности разрыва: устойчивое монотонное решение обеспечивается за счёт схемной вязкости метода. Однако использование кусочно-постоянной аппроксимации физических величин на контактах между частицами приводит к избыточной величине схемной вязкости и, как следствие, к чрезмерному сглаживанию фронта ударной волны.

Для преодоления этой проблемы в данной работе предлагается метод SPH, где на контактах между частицами используется линейная реконструкция физических величин. Предлагаемый здесь подход позволяет существенно снизить численную диффузию. Он применим как для моделирования течений жидкостей и газов, так и для моделирования упругопластических сред.

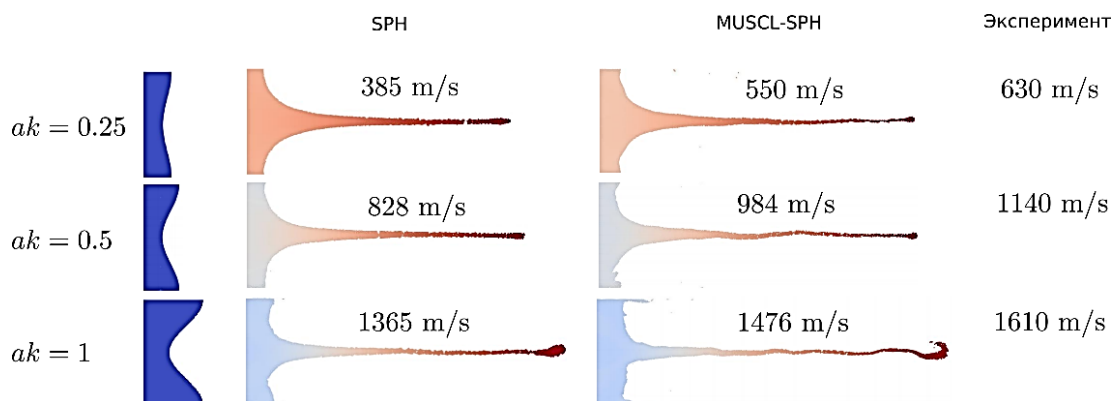


Рис. 1. Образование струи жидкого олова при пылении. Расчёт методами SPH и MUSCL-SPH.

В работе оценивается схемная вязкость полученного метода MUSCL-SPH по методике, представленной в работе [2]. Схемная вязкость нового метода оказалась существенно ниже, чем в исходном контактном методе SPH [1].

Предлагаемый метод применяется для моделирования процесса пыления гофрированной свободной поверхности металла при выходе на нее ударной волны, как описано в работе [3]. На рис. 1 показано, что скорость кумулятивных струй находится в хорошем согласии с экспериментом (отличие на 8-14%), в то время как метод [1] дает заниженные на величину от 15% до 39% значения скорости струй относительно измеренных в эксперименте.

### Список литературы

1. Parshikov, A. N., Medin S. A. Smoothed particle hydrodynamics using interparticle contact algorithms // Journal of Computational Physics 2002. Vol. 180. P. 358–382.
2. Parshikov A N, Rublev G D, Medin S A and Dyachkov S A // Proceedings of the 16th SPHERIC International Workshop 2022. Vol. 16. P. 186 – 191
3. W.T. Battler et al. Unstable Richtmyer–Meshkov growth of solid and liquid metals in vacuum // J. Fluid Mech. 2012. Vol. 703. P. 60-84

С.А. ДЬЯЧКОВ, С.Ю. ГРИГОРЬЕВ, Р.В. МУРАТОВ, С.А. МУРЗОВ, Г.Д. РУБЛЕВ  
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

**ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА РҮРНІА ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ МНОГОМАТЕРИАЛЬНОЙ  
СРЕДЫ**

Рассматривается архитектура и возможности программной платформы РҮРНІА для моделирования задач механики сплошной среды в параллельном режиме на суперкомпьютерных комплексах основными численными методами: метод конечного объема, метод конечных элементов, метод сглаженных частиц (SPH). Представлены особенности программной реализации, оценки производительности комплекса, а также примеры использования комплекса для решения прикладных задач.

S.A. DYACHKOV, S.YU. GRIGORYEV, R.V. MURATOV, S.A. MURZOV, G.D. RUBLEV  
FSUE "Dukhov Research Institute of Automatics", Moscow, Russia

**PYPHIA PLATFORM FOR PARALLEL SIMULATIONS OF CONTINUUM  
MULTIMATERIAL MECHANICS PROBLEMS**

We consider software architecture and capabilities of platform PYPHIA for continuum multi-material mechanics simulations on supercomputers in parallel using conventional numerical methods: finite volume method, finite element method, and smoothed particles hydrodynamics (SPH). We present the software implementation details, performance tests, and platform applications for real problems.

Для моделирования задач механики сплошной среды требуется значительная часть вычислительных ресурсов современных суперкомпьютеров. Дискретизация непрерывного представления среды может быть задана в виде статичной сетки из примитивных ячеек (подход Эйлера), между которыми рассчитываются потоки массы, импульса и энергии, а также в виде подвижной деформируемой сетки (подход Лагранжа), где масса ячеек остается постоянной. При решении задач с сильными градиентами давления и потерей сплошности материалов также широко применяется бессеточный лагранжевый метод сглаженных частиц SPH, где дискретизация сплошной среды дается набором материальных точек с заданными в них значениями полевых величин, которые аппроксимируются в окрестности этих точек с помощью компактных сглаживающих функций. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки и применяется для соответствующего класса задач. Применение этих методик в комплексе может существенно расширить возможности высокопроизводительного моделирования, а также позволяет реализовать соответствующие интерфейсы сопряжения различных численных методов.

Авторами работы представлена архитектура параллельного программного комплекса РҮРНІА, где программные модули, реализующие численные методы и модели сплошной среды отделены от сервисных модулей, обслуживающих ввод и вывод данных, сетевые коммуникации и балансировку вычислительной нагрузки. В программном комплексе используется гибридная параллелизация: в вычислительном узле с общей памятью применяется многопоточный расчет, а между узлами используется интерфейс передачи сообщений MPI. Динамическая декомпозиция расчетной области и балансировка нагрузки между вычислительными узлами осуществляется с помощью разбиения расчетной области на подвижные подобласти Вороного [1]. Такой подход изначально использовался для моделирования только методами частиц, однако мы демонстрируем, что он может успешно применяться и для сеточных методов.

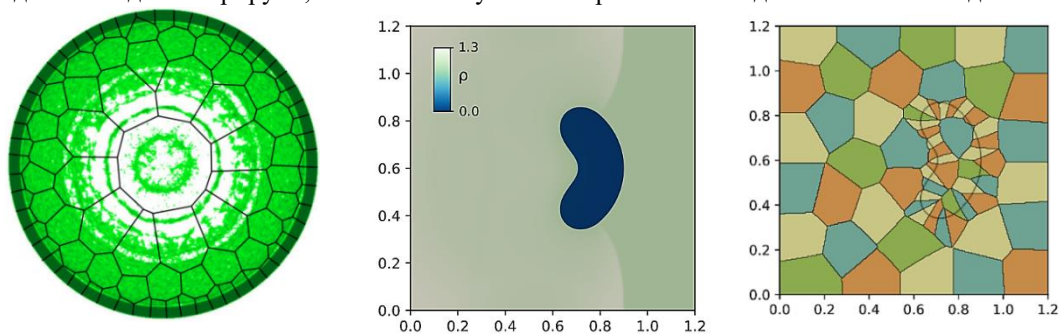


Рис. 1. Варианты декомпозиции расчетной области [1] в случае метода частиц SPH (электровзрыв проводника, слева) и метода конечного объема с локальной сеточной адаптацией (сжатие пузырька воздуха при прохождении ударной волны, справа).

В работе представлен анализ эффективности алгоритма динамической декомпозиции, приводятся тесты на сильную масштабируемость для сеточных и бессеточных методов. Рассматриваются различные прикладные задачи и обсуждаются перспективы использования комплекса.

*Список литературы*

1. Egorova M.S., Dyachkov S.A., Parshikov A.N., Zhakhovsky V.V. // Computer Physics Communications. 2019. Vol. 234. P.112-125.

С.А. МУРЗОВ, А.Н. ПАРШИКОВ, С.А. ДЬЯЧКОВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ  
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

## МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО ПОДВИЖНОГО ОКНА НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Рассматриваются возможности новой методики мезоскопического моделирования стационарной ударной волны в пористой меди. Контактный метод сглаженных частиц (CSPH) описывает модель упругопластической среды и позволяет задавать явную структуру пористого материала. Представлены особенности упругопластического течения при амплитуде вблизи предела текучести для меди с различной формой пор.

S.A. MURZOV, A.N. PARSHIKOV, S.A. DYACHKOV, V.V.ZHAKHOVSKY  
FSUE "Dukhov Research Institute of Automatics", Moscow, Russia

## ADAPTIVE MOVING WINDOW TECHNIQUE FOR STATIONARY SHOCK WAVES SIMULATION

The capabilities of a new technique for mesoscopic modeling of a stationary shock wave in porous copper are considered. The smoothed particle contact method (CSPH) approximates an elastic-plastic medium model in an arbitrary geometry, which allows the explicit structure of the porous material to be specified. The peculiarities of the elastic-plastic in porous material near the yield strength of copper for different pore shapes are presented.

Разработана методика адаптивного подвижного окна (AMW) для достижения стационарного потока входа и выхода при моделировании гидродинамических течений контактным методом сглаженных частиц. Метод разработан для получения стационарных ударных волн (УВ) и расчета ударных адиабат пористых материалов без экспериментальных данных об ударном нагружении. Итерационная процедура адаптации скорости системы отсчета позволяет получить стационарный поток в определенном положении УВ в расчетной области. Метод имеет преимущество перед методом MW [1], так как исключает модуляцию амплитуды УВ в процессе достижения стационарного течения. Результаты моделирования AMW подтверждаются сравнением с экспериментальными данными для пористой меди. Произведен анализ структуры фронта ударной волны для амплитуды УВ вблизи предела текучести сплошной меди, однако экспериментальные данные для этих амплитуд отсутствуют. Методика показала себя надежной для моделирования стационарных потоков с возможностью экономного использования вычислительных ресурсов. Ударная адиабата пористой меди имеет излом вследствие влияния прочности материала, что получено в серии AMW расчетов. В частности, прояснен механизм частичного схлопывания пор для слабых ударов ниже излома на рассчитанной ударной адиабате, которое связано с полным схлопыванием пор. Моделирование показывает, что прочность пористой меди имеет зависимость от формы пор и направления распространения ударной волны.

### Список литературы

1. Мурзов С.А., Паршиков А.Н., Дьячков С.А., Егорова М.С., Медин С.А., Жаховский В.В. // ТВТ. 2021. Т.59 (2). С. 221-230.

С.Ю. ГРИГОРЬЕВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия*

## **ДЕФОРМАЦИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА**

Проведено экспериментальное и расчётное исследование механизмов деформации и разрушения жидкометаллической капли из олова под воздействием ультракороткого лазерного импульса. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по скоростям деформации капли для различных интенсивностей лазерного импульса, продемонстрировано их хорошее согласие.

S. YU. GRIGORYEV, V. V. ZHAKHOVSKY

*FSUE "Dukhov Research Institute of Automatics", Moscow, Russia*

## **DEFORMATION OF A LIQUID-METAL TARGET IRRADIATED BY AN ULTRASHORT LASER PULSE**

Experimental and computational study of the Fragmentation mechanisms of liquid-metal tin droplet irradiated by ultrashort laser pulse is investigated experimentally and computationally. Simulated deformation velocities are compared with experimental data for different laser pulse intensities, and their good agreement is demonstrated.

Проблема взаимодействия лазерного импульса с жидкометаллической каплей приобрела практический интерес при разработке источников экстремального ультрафиолета (EUV), используемых в промышленной литографии нового поколения. Было обнаружено, что облучение капли жидкометаллического олова размером в десятки микрометров двумя последовательными лазерными импульсами приводит к образованию плазмы, излучающей фотоны в EUV диапазоне. Первый импульс (известный как "пред-импульс") служит для оптимизации мишени, деформируя или даже фрагментируя ее. Второй импульс (известный как "основной импульс") нагревает материал до состояния высокотемпературной плазмы. В работе проведено вычислительное исследование механизмов деформации и разрушения капли жидкометаллического олова под воздействием ультракороткого лазерного пред-импульса.

Результаты экспериментов демонстрируют, что односторонний нагрев такой капли может приводить к её симметричному или асимметричному расширению, что соответствует двум различным сценариям разрушения. Моделирование экспериментов, проведённое с использованием метода сглаженных частиц (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics), демонстрирует, что практически мгновенный прогрев приповерхностного слоя капли создаёт короткую ударную волну, которая распространяется с фронтальной поверхности капли к её тыльной поверхности. Схождение ударной волны к центру капли приводит к формированию больших растягивающих напряжений и, как следствие, к образованию кавитационного пузыря в её центральной части. При отражении ударной волны от тыльной поверхности может происходить откол с образованием тонкого откольного слоя, движущегося со скоростью, большей, чем скорость расширения жидкометаллической оболочки вокруг центрального кавитационного пузыря. Численно продемонстрировано, что пороговая интенсивность лазерного импульса, необходимая для формирования откола, выше пороговой интенсивности, которая требуется для образования кавитационного пузыря в центральной части капли. Следовательно асимметричное расширение капли происходит, если интенсивность лазерного излучения превышает порог формирования откола. Проведено сравнение расчетов с экспериментами по скоростям расширения оболочек для различных интенсивностей лазерного импульса, продемонстрировано их хорошее согласие.

Р.В. МУРАТОВ<sup>1,2</sup>, С.А. ДЬЯЧКОВ<sup>2</sup>

1) Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

2) Всероссийский НИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

## ЕДИНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CPU И GPU

В работе рассматривается подход к написанию расчетных программ для GPU в области численного моделирования механики сплошных сред. Разработанные принципы позволяют уменьшить дублирование кода и существенно упростить перевод существующего C++ кода для работы на GPU. Предложенная архитектура позволяет писать единый код и эффективно моделировать гидродинамику с использованием сеточных и бессеточных методов (SPH). Производительность кода тестируется на нескольких тестовых гидродинамических задачах и видеокартах Nvidia Tesla V100 и Nvidia A100.

R.V. MURATOV<sup>1,2</sup>, S.A. DYACHKOV<sup>2</sup>

1) National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

2) Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

## A UNIFIED APPROACH TO FLUID DYNAMICS SIMULATIONS USING CPU AND GPU

The paper considers an approach to writing GPU programs for the fluid dynamics simulations. The developed principles allow to reduce code duplication and significantly simplify the translation of existing C++ code to run on the GPU. The proposed architecture of program allows to write unified code and efficiently simulate hydrodynamics using finite-volume approach and SPH method. The performance of the code is tested on several hydrodynamic problems on Nvidia Tesla V100 and Nvidia A100 graphics cards.

В соответствии с наблюдением Мура [1], в прошлом мощности центральных процессоров (ЦП) возрастали в геометрической прогрессии. Современные процессоры уже в плотную подошли к физическим ограничениям на размеры транзисторов [2], поэтому дальнейшее увеличение производительности невозможно без использования параллельных вычислительных систем. Последние десятилетия мощность суперкомпьютеров увеличивалась в основном благодаря использованию графических ускорителей (ГПУ). Программы для ГПУ существенно отличаются даже от параллельных программ для ЦП. В связи с этим возникает вопрос о разработке универсальной архитектуры приложения, которое бы могло одинаково эффективно работать как с последовательным или параллельным кодом на ЦП, так и на ГПУ. В работе обсуждается возможная архитектура такого приложения, применимо к вычислительным задачам гидродинамики. Результаты моделирования демонстрируются на нескольких тестовых задачах гидродинамики, решенных методом конечных объемов и методом SPH. На рисунке 1 показано ускорение  $S$  выполнения задачи на ГПУ по сравнению со скоростью выполнения на одном ЦП.

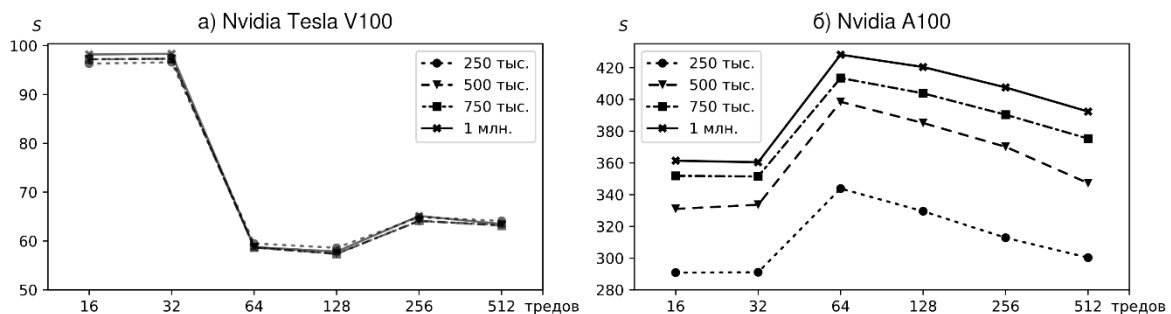


Рис. 1. Увеличение скорости выполнения тестовой гидродинамической задачи методом SPH на двух видеокартах Nvidia относительно скорости выполнения на одном ядре центрального процессора. На горизонтальной оси указано число CUDA-тредов. Графики построены для различных размеров задачи (250 тыс., 500 тыс., 750 тыс., 1 млн. SPH-частиц).

В численных экспериментах показано, что использование графических процессоров значительно сокращает время расчета задач механики сплошных сред (в 45 — 430 раз). При этом использование графических процессоров в решении задач методом SPH особенно эффективно. Видеокарта Nvidia A100 демонстрирует результаты в 1.5 — 4.5 раза лучше карты Nvidia Tesla V100 в зависимости от задачи. Во всех проведенных тестах показатели графических процессоров выигрывают у многопоточности на обычных многоядерных процессорах (в тестах на ЦП с 36 ядрами было получено ускорение до 25 раз). Таким образом, замена центрального процессора с 36 ядрами на карту Nvidia A100 позволяет сократить время расчета задач методом SPH до 17 раз.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 21-71-00102.

### Список литературы

1. Mack C.A. Fifty years of Moore's law // IEEE Transactions on semiconductor manufacturing. 2011. Vol. 24, № 2. P. 202–207.
2. Theis T.N., Wong H.S.P. The end of Moore's law: A new beginning for information technology // Computing Science & Engineering. 2017. Vol. 19, № 2. P. 41-50.



М.А. БУБНОВ

ФГБОУ ВО "Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева", Москва, Россия  
ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОТКЛИКА  
СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВЫХ И  
БЕССЕТОЧНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ**

M.A. BUBNOV

*Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF THE PULSED RESPONSE OF SPECIAL  
MATERIALS BY MEANS OF LAGRANGIAN-EULERIAN AND MESH-FREE NUMERICAL  
METHODS**

Доклад посвящен вопросам исследования интенсивного динамического нагружения специальных (композиционных, конструкционных со специальными свойствами и др.) материалов. Используется явное интегрирование по времени в пакетах прикладных программ ANSYS, LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS и др. Показаны преимущества и недостатки различных численных схем, в том числе лагранжево-эйлерового связывания и бессеточных методов типа DEM и SPH, даны рекомендации для практической реализации конструкций, работающих в условиях импульсных быстропротекающих процессов. Обобщен опыт работ автора за последние 20 лет и показаны тенденции развития явной динамики в свете промышленных CAE-пакетов мирового уровня.

*Список литературы*

1. М.А.Бубнов, В.Ф.Метасов, В.Е.Хомутский и др. Новый противопехотный многофункциональный инженерный боеприпас // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2006. № 1. С. 36-40.
2. Махутов Н.А., Бубнов М.А., Васильев И.Е. и др. Мониторинг разрушения волокон композитных материалов с применением системы акустической эмиссии, виброанализатора и высокоскоростной видео-съемки // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 14-23.
3. M.Mayselless, J.Falcovitz. Explosive acceleration of fragments as a function of their position to the explosive surface / Proc. of 23th Int. Symp. on Ballistics, Tarragona, Spain, 2007.
4. A.J. Piekutowski, M.J. Forrestal, K.L. Poormon, T.L. Warren. Perforation aluminum plates with ogive-nise steel rord at normal and oblique impacts // Int. J. Imp. Eng., 1996. Vol 18.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Доклад посвящен моделированию управления высокоскоростным обтеканием аэродинамических тел за счет использования стратифицированных источников энергии. Основное внимание уделяется взаимодействию головной ударной волны с термически стратифицированным источником энергии при сверхзвуковом обтекании. Численное моделирование на основе уравнений Навье-Стокса показывает, что стратифицированный источник энергии вызывает множественное проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, приводящее к размытию и даже полному исчезновению фронта ударной волны в поле плотности. Показано, что изменение температуры в слоях источника энергии приводит к нестационарным изменениям величины подъемной силы и силы лобового сопротивления. На основе полученных результатов сформулированы основные принципы нестационарного управления потоком/полетом с использованием стратифицированных источников энергии.

O.V. KRAVCHENKO, O.A. AZAROVA

Federal Research Center Computer Science and Control of RAS, Moscow, Russia

## SIMULATION OF THE HIGH-SPEED FLOW CONTROL USING STRATIFIED ENERGY DEPOSITION

The report is devoted to modeling the control of high-speed flow past aerodynamic bodies through the use of stratified energy sources. The main attention is paid to the interaction of the bow shock wave with a thermally stratified energy source in a supersonic flow. Numerical simulation based on the Navier-Stokes equations shows that a stratified energy source causes a multiple manifestation of the Richtmyer-Meshkov instability, leading to blurring and even complete disappearance of the shock wave front in the density field. It is shown that a change in temperature in the layers of the energy source leads to non-stationary changes in the magnitude of the lift force and the drag force. Based on the results obtained, the main principles of unsteady flow/flight control using stratified energy sources have been formulated.

В настоящее время задача немеханического управления высокоскоростным потоком с использованием вложения энергии в различных областях потока является актуальной и широко обсуждаемой [1, 2]. Взаимодействие ударной волны с температурно стратифицированным источником активно изучается как теоретически, так и экспериментально [3, 4]. Влияние термически стратифицированных плазменных областей на плоскую ударную волну в экспериментах вызывало искривление, размытие, а в некоторых случаях и полное исчезновение ее фронта [3-5].

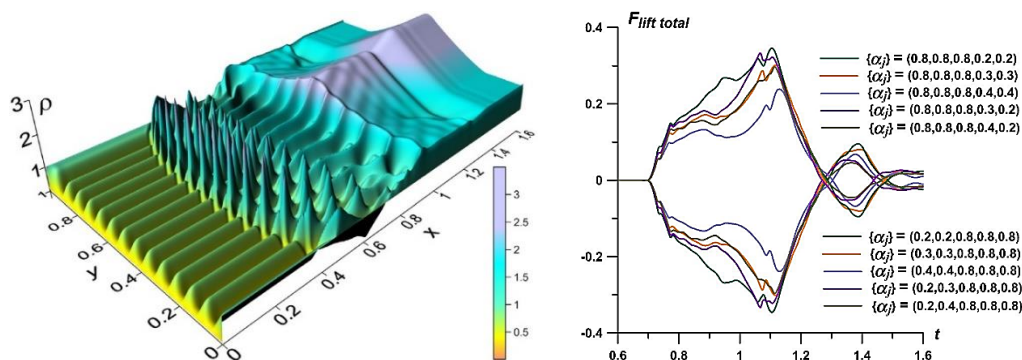


Рис. 1. Множественное проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова (слева), динамика подъемной силы для асимметричных и инвертированных наборов значений параметра разрежения в слоях стратифицированного источника энергии  $\{\alpha_j\}$  (справа)

В расчетах получено множественное проявление неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, приводящее к исчезновению фронтов ударной волны и контактного разрыва в полях плотности [5]. Проведенное исследование эффективности использования стратифицированного источника энергии вместо однородного с тем же значением полной энергии позволило сформулировать базовые принципы управления высокоскоростными потоками за счет термически стратифицированного энерговклада [6].

### Список литературы

1. Knight D., Kianvashrad N. // Energies. 2022. Vol. 15. №. 24. P. 1–40.
2. Ahmed M. Y. M., Qin N. // Prog. Aerosp. Sci. 2020. Vol. 112. P. 100585.
3. Leonov S. B., Firsov A. A., Houpt A. W. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1112. №. 1. P. 012005.
4. Apazidis N., Sembian S., Liverts M. // Proc. of the 32nd International Symposium on Shock Waves (ISSW32). 2019. P. 14–19.
5. Lapushkina T. A., Erofeev A. V., Azarova O. A., Kravchenko O. V. // Aerosp. Sci. Technol. 2019. Vol. 85. P. 347–358.
6. Azarova O.A., Kravchenko O.V. // Fluids. 2022. Vol. 7. P. 1–18.

А.И. САВВАТИМСКИЙ<sup>1,2</sup>, С.В. ОНУФРИЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

## ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕРОДА И ГАДОЛИНИЯ ПРИ БЫСТРОМ (5 $\mu$ S) НАГРЕВЕ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ОБЪЕМА

Измерено электросопротивление жидкого углерода (от области плавления до 9000 К) при импульсном нагреве током, в условиях ограничения объема (графит зажат в стекле) при температурах 3000 – 9000 К. Реализовано предварительное поджатие стеклянной ячейки в струбцине с болтовым соединением, что позволило повысить итоговое давление в импульсе – до  $\sim 30$  кбар (в области плавления пластинки углерода, толщиной 37 микрон). Удельное электросопротивление углерода оказалось равное константе в диапазоне: от области плавления 5500-6000 К, вплоть до 9000 К для жидкого углерода. Подобные эксперименты были выполнены также для гадолиния (в виде фольги толщиной 80 микрон), зажатой между двух толстостенных стеклянных пластин. Результаты для гадолиния также будут представлены в докладе.

A.I. SAVVATIMSKIY<sup>1,2</sup> AND S.V. ONUFRIEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

## ELECTRICAL RESISTIVITY OF LIQUID CARBON AND LIQUID GADOLINIUM BY RAPID HEATING BY ELECTRICAL CURRENT PULSE (5 $\mu$ S) UNDER CONFINED VOLUME

The electrical resistance of liquid carbon from the melting region to 9000 K was measured under pulsed current heating, under conditions of confined volume, (between two glass plates) at temperatures of 3000 – 9000 K. Pre-compression of the glass cell in a clamp with a bolted connection was implemented, which allowed to increase the final pressure - up to  $\sim 30$  kbar (in the melting region of a carbon plate, 37 microns thick). The electrical resistivity of carbon turned out to be a constant in the range: from the melting region of 5500-6000 K, up to 9000 K for liquid carbon. Similar experiments were also performed for gadolinium (in the form of an 80 micron thick foil) sandwiched between two thick-walled glass plates. The results for gadolinium will also be presented in the report.

Ограничение расширения жидкого углерода при размещении исходной пластинки графита между толстостенными стеклами ТФ-5 (тяжелый флинт) - позволило измерить удельное электросопротивление ( $\rho$ ) в условиях повышенного давления. Главный результат по жидкому углероду – это постоянство электросопротивления  $\rho$  жидкого углерода от 6000 К до 9000 К в условиях ограничения расширения жидкого углерода. Это совпадает с поведением жидкой ртути при ограничении ее расширения (Кикоин [1]). В этих условиях оценка давления углерода (по  $dP/dT = 27$  бар/К, Гоксен [2]) при окончании плавления составляет  $\sim 30$  кбар. Полученные данные опровергают оценку давления (3-18 кбар) при подобной запрессовке графита в стекле [3], где при более быстром нагреве была получена температура плавления графита 6400 К, с претензией на получение новой линии плавления.

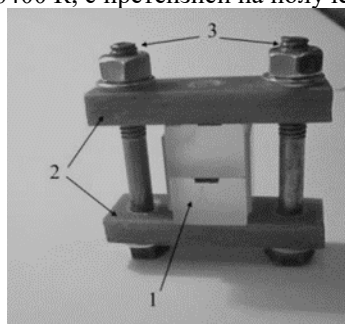


Рис.1. Сборка.

1 - Два блока стекла ТФ5, толщиной по 11 мм.  
2 – Стеклотекстолит (7 мм). В центре верхней пластины видно отверстие для вывода излучения и измерения температуры. 3 – Болты для стяжки.

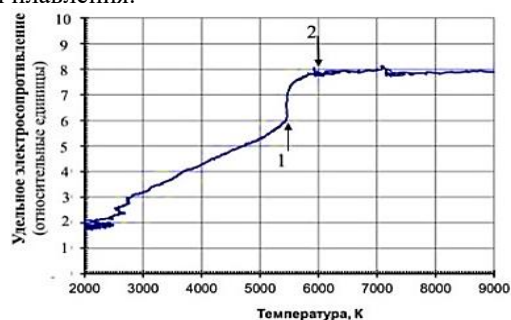


Рис.2. Зависимость  $\rho$  (в относительных единицах) графита НОРГ от Т.

1-2 Плавление 5500 К – 6000 К. Для жидкого углерода (6000 – 9000 К) регистрируется постоянство электросопротивления  $\rho$ .

Первые результаты подобных экспериментов опубликованы нами в УФН [4]. Данная работа выполнена при финансовой поддержке, в рамках продолжения гранта РФФИ, № 19-79-30086 (руководитель академик Г.А.Месяц).

### Список литературы

1. И.К. Кикоин. Физика и Судьба, Москва. Издательство Наука, (2008) ISBN 978-5-02-036628-2
2. Goksen N A et al. // *High temperature Sci.* 8 81 (1976)
3. Kondratyev A M, Rakhel A D. // *Physical review letters* 122 175702 (2019)
4. Савватимский А И, Онуфриев С В. // УФН, Т. 190, № 10, 1085-1108, (2020)

П.А. ВЛАСОВ<sup>1</sup>, В.Н. СМИРНОВ<sup>1</sup>, А.Р. АХУНЬЯНОВ<sup>1</sup>, Э. БУЗИЛЛО<sup>3</sup>,  
Д.И. МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>, Г.Л. АГАФОНОВ<sup>1</sup>, В.А. ПОЛЯНСКИЙ<sup>2</sup>, И.Л. ПАНКРАТЬЕВА<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Факультет химической технологии и экологии, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

## **ОБРАЗОВАНИЕ МОЛЕКУЛ АЦЕТИЛЕНА И ЧАСТИЦ САЖИ ПРИ ПИРОЛИЗЕ СМЕСЕЙ БЕНЗОЛА И СМЕСЕЙ ЭТИЛЕНА С МЕТАНОМ И ПРОПАНОМ ЗА ОТРАЖЕННЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И КИНЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**

Проведены эксперименты на ударной трубе в отраженных ударных волнах по измерению периода индукции и выхода частиц сажи при пиролизе смесей бензола, этилена и смесей этилена с добавками метана и пропана. Эксперименты проводились в интервале температур 1500–2500 К и давлений 3–5 бар за фронтом отраженной ударной волны. Параметры ансамбля частиц сажи определялись по поглощению оптического излучения на длине волны  $\lambda = 632.8$  нм. Измерения температуры частиц сажи проводили с использованием двух пространственно-разделенных каналов для регистрации поглощения и излучения ансамбля частиц сажи. Полученные экспериментальные результаты использовались для проверки нашей единой кинетической модели сажеобразования. Проведенные детальные кинетические расчеты процесса сажеобразования убедительно продемонстрировали, что для количественного описания параметров сажеобразования при пиролизе ароматических углеводородов, в частности бензола и при пиролизе этилена и ацетилене необходимо введение в кинетическую модель двух независимых каналов образования зародышей частиц сажи: полиароматический и полииновый пути. В первом случае зародыши частиц сажи образуются из различных полиароматических молекул и радикалов, содержащих как минимум одно ароматическое кольцо из шести атомов углерода, а также они могут содержать и пятичленные кольцевые структуры. Во втором случае, зародыши образуются из различных полииновых неароматических фрагментов, содержащих одинарные, двойные и тройные кратные связи между атомами углерода.

P.A. VLASOV<sup>1</sup>, V.N. SMIRNOV<sup>1</sup>, A.R. AKHUNYANOV<sup>1</sup>, E. BUSILLO<sup>3</sup>,  
D.I. MIKHAILOV<sup>1</sup>, G.L. AGAFONOV<sup>1</sup>, V.A. POLYANSKIY<sup>2</sup>, I.L. PANKRATYEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Department of Chemical and Environmental Engineering, I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

## **FORMATION OF ACETYLENE MOLECULES AND SOOT PARTICLES DURING PYROLYSIS OF THE MIXTURES OF BENZENE, ETHYLENE AND ETHYLENE MIXTURES WITH METHANE AND PROPANE BEHIND REFLECTED SHOCK WAVES: EXPERIMENTS AND KINETIC SIMULATIONS**

Experiments were carried out on a shock tube in reflected shock waves to measure the induction times and the soot yield of soot particles during pyrolysis of the mixtures of benzene, ethylene and ethylene mixtures with methane and propane additives. The experiments were carried out in the range of temperatures 1500–2500 K and pressures 3–5 bar behind the reflected shock waves. The parameters of the ensemble of soot particles were determined by the absorption of optical radiation at a wavelength of  $\lambda = 632.8$  nm. Measurements of the temperature of soot particles were carried out using two spatially separated channels to record the absorption and emission of an ensemble of soot particles. The experimental results obtained were used to test our unified kinetic model of soot formation. The detailed kinetic calculations of the soot formation process have convincingly demonstrated that for a quantitative description of the parameters of soot formation during pyrolysis of aromatic hydrocarbons, in particular benzene and during pyrolysis of ethylene and acetylene, it is necessary to introduce two independent channels for the formation of soot particle nuclei into the kinetic model: polyaromatic and polyene-like pathways. In the first case, the nuclei of soot particles are formed from various polyaromatic molecules and radicals containing at least one aromatic ring of six carbon atoms, and they may also contain five-membered ring structures. In the second case, the nuclei are formed from various polyene-like nonaromatic fragments containing single, double and triple multiple bonds between carbon atoms.

При детальном кинетическом моделировании процесса сажеобразования возникает принципиальный вопрос о механизме образования зародышей новой фазы. При относительно высоких температурах, при которых экспериментально наблюдается образование частиц сажи, способны выживать только наиболее термически стабильные углеводороды двух типов: полиароматические и полииновые (полиацетиленовые). В подавляющем большинстве моделей сажеобразования рассматривается единственный путь образования зародышей частиц сажи из полиароматических фрагментов. Однако наши эксперименты с алифатическими и ароматическими углеводородами по сажеобразованию в отраженных ударных волнах показали, что для количественного описания экспериментально наблюдаемых параметров ансамбля частиц сажи необходимо ввести в модель еще один путь образования зародышей из неароматических полииновых фрагментов. В данной работе проведено прямое сравнение результатов экспериментов и кинетических расчетов сажеобразования при пиролизе смесей различных углеводородов в отраженных ударных волнах. Введение в кинетическую модель двух каналов образования зародышей частиц сажи позволяет количественно описать результаты экспериментов. Использование только одного полиароматического пути приводит к большим расхождениям результатов экспериментов и кинетических расчетов. Исследуемые экспериментально углеводороды (бензол, этилен и смеси этилена с метаном и пропаном) выбраны таким образом, чтобы зародыши частиц сажи образовывались при пиролизе смесей этих углеводородов по двум разным каналам.

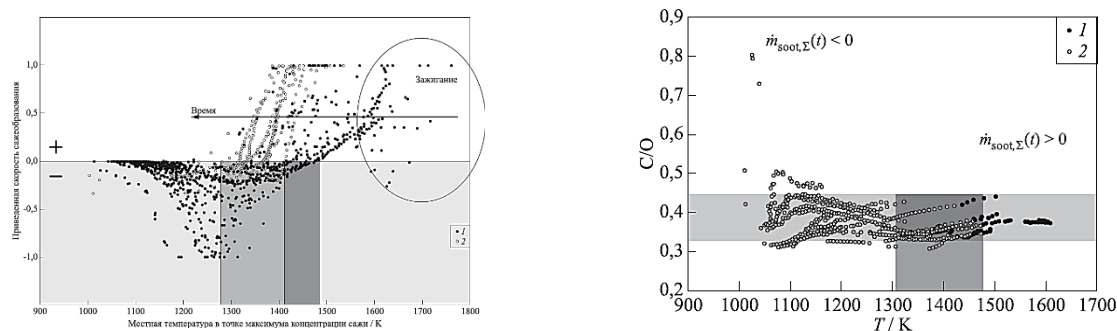
С. М. ФРОЛОВ, В. С. ИВАНОВ, Ф. С. ФРОЛОВ, П. А. ВЛАСОВ  
 Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва  
**САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В СФЕРИЧЕСКОМ ДИФФУЗИОННОМ ПЛАМЕНИ**

В период с 2019 по 2022 гг. на Международной космической станции проводился совместный российско-американский космический эксперимент Адамант. Цель космического эксперимента — изучение механизмов управления сажеобразованием в сферическом диффузионном пламени, формируемом вокруг пористой сферы, и радиационного погасания в условиях микрогравитации. Объектами исследования были «нормальные» и «обратные» сферические диффузионные пламена газообразного этилена в атмосфере кислорода с добавками азота при комнатной температуре и давлениях от 0,5 до 2 атм. «Нормальное» пламя — это пламя, образованное в атмосфере окислителя при подаче горючего через пористую сферу. «Обратное» пламя — это пламя, образованное в атмосфере горючего при подаче окислителя через пористую сферу. В работе представлены результаты расчетов сажеобразования в нормальных и обратных пламенах. Показано, что сажеобразование в нормальных и обратных пламенах сосредоточено в области, где местное атомарное отношение C/O и местная температура удовлетворяют условиям  $0,32 < C/O < 0,44$  и  $T > 1300\text{--}1500$  К.

S. M. FROLOV, V. S. IVANOV, F. S. FROLOV, P. A. VLASOV  
 N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow  
**SPHERICAL DIFFUSION FLAMES: SOOT FORMATION**

The joint American–Russian space experiment Adamant was carried out on the International Space Station (ISS) in the period from 2019 to 2022. The objective of the joint space experiment was to study the mechanisms of control of soot formation in a spherical diffusion flame formed around a porous sphere and radiative extinction of the spherical diffusion flame under microgravity conditions. The objects of the study were “normal” and “inverse” spherical diffusion flames of gaseous ethylene in an oxygen atmosphere with nitrogen addition at room temperature and pressures ranging from 0.5 to 2 atm. A normal flame is a flame formed in an oxidizing atmosphere when fuel is supplied through the porous sphere. An inverse flame is a flame formed in a fuel atmosphere when an oxidizer is introduced through the porous sphere. Presented in the paper are the results of calculations of soot formation in normal and inverse spherical diffusion flames. It is shown that soot formation in normal and inverse spherical diffusion flames is concentrated in the region where the local C/O atomic ratio and local temperature satisfy the conditions  $0.32 < C/O < 0.44$  and  $T > 1300\text{--}1500$  K.

В работе проведены расчеты эволюции нескольких десятков нормальных и обратных СДП этилена в условиях микрогравитации. С помощью расчетов определены условия сажеобразования в таких пламенах. Расчеты основаны на одномерной нестационарной модели диффузионного горения газов с детальной кинетикой окисления этилена, дополненной макрокинетическим механизмом сажеобразования. Показано, что сажеобразование в нормальных и обратных пламенах сосредоточено в области, где местная температура и местное атомарное отношение C/O удовлетворяют условиям  $T > 1300\text{--}1500$  К (рисунок 1а) и  $0,32 < C/O < 0,44$  (рисунок 1б). Условие начала сажеобразования по температуре в целом согласуется с литературными данными для газовых диффузионных пламен, получаемых в горелочных устройствах с однонаправленным и противонаправленным потоками горючего и окислителя в условиях земной гравитации. Что касается условий сажеобразования по значениям местного атомарного отношения C/O, то полученные пороговые значения C/O оказались ниже известных литературных данных ( $C/O > 0,53$ ) для диффузионных пламен. Следует, однако, отметить, что в литературе есть данные о том, что в гомогенных этиленовоздушных пламенах при атмосферном давлении наночастицы сажи могут образовываться и при местном атомарном отношении  $C/O = 0,4$ .



(а) (б)

Рис. 1. Зависимости приведенной скорости сажеобразования в нормальных (1) и обратных (2) пламенах от мгновенной локальной температуры в точке максимума концентрации сажи в структуре пламени (а); Расчетные зависимости суммарной скорости сажеобразования от значений атомарного отношения C/O и температуры в точке максимума концентрации сажи в структуре пламени через 10 с после зажигания, (1) – скорость сажеобразования  $> 0$ , (2) – скорость сажеобразования  $< 0$  (б)

С.К АГАФОНОВ

*Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета  
МИФИ,  
Саров, Россия*

## РАСЧЁТ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ ПО КРИВОЙ ВЕЙБУЛЛА-ОДИНГА

В работе представлен алгоритм расчёта роста усталостной трещины в силовых элементах конструкций для области как малоциклового, так и многоциклового нагружения. Достаточным условием для этого служит описание кривой усталости материала формулой Вейбулла-Одинга, которая в двойных логарифмических координатах аппроксимируется билинейным законом.

S.K. AGAFONOV

*Sarov Physical & Technical Institute - National Research Nuclear University MEPhI  
(Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia*

## CALCULATION OF FATIGUE CRACK GROWTH BY WEIBULL-ODING CURVE

The paper presents an algorithm for calculating fatigue crack growth in structural strength members for both low-cycle and high-cycle loading areas. A sufficient condition for this is the description of the material fatigue curve by the Weibull-Oding formula, which in double logarithmic coordinates is approximated by a bilinear law.

При расчёте вибрационной прочности силовых деталей конструкций от действия гармонической или случайной вибрации используют, как правило, критерии разрушения, базирующиеся на кривых усталости материалов. Некоторые из них используют представление в форме Вейбулла-Одинга [1,3]. Такой подход определяет итоговое разрушение образца при достижении количества циклов нагружения, соответствующего точке на кривой усталости для заданной амплитуды циклического напряжения. При этом остаётся за кадром хронология роста изначального дефекта, приводящего в итоге к разрушению объекта испытаний.

Более современная методология определения поражения конструкций от действия вибрационной нагрузки использует КДУР, которая позволяет определять динамику роста усталостной трещины на любой стадии её развития. Данный подход позволяет построить КДУР материала, используя кривую усталости Вейбулла-Одинга и по ней рассчитать реальное развитие трещины усталости в детали конструкции.

### *Список литературы*

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 454с.
2. Билык Н.А., Артемьева Т.Н. Оценка показателей надёжности и усталостной прочности деталей механических конструкций при действии многоступенчатой случайной вибрационной нагрузки // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2014. №2. С.37.
3. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник / Под редакцией В.Т. Трощенко и Л.А. Сосновского. Киев: Наукова думка, 1987. 1302с.

А.А. НИКИФОРОВ, Ю.В. БАТЬКОВ, В.А. ПУШКОВ

Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета  
МИФИ,  
Саров, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИТА И БЕТОНА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

Проведено 3 опыта с образцами бетона и 8 опытов с образцами гранита для исследования динамического сжатия методом ССГ с использованием постановки с взрывным нагружением и с использованием пневматической нагружающей установки (ПНУ) соответственно с целью получения данных по прочностным свойствам. Получены зависимости напряжения от деформации, скорости деформации от деформации, а также значения пределов прочности для образцов бетона и гранита.

A.A. NIKIFOROV, Yu.V. BATKOV, V.A. PUSHKOV

Sarov State Physics and Technical Institute National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia

## MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE AND GRANITE WITH SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR

3 experiments with concrete specimens and 8 experiments with granite specimens to study dynamic compression by Hopkinson pressure bar method using staging with explosive loading and using pneumatic loading unit (PUN) accordingly to obtain data on the strength properties were carried out. Stress-strain relationships, strain-rate-strain relationships, and ultimate strength values for concrete and granite samples were obtained.

Бетон – один из основных материалов, используемых в конструкциях зданий и сооружений. Гранит – одна из самых плотных, твердых и прочных горных пород. Из-за своих свойств низкого водопоглощения и высокой устойчивости к низким температурам гранит находит широкое применение в качестве основного строительного материала мостов, объектов культурного значения (памятники, постаменты) и др. архитектурных решений. Конструкции из бетона и гранита, как правило, испытывают длительные статические нагрузки в ходе их эксплуатации. Еще на этапе проектирования образцы из бетона и гранита проходят статические испытания на одноосное сжатие, ползучесть и т.д. (при скоростях деформирования  $\dot{\epsilon}$  до  $10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ) для подтверждения пригодности использования материала. Такие сооружения, как, например, корпуса энергоблоков атомных электростанций, защитные бункеры, укрепленные блиндажи и т.п. в случае с бетоном и сооружения военного и оборонного назначения, содержащие в своей конструкции гранитные породы, в случае с гранитом, способны испытывать динамические нагрузки при  $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^5 \text{ c}^{-1}$ .

Целью данной работы являлось получение данных по прочностным свойствам бетона и гранита с использованием метода ССГ, а также с целью верификации параметров моделей, имитирующих бетонные и гранитные преграды. Для исследования динамического сжатия бетона методом ССГ была использована постановка с взрывным нагружением, для исследования динамического сжатия гранита – с пневматическим нагружением.

По результатам опытов получены зависимости напряжения от деформации, пределы прочности для образцов бетона и гранита, представленных в таблице. Характер диаграмм динамического сжатия образцов соответствует хрупкой модели деформирования. Во всех опытах образцы бетона и гранита разрушались.

Таблица. Значения предела прочности для образцов бетона и гранита

№ опыта	Бетон		Гранит	
	$\dot{\epsilon}$ в момент достижения $\sigma_b$ , $\text{c}^{-1}$	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	$\dot{\epsilon}$ в момент достижения $\sigma_b$ , $\text{c}^{-1}$	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа
1	95	86,5	115	112,4
2	126	85,8	537	120,9
3	130	92,9	343	143,1

Полученные свойства бетона и гранита позволяют уточнить параметры моделей, имитирующих бетонные и гранитные преграды.

### Список литературы

1. Kolsky G. The study of mechanical properties of materials at high speeds of loading. М.: Mechanics, 1950, vol. 4, с.108-128.
2. V.M. Belsky, V.A. Pushkov. Research Methods for Dynamic Properties of Materials. Tutorial. Sarov: FGUE «RFNC-VNIIEF», 2021. - 203с.
3. Physical and Mechanical Properties of Concrete and Granite. Protocol of FGUE «RFNC-VNIIEF». A.A. Nikolin, A.A. Okinchits, E.V. Koshatova et al. Inventory No. 3M-2704dsp. 2021. 14с.



В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ

Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета  
МИФИ,  
Саров, Россия

## ИЗУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

Обзорно обсуждены виды исследований характеристик взрывчатых веществ (ВВ) при низкоскоростном (до  $\approx 100$  м/с) механическом воздействии. Подробнее из работы [1] рассмотрены результаты исследования динамического сжатия ВВ методом составного стержня Гопкинсона (ССГ) с инициированием взрывчатого превращения.

V.A. PUSHKOV, Y.V. BATKOV

Sarov Physical & Technical Institute - National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics  
Institute),  
Sarov, Russia

## STUDYING OF EXPLOSIVES UNDER DYNAMIC LOADING BY THE SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR TECHNIQUE

The investigating types of explosives properties under low velocity (until  $\approx 100$  m/s) mechanical impact are briefly discussed. From paper [1] the results of HE dynamic compression tests with explosive-conversion-initiated by the SHPB technique are considered in detail.

Знание характеристик ВВ при различных видах воздействий (механические, электрические, климатические и др.) важно как для разработки конструкций с ВВ, так и для оценки последствий аварийных ситуаций [1, 2]. Отдельным направлением является изучение низкоскоростного (до  $\approx 100$  м/с) механического воздействия на ВВ, отвечающего аварийным нагрузкам при хранении, перевозке, теракте и т.п. с инициированием взрывчатого превращения (ВП). Среди известных способов наиболее широко и давно применяемым является стандартный способ определения чувствительности ВВ к удару, осуществляемый на вертикальном копре [2]. Помимо этого, например, во ВНИИЭФ исследуют воздействие на ВВ сферических осколков или стального штыря при скоростях  $\sim 6-60$  м/с [3]. Изучают низкоскоростное воздействие на ВВ стального ударника по методу «теста Стивена» на ударных стендах типа «Ствол», применяя в опытах радиоинтерферометр и ПВДФ-датчики давления [4]. Для изучения инициирования ВП используют рентгенографию и протонографию [5]. Исследования механических воздействий на ВВ с применением, например, тестов Стивена, Сьюзан и других методов проводятся и за рубежом.

В работе [1] проведены исследования динамического сжатия пластифицированного ТЭНа методом ССГ при скоростях деформации  $\dot{\epsilon}=7500-12000$  с<sup>-1</sup> ( $V=15-32$  м/с). В пяти опытах при  $\dot{\epsilon}=10000\div 12000$  с<sup>-1</sup> происходило деформирование образцов, их частичное разрушение с загоранием частиц ВВ, переходящим в ВП. В двух опытах при  $\dot{\epsilon}\leq 9000$  с<sup>-1</sup> происходило деформирование образца, его разрушение с загоранием отдельных частиц ВВ, не переходящим в ВП [1]. На рисунке 1 приведены фото скоростной видеосъемки начальной (слева) и завершающей (справа) стадий ВП, скорость съемки  $4,0 \cdot 10^4$  кадров/сек. Загорание частиц ВВ происходило от разогрева за счёт контактного трения ВВ и торцов стержней, а также за счет диссипации энергии пластического деформирования ВВ.

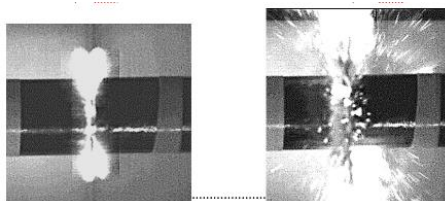


Рис. 1. Фотографии стадий процесса инициирования ВП в пластифицированном ТЭНе

Выявлено, что в опытах, энергия на деформирование образцов выше  $21,2$  Дж ( $A/V=135,0$  Дж/см<sup>3</sup>) приводит к возбуждению ВП пластифицированного ТЭНа. Энергии ниже  $19,1$  Дж ( $A/V=121,7$  Дж/см<sup>3</sup>) для этого недостаточно [1]. Полученные в экспериментах результаты будут полезны и послужат опорными данными при разработке моделей ВП в ВВ при низкоинтенсивных механических воздействиях.

### Список литературы

1. В.А. Пушков, А.Л. Михайлов, А.Н. Цибиков и др. Изучение характеристик взрывчатых веществ при динамическом нагружении с использованием метода составного стержня Гопкинсона // Физика горения и взрыва. – 2021. – Т. 57, N1. – С. 120-129.
2. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом // М.: Наука. – 1968.
3. Белов Г.В., Базаров Ю.Б., Екимчев С.Н., Жиёмбетов А.К. и др. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ. // Труды XV Харитоновских Чтений, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров. – 2013. – С. 111–118.
4. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов. // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47. – N 6. – С. 29-41.
5. Бурцев С.В., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А.. Исследование иницирования детонации в ТАТБ методом протонной радиографии. // Труды XV Харитоновских Чтений, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров. – 2013. – С. 74–81.

Т.О. СКЛЯДНЕВА, А. НЕМЫГИН, Ю.В. БАТЬКОВ, А.М. ПОДУРЕЦ, В.Г. СИМАКОВ,  
А. ТЕРЕШКИНА, М.И. ТКАЧЕНКО, И.Р. ТРУНИН, Е.Е. ШЕСТАКОВ  
*Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского  
ядерного университета МИФИ, Саров, Россия*

## **ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

Доклад посвящен определению динамических прочностных характеристик образцов на основе порошка из стали 12Х18Н10Т, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления (СЛП) и сравнение их со свойствами стали, полученной по традиционной технологии горячекатаного проката, при ударном нагружении со скоростями до 450 м/с.

T.O. SKLYADNEVA, A. NEMGIN, U.V. BAT'KOV,, A.M. PODURETS, V.G. SIMAKOV,  
I.A. TERESHKINA, M.I. TKACHENKO, I.R. TRUNIN, E.E. SHESTAKOV  
*Sarov Physical & Technical Institute - National Research Nuclear University MEPhI  
(Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia*

## **SPALL FRACTURE OF SPECIMENS OF STEEL 12CR18NI10TI MANUFACTURED USING SELECTIVE LASER MELTING**

Currently, the technological process of constructing three-dimensional parts by the method of selective laser melting (laser melting of metal powders) is being intensively developed. At the same time, parts manufactured in this way must not only exactly match the geometric dimensions, but also meet the requirements for mechanical static and dynamic properties imposed on parts in the operating load range.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП) является методом аддитивного производства (выборочное послойное наращивание материала) сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD- моделям. Такая технология позволяет проводить построение сложных многоэлементных неразборных изделий с внутренними полостями и каналами с высокой точностью и повторяемостью, без использования дорогостоящей оснастки и т.п. Она дает возможность изготавливать детали, превосходящие по физико-механическим свойствам продукты стандартных технологий.

Актуальным остается вопрос о свойствах новых материалов и их применении для изготовления деталей и конструкций с заданными физико-механическими свойствами, используемых в авиационной, нефтегазовой и химической промышленности, машиностроении, энергетике, строительстве, медицине и т.д. Знание этих свойств позволит прогнозировать работу конструкций в условиях как статического и динамического, так и ударно-волнового нагружения. Особенно хотелось бы выделить область ударно-волновых нагрузок, поскольку в этой области результаты ограничены единичными экспериментами на небольшом количестве СЛП материалов. К этим свойствам относятся ударная сжимаемость (изменение плотности вещества и температуры с ростом давления), сдвиговая и откольная прочность. Все эти характеристики, кроме использования их при конструировании деталей, пополняют базу данных по свойствам материалов, а также составляют основу для построения численных моделей поведения веществ, применение которых в расчетах прогнозирует работу изделий, работающих в условиях высокоскоростных динамических нагрузок.

Целью настоящей работы было получение данных о прочностных свойствах стали 12Х18Н10Т, изготовленной по технологии СЛП с дополнительной обработкой отжигом и методом ГИП. Так же в рамках данной работы было проведено сравнение свойств СЛП сталей со сталью 12Х18Н10Т, изготовленной традиционным способом - горячекатаным прокатом.

С.И. СУМСКОЙ, Р.ХАБИБ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЕГО С ВЕЩЕСТВОМ

В работе рассматриваются сопряженные задачи возникновения излучения от высокотемпературных сред, его распространение в окружающей среде и взаимодействие (нагрев) сред при попадании излучения на них.

S.I. SUMSKOI, R.KHABIB

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## TRANSFER OF RADIATION AND ITS INTERACTION WITH SUBSTANCE

The paper considers conjugate problems of the appearance of radiation from high-temperature media, its propagation in the environment, and the interaction (heating) of media when radiation hits them.

При горении и взрыве возникает высокая температура, в частности это может иметь место при аварийных ситуациях, сопровождающихся выходом опасного продукта в окружающую среду с последующим реагированием [1-10]. При этом часть энергии переходит в излучение в широком спектре частот. Излучение проходит через среду, способную рассеивать, излучать и поглощать излучение, причём в узком спектре. В данной работе рассчитывается поток энергии, которая приходит на объект воздействия от источника. Используются две модели: излучающая поверхность и излучающий объём.

В первом случае считается, что излучение происходит только с поверхности тела. Вся задача сводится к геометрическим расчётам теплового потока на площадку-реципиент от сторонних тел. Эта модель хорошо применима для металлов.

Во втором случае считается, что излучение происходит со всех слоев среды. При заданных температурах, коэффициентах поглощения и излучения можно посчитать тепловой поток на площадку – реципиент. Однако температура так же зависит от излучения, что усложняет задачу. Для её решения предполагается совместное решение уравнений газодинамики: закон сохранения массы, импульса, энергии и уравнение лучистого переноса.

Для оценки воздействия на среду решается уравнение теплопроводности с заданием в качестве граничных условий интенсивности потока, рассчитанного при решении задачи о распространении излучения.

### *Список литературы*

1. Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 3. С. 583.
2. Сумской С.И., Пчельников А.В., Шанина Е.Л., Лисанов М.В., Зозуля В.В. // Безопасность труда в промышленности. 2007. № 2. С. 48.
3. Дадонов Ю.А., Лисанов М.В., Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Сидоров В.И., Дегтярев Д.В., Сумской С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 6. С. 2.
4. Лисанов М.В., Гражданкин А.И., Пчельников А.В., Савина А.В., Сумской С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 1. С. 34.
5. Пчельников А.В., Гражданкин А.И., Кручинина И.А., Сумской С.И., Дадонов Ю.А., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 6. С. 33.
6. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. // В сб.: Physics Procedia. 2015. С. 347.
7. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 751. № 1. С. 012022.
8. Sumskoi S.I., Sofin A.S., Lisanov M.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 751. № 1. С. 012025.
9. Сумской С.И., Агапов А.А., Софьин А.С., Свечков А.М., Егоров А.Ф. // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. С. 50.
10. Сумской С.И., Пчельников А.В., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 2. С. 48.

В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ**

Существует широкий класс задач моделирования газодинамики реагирующих течений. Для описания течения газа используются газодинамические численные методы. Для описания реагирующего течения дополнительно решаются уравнения химической кинетики. Кинетические механизмы проверяются с использованием максимально точных численных методов. При решении практических задач используются более грубые численные методы. Это приводит к падению точности прогнозирования. В данной работе показано, что модификация входных параметров — коэффициентов переноса или констант химических реакций по заранее рассчитанному значению скорости ламинарного горения, позволяет моделировать распространение ламинарного пламени в практически значимых задачах с грубым разбиением по пространству.

V.A. SMETANYUK, S.M. FROLOV

*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **MODELING OF LAMINAR FLAME FRONT PROPAGATION USING GLOBAL KINETIC MECHANISMS**

There is a wide class of problems for modeling the gas dynamics of reacting flows. Gas-dynamic numerical methods are used to describe the gas flow. To describe the reacting flow, the equations of chemical kinetics are additionally solved. Kinetic mechanisms are tested using the most accurate numerical methods. When solving practical problems, more coarse numerical methods are used. This leads to a drop in prediction accuracy. In this paper, it is shown that modification of the input parameters — transfer coefficients or constants of chemical reactions according to the gorenje calculated value of the laminar combustion rate, allows modeling the propagation of laminar flame in practically significant problems with rough partitioning in space.

Существует широкий класс задач моделирования газодинамики реагирующих течений. Для описания течения газа используются газодинамические численные методы. В рамках данного подхода пространство разбивается на контрольные объемы, для которых решается система газодинамических уравнений. Скорости реакций вычисляются на основе параметров кинетических уравнений. Набор кинетических уравнений и их параметры составляют кинетический механизм [1]. Перед использованием в практических задачах о распространении фронта горения кинетические механизмы проходят проверку и сравнение с экспериментальными данными по нормальным скоростям горения. Для проверки используются стационарные задачи в одномерной постановке. Методы разбиения по пространству обеспечивают разрешение градиентов концентраций и температуры. Решения, полученные с использованием максимально точных численных методов, демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными. При решении задач прикладного характера таких, как горение топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя внутреннего сгорания или распространение фронта горения в помещении используют менее точные математические методы и более грубое пространственное разрешение. Это приводит к падению точности прогнозирования [2]. Результаты многомерного моделирования распространения ламинарного фронта пламени с использованием кинетических механизмов расходятся с точными расчетами. Данная проблема связана с тем, что более грубое разбиение по пространству не позволяет разрешить градиенты концентраций и температуры, реализуемые во фронте пламени. Градиенты величин определяют скорость переноса реагентов и энтальпии. Прямого решения данной проблемы не существует. Для использования в прикладных задачах можно использовать табулирование известных значений ламинарной скорости распространения фронта пламени. На основе известных значений ламинарной скорости горения [2] можно модифицировать входные параметры задачи так, чтобы решение задачи распространения ламинарного фронта горения давало результат, согласующийся с экспериментальными значениями. Такими входными параметрами задачи являются коэффициенты переноса или константы скоростей реакций. В данной работе представлены результаты моделирования распространения фронта ламинарного пламени. Используются два предложенных подхода: модификация коэффициентов переноса и модификация скоростей реакций. Показано, что модификация входных параметров по заранее рассчитанному значению скорости ламинарного горения [2], позволяет моделировать распространение ламинарного пламени в практически значимых задачах с грубым разбиением по пространству.

### *Список литературы*

1. Басевич В.Я., Беляев А.А., Медведев С.Н., Посвянский В.С., Фролов С.М. Кинетические детальный и глобальный механизмы для суррогатного топлива. // Горение и взрыв, 2015, Т. 8, № 1, с. 21-28
2. Senecal P.K., Pomraning E., Richards K., Som, S. Grid-Convergent Spray Models for Internal Combustion Engine Computational Fluid Dynamics Simulations. // Journal of Energy Resources Technology-transactions of The Asme, 2014, 136, 012204.
3. Беляев А.А., Басевич В.Я., Фролов С.М. База данных для расчета ламинарного и турбулентного горения воздушных смесей авиационного керосина. // Горение и взрыв, 2015, Т. 8, № 1, с. 29-36

А.М. ТЕРЕЗА<sup>1</sup>, Г.Л. АГАФОНОВ<sup>1</sup>, Э.К. АНДЕРЖАНОВ<sup>1</sup>, А.С. БЕТЕВ<sup>1</sup>,  
С.П. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, С.В. ХОМИК<sup>1</sup>, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА<sup>1</sup>, А.С. БОДНАРЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## АНАЛИЗ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА, ПОЛИЭТИЛЕНА И АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Посредством численного моделирования проведен сравнительный анализ детонационной способности газообразных продуктов пиролиза (ГПП) полипропилена, полиэтилена и автомобильных шин. Установлено, что задержки воспламенения  $\tau$  стехиометрических смесей всех трех видов ГПП с кислородом короче, чем значение  $\tau$  для стехиометрической пропано-кислородной смеси с  $\phi = 1$ . В тоже время нормальная скорость горения  $S_L$  для смеси  $C_3H_8/O_2$  ниже, чем  $S_L$  для всех трех видов ГПП. Этот факт позволяет моделировать переход от дефлаграции к детонации сложных смесей ГПП отходов химической промышленности, заменяя их на пропан. Проведенные эксперименты подтвердили численные расчеты.

A.M. TEREZA<sup>1</sup>, G.L. AGAFONOV<sup>1</sup>, E.K. ANDERZHANOV<sup>1</sup>, A.S. BETEV<sup>1</sup>, S.P. MEDVEDEV<sup>1</sup>, S.V. KHOMIK<sup>1</sup>, T.T. CHEREPANOVA<sup>1</sup>, A.S. BODNAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ANALYSIS OF THE DETONATION SENSITIVITY OF GASEOUS PYROLYSIS PRODUCTS OF POLYPROPYLENE, POLYETHYLENE, AND AUTOMOTIVE TIRES

Numerical simulations are performed to evaluate the relative detonation sensitivity for the gaseous pyrolysis products (GPP) of polypropylene, polyethylene and automotive tires. It is found that the ignition delay  $\tau$  for stoichiometric mixtures of all three types of GPP with oxygen is shorter than the value of  $\tau$  for a stoichiometric propane–oxygen mixture, whereas the laminar burning velocity  $S_L$  for the  $C_3H_8/O_2$  mixture is lower than the values of  $S_L$  for the GPP of all three types. This finding makes it possible to simulate deflagration-to-detonation transition of complex mixtures of the GPP of chemical industry wastes by replacing them with propane. The numerical results are confirmed by experimental data.

Одним из направлений рациональной утилизации многокомпонентных газообразных продуктов пиролиза (ГПП) химических и бытовых отходов является их детонационное сжигание [1]. Основные сложности при конструировании соответствующих технологических установок связаны с проблемой перехода от дефлаграционного горения к детонации. В первую очередь это обусловлено многокомпонентностью состава ГПП, что усложняет исследование и оптимизацию режимов детонационного горения.

Посредством численного моделирования проведен сравнительный анализ задержек воспламенения  $\tau$  и нормальных скоростей горения  $S_L$  для ГПП полипропилена (ПП), полиэтилена (ПЭ) и автомобильных шин (АШ) в стехиометрических смесях с кислородом. Начальные концентрации ГПП взяты из [2, 3]. Для расчетов использован программный модуль CHEMKIN-Pro [4]. Диапазон  $T_0$  составил от 1000 до 2000 К при расчетах  $\tau$ . Использовались различные представленные в литературе детальные кинетические механизмы (ДКМ), позволяющие проводить расчеты с углеводородами C0–C12. В качестве модельного топлива был выбран пропан. Установлено, что значения  $\tau$  для смесей ГПП ПП, ПЭ и АШ с кислородом меньше чем величина  $\tau$  для смеси  $C_3H_8/O_2$ . В тоже время расчеты  $S_L$  для соответствующих смесей при нормальных начальных условиях показали, что нормальная скорость горения для смеси  $C_3H_8/O_2$  значительно ниже, чем для смесей ГПП ПП, ПЭ и АШ с кислородом при  $\phi = 1$ . Полученные результаты расчетов  $\tau$  и  $S_L$  позволяют проводить НИОКР по созданию установки детонационного сжигания, используя модельные смеси пропан–воздух, что значительно упрощает процедуры отладки и подбор рабочих параметров соответствующих макетов и демонстрационных стендов.

Проведенные экспериментальные исследования на пилотной установке подтвердили результаты расчетов. Показано, что переход горения в детонацию для смесей ГПП ПП, ПЭ и АШ с воздухом при  $\phi = 1$  проходит быстрее, чем для пропано-воздушной смеси.

### Список литературы

1. Frolov S.M. // Fuels. 2021. V. 2. P. 556.
2. Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Медведев С.П., Мохин Г.Н. // Горение и взрыв. 2020. Т. 13, №3. С. 50
3. Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э. К., Медведев С.П. // Химич. физика. 2021. Т. 40, № 8. С. 56
4. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, CK-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.

К. А. БЫРДИН<sup>1</sup>, С. М. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, П. А. СТОРОЖЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений», Москва, Россия

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ AL- И B-СОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОЗДУХЕ, УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ И ВОДЯНОМ ПАРЕ

В данной работе представлены результаты расчета параметров детонации алюминий- и бор-содержащих соединений (Al, AlH<sub>3</sub>, Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Al(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>, B, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, B<sub>5</sub>H<sub>9</sub>, B<sub>10</sub>H<sub>14</sub>) в воздухе, углекислом газе и водяном паре.

K.A. BYRDIN, S.M. FROLOV, P.A. STOROZHENKO

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>State Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds, Moscow, Russia

## THERMODYNAMIC CALCULATION OF THE DETONATION PARAMETERS OF AL- AND B-CONTAINING COMPOUNDS IN AIR, CARBON DIOXIDE, AND WATER VAPOR

This paper presents the results of calculating the detonation parameters of aluminum- and boron-containing compounds (Al, AlH<sub>3</sub>, Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Al(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>, B, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, B<sub>5</sub>H<sub>9</sub>, B<sub>10</sub>H<sub>14</sub>) in air, carbon dioxide, and water vapor.

Детонационную способность смесей различного состава можно оценить по скорости идеальной детонации ( $D_{C-J}$ ). Все рассмотренные в работе соединения алюминия и бора показывают скорость детонации не менее 1,8 км/с, причем не только для смесей с воздухом, но и для смесей с водяным паром и углекислым газом. Это демонстрирует потенциальную возможность применения рассмотренных соединений в качестве топлива для систем реактивного движения с детонационными двигателями.

Для проверки расчетной методики было проведено сравнение параметров детонации с известными экспериментальными данными по детонации Al, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>3</sub> в воздухе. Полученные значения  $D_{C-J}$  удовлетворительно согласуются с опытными значениями скорости.

И. О. ШАМШИН<sup>1</sup>, В. С. ИВАНОВ<sup>1</sup>, В. С. АКСЁНОВ<sup>2</sup>, П. А. ГУСЕВ<sup>1</sup>, С. М. ФРОЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО РАСШИРЕНИЯ НА ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В УЗКИХ ЩЕЛЕВЫХ ЗАЗОРАХ

Исследован переход горения в детонацию (ПГД) в полуограниченной плоской щелевой камере сгорания шириной 5 мм заполненной смесью  $C_2H_4+3(O_2+\beta N_2)$  при изменении  $\beta$  от 0 до 2/3 и при нормальных условиях. Определены предельные толщины слоёв смеси при разбавлении азотом, а также измерены значения преддетонационных расстояний и времени. Разбавление смеси азотом при толщине слоя больше предельного приводит к увеличению расстояния ПГД пропорционально снижению реакционной способности смеси (пропорционально увеличению размера детонационной ячейки  $\lambda$ ), а с уменьшением высоты слоя расстояние ПГД увеличивается. Предельная высота слоя составляет  $\sim 100\lambda$  при  $\beta < 1/4$  и линейно увеличивается при  $\beta > 1/4$ .

I. O. SHAMSHIN<sup>1</sup>, V. S. IVANOV<sup>1</sup>, V. S. AKSENOV<sup>2</sup>, P. A. GUSEV<sup>1</sup>, S. M. FROLOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INFLUENCE OF LATERAL EXPANSION ON THE DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN NARROW GAPS

Deflagration-to-detonation transition (DDT) in a  $C_2H_4+3(O_2+\beta N_2)$  mixture filling a semi-confined flat slit combustion chamber 5 mm wide under normal conditions was studied experimentally with  $\beta$  varied from 0 to 2/3. The limiting thicknesses of the layers of the mixture when diluted with nitrogen were determined, and the DDT run-up distances and time were measured. Dilution of the mixture with nitrogen at a layer thickness greater than the limiting value leads to an increase in the DDT run-up distance in proportion to the decrease in the mixture reactivity (proportionally to an increase in the detonation cell size  $\lambda$ ), while with a decrease in the layer height, the DDT run-up distance increases. The limiting layer height is about  $100\lambda$  at  $\beta < 1/4$  and increases linearly at  $\beta > 1/4$ .

В полуограниченной плоской щелевой камере сгорания (Рис. 1а), имитирующей кольцевую камеру сгорания непрерывно-детонационного двигателя, исследован ПГД при искровом зажигании смеси  $C_2H_4+3(O_2+\beta N_2)$  при нормальных условиях. Схема установки и порядок проведения экспериментов описаны в работе [1]. Заполнение щелевого зазора слоем горючей смеси высотой  $h_{est} > h_{min}$  обеспечивает ПГД, а слой меньшей высоты сгорает в дефлаграционном режиме. Разбавление  $O_2$  азотом приводит к увеличению критической высоты слоя вместе с увеличением размера детонационной ячейки  $\lambda$ , так что отношение  $h_{est}/\lambda$  остаётся постоянным до  $\beta < 1/4$  ( $N_2 < 20\%$ ), а при  $\beta > 1/4$  увеличивается линейно (Рис. 1б). В слое предельной высоты ПГД происходит у дальнего торца щелевого зазора ( $X_{DDT} \sim 800$  мм), а в более толстых слоях боковое расширение заряда не оказывает существенного влияния на расстояние и время ПГД и  $X_{DDT}$  увеличивается пропорционально  $\lambda$ , а отношение  $X_{DDT}/\lambda \sim 200$  постоянно (Рис. 1в, размер символов пропорционален  $h_{est}$ ).

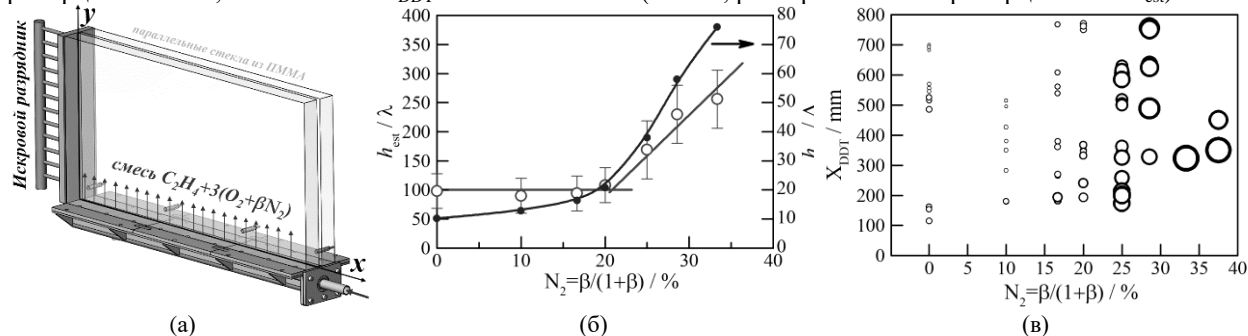


Рисунок 1 – Геометрия щелевой камеры сгорания высотой  $H=400$  мм, длиной  $L=800$  мм и шириной  $\Delta=5$  мм (а) и изменение предельной толщины слоя (б) и расстояния ПГД (в) с увеличением доли азота в окислителе.

Для полуограниченного слоя взрывчатой смеси  $C_2H_4+3(O_2+\beta N_2)$  предельная высота слоя для ПГД  $h_{DDT} \sim (100 \pm 30)\lambda$ ,  $0 \leq \beta < 1/4$ , существенно превосходит критическую высоту слоя газовой взрывчатой смеси при распространении самоподдерживающейся детонации  $h_{det} = (12 \pm 5)\lambda$  [2].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (гос. контракт № 13.1902.21.0014, соглашение № 075-15-2020-806).

### Список литературы

1. Shamshein, I.O.; Ivanov, V.S.; Aksenov, V.S.; Gusev, P.A.; Frolov, S.M. Deflagration-to-Detonation Transition in a Semi-Confined Slit Combustor Filled with Nitrogen Diluted Ethylene-Oxygen Mixture. *Energies* 2023, 16, 1098. <https://doi.org/10.3390/en16031098>.
2. Reynaud M., Virot F., Chinnayya A. A computational study of the interaction of gaseous detonations with a compressible layer, *Physics of Fluids* 29, 056101 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4982659>.



## ИОНИЗАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Представлены конструкции и функциональные схемы ионизационных датчиков для регистрации распространения фронтов реакции и длительности тепловыделения путём измерения ионного тока в реагирующей среде. Рассмотрены электрические схемы ионизационных датчиков с малым временем отклика и высокой чувствительностью применительно к реакционноспособным средам с изменяющимися полями температуры и давления. Основными преимуществами ионизационных датчиков являются очень короткое время отклика (<1 мкс), универсальность, возможность регистрации фронтов реакции непосредственно в камерах сгорания. В качестве примеров применения ионизационных датчиков представлены диагностика перехода горения в детонацию в импульсно-детонационных двигателях и развитой детонации в непрерывно-детонационных двигателях.

I. O. SHAMSHIN<sup>1</sup>, V. S. AKSENOV<sup>2</sup>, V. S. IVANOV<sup>1</sup>, S. M. FROLOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## ION SENSORS FOR PULSED AND CONTINUOUS DETONATION DIAGNOSTICS

The design and operation principles of ion sensors intended for detecting the propagating reaction fronts and duration of heat release by measuring the ion current in the reactive medium are presented. The electrical circuits for ion sensors with short response time and high sensitivity in the reactive media with highly variable temperature and pressure are discussed. The main advantages of ion sensors are their very short response time of about 1  $\mu$ s, versatility of design, and capability of monitoring reaction fronts directly in combustion chambers. Several examples of ion sensor applications in diagnostics of deflagration-to-detonation transition in pulsed detonation engines and developed detonations in rotating detonation engines are presented and discussed.

Горение газов и аэрозолей, как правило, сопровождается генерацией положительных и отрицательных ионов и свободных электронов за счёт химической и термической ионизации. Химическая ионизация – это образование ионов и свободных электронов в реакциях с участием электронно-возбуждённых атомов, радикалов и молекул в газовой фазе. На основе явления химической ионизации могут быть разработаны датчики для диагностики процессов горения и детонации [1]. Развивающееся направление детонационных двигателей нуждается в надёжных в эксплуатации датчиках для систем управления. В условиях химически агрессивного высокотемпературного скоростного течения применение обычных датчиков зачастую невозможно или требует дополнительных дорогостоящих мер по их адаптации. Напротив, ионизационные датчики легко интегрируются в электронные устройства, следящие за рабочим процессом в детонационных установках. В настоящей работе приводятся примеры конструкции ионизационных датчиков и обсуждаются аспекты их использования применительно к диагностике импульсных и непрерывных детонационных процессов по опыту лаборатории детонации ФИЦ ХФ РАН. На рисунке 1 в качестве демонстрации показаны примеры диагностики режимов детонации и дефлаграции по форме сигнала и вычисления скорости распространения фронта реакции в импульсно-детонационных установках (Рис.1а), а также примеры функциональной взаимосвязи между проводимостью и рабочими параметрами (состав, давление) газа в непрерывно-детонационных камерах сгорания (Рис.1б). Размещение ионизационных датчиков в камерах сгорания обеспечивает надёжный контроль скорости и режима горения (дефлаграция или детонация). Ионизационные датчики прошли многолетнюю апробацию и способны обеспечить надёжный контроль за процессом горения в импульсно-детонационных и непрерывно-детонационных камерах сгорания.

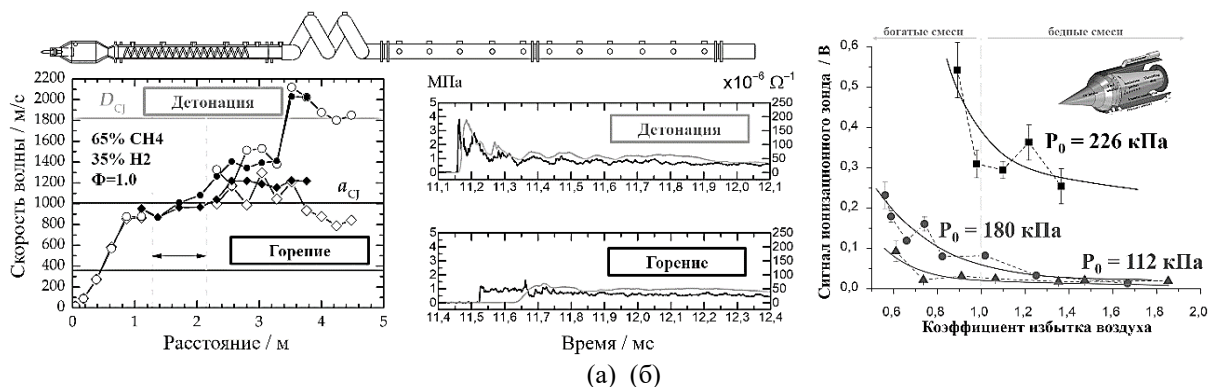


Рисунок 1 – Диагностика рабочих характеристик импульсных (а) и непрерывных (б) детонационных камер сгорания.

Список литературы

1. Frolov, S.M.; Shamshin, I.O.; Aksenov, V.S.; Ivanov, V.S.; Vlasov, P.A. Ion Sensors for Pulsed and Continuous Detonation Combustors. *Chemosensors* 2023, 11, 33. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11010033>.

И. О. ШАМШИН<sup>1</sup>, М. В. КАЗАЧЕНКО<sup>1</sup>, В. С. АКСЁНОВ<sup>2</sup>, П. А. ГУСЕВ<sup>1</sup>, С. М. ФРОЛОВ<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ ДЛЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СПИРАЛЕВИДНЫХ ТРУБАХ ОКОЛОПРЕДЕЛЬНОГО ДИАМЕТРА

Эксперименты по переходу горения в детонацию (ПГД) в спиралевидных трубах продемонстрировали возможность существенного сокращения расстояния ПГД и расширения концентрационных пределов распространения детонации в топливно-воздушных смесях (ТВС) в трубах околопредельного диаметра. Для критической скорости пламени на входе в витки получены значения 410 и 520 м/с для ТВС на основе горючего  $0.4\text{C}_2\text{H}_4+0.6\text{H}_2$  и  $0.4\text{CH}_4+0.6\text{H}_2$ , соответственно.

I. O. SHAMSHIN<sup>1</sup>, M. V. KAZACHENKO<sup>1</sup>, V. S. AKSENOV<sup>2</sup>, P. A. GUSEV<sup>1</sup>, S. M. FROLOV<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CRITICAL FLAME VELOCITIES FOR DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN HELICAL TUBES OF NEAR LIMIT DIAMETER

Experiments on deflagration-to-detonation transition (DDT) in helical tubes demonstrated the possibility of a significant reduction in the DDT run-up distance and widening of the concentration limits of detonation propagation in fuel-air mixtures (FAM) in tubes of near-limiting diameter. For the critical flame velocity at the entrance to the coils, the values of 410 and 520 m/s were obtained for FAMs based on blended  $0.4\text{C}_2\text{H}_4+0.6\text{H}_2$  and  $0.4\text{CH}_4+0.6\text{H}_2$  fuels, respectively.

Установив в гладкой трубе спираль Щёлкина, легко получить ускорение пламени до  $\sim 800$  м/с, а добавив к такой трубе виток – добиться быстрого ПГД за счёт газодинамической «фокусировки» отражённой ударной волны (УВ). С точки зрения обеспечения взрывобезопасности представляется важным установить минимальные скорости пламени, при которых в спиралевидных трубах возможен быстрый ПГД. Существенную роль играет кривизна поверхности витка: в витках предельной кривизны для ПГД требуются УВ меньшей интенсивности. Эксперименты на эталонной трубе с двумя витками (радиус поворота  $1,5D$ ) [1,2] указывают на то, что важную роль в ускорении пламени в витках может играть не только возникновение горячих точек при отражении УВ, но и формирование турбулентного пограничного слоя. Чтобы в этом убедиться, необходимо провести эксперименты по распространению пламени и ПГД в спиралевидных трубах. Заменяв секцию в экспериментальной установке [1,2] на винтовую трубу из 10-ти витков (радиус поворота  $1,5D$ ), нам удалось существенно расширить пределы ПГД по составам смесей, а также существенно сократить расстояния ПГД. При этом в спиралевидной трубе наблюдалось распространение детонации в таких смесях, для которых в гладкой трубе наблюдался процесс распада детонации. В спиралевидной трубе минимальная скорость фронта пламени, при которой наблюдалось ускорение горения и ПГД, равна  $(800\pm 50)$  м/с, т.е. при числах Маха УВ  $M=2,2-2,4$  ( $T\sim 600..650$  К). На бедном пределе ПГД наблюдался, если скорость пламени на входе в виток превышала 520 м/с (ТВС при  $\phi=0.56$  для бинарного горючего  $0.4\text{CH}_4+0.6\text{H}_2$ , Рис.1б) или даже 410 м/с (ТВС при  $\phi=0.5$  для бинарного горючего  $0.4\text{C}_2\text{H}_4+0.6\text{H}_2$ , Рис.1в). Таким образом, при распространении пламени в спиралевидных трубах вероятность возникновения детонации выше, чем в прямых трубах, что важно учитывать при решении задач взрывобезопасности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (гос. контракт № 13.1902.21.0014, соглашение № 075-15-2020-806).

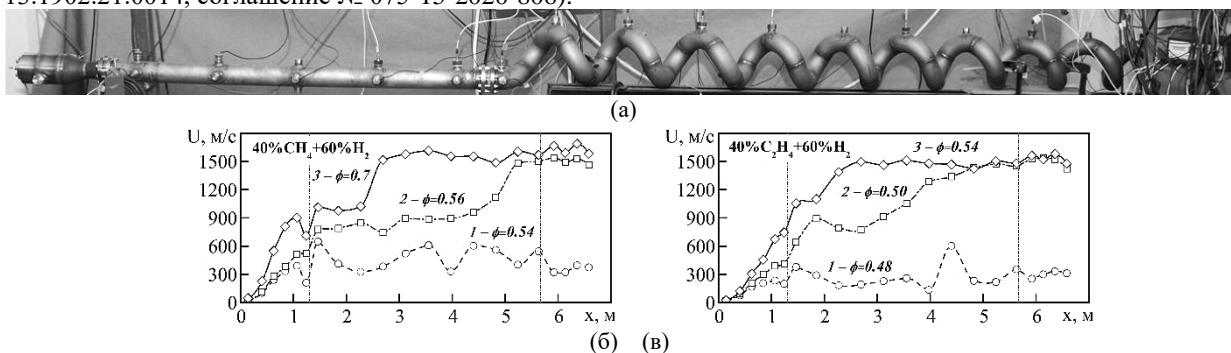


Рисунок 1 – Фотография экспериментальной установки со спиралевидной трубой из 10 полных витков (а) и графики средней скорости фронта реакции в зависимости от расстояния для бинарных горючих  $0.4\text{CH}_4+0.6\text{H}_2$  (б) и  $0.4\text{C}_2\text{H}_4+0.6\text{H}_2$  (в) и составов 1 – горение без ПГД, 2 – ускорение и ПГД, 3 – ускорение и быстрый ПГД.

### Список литературы

1. Шамшин И. О., Казаченко М. В., Фролов С. М., Басевич В. Я. Переход горения в детонацию в воздушных смесях метановодородного горючего. // Горение и взрыв, 2020, т. 13, №3, с. 60-75. DOI: 10.30826/CE20130306.
2. Шамшин И.О., Казаченко М.В., Фролов С.М., Басевич В.Я. Переход горения в детонацию в воздушных смесях этиленоводородного горючего. // Горение и взрыв, 2021, т. 14, № 2, с. 26 – 39. DOI: 10.30826/CE21140203.

А.С. СИЛАНТЬЕВ, И.А. САДЫКОВ, В.А. СМЕТАНЮК, Ф.С. ФРОЛОВ, С.М. ФРОЛОВ, Я.К. ХАСЯК, А.Б. ВОРОБЬЁВ, А.В. ИНОЗЕМЦЕВ, Я.О. ИНОЗЕМЦЕВ  
*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

## ВЛИЯНИЕ РАСХОДА УЛЬТРАПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ПАРОВУЮ ГАЗИФИКАЦИЮ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Продолжено развитие технологии газификации органических отходов ультраперегретыми водяным паром и диоксидом углерода, полученными в импульсно-детонационной пушке (ИДП) в виде продуктов детонации смеси природного газа с кислородом. Рассмотрено влияние объема ИДП и времени пребывания отходов (отработанное машинное масло) в реакторе-газификаторе и в ИДП на состав получаемого синтез-газа и экономичность процесса газификации.

A.S. SILANTIEV, I.A. SADYKOV, V.A. SMETANYUK, F.S. FROLOV, S.M. FROLOV, J.K. HASIAK, A.B. VOROB'EV, A.V. INOZEMTSEV, J. O. INOZEMTSEV  
*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## EFFECT OF ULTRA-SUPERHEATED STEAM FLOW RATE ON STEAM GASIFICATION OF ORGANIC WASTE

The work continues the development of the technology of organic waste gasification with ultra-superheated steam and carbon dioxide obtained in a pulsed detonation gun (PDG) as the detonation products of natural gas – oxygen mixture. The influence of the volume of the PDG and the residence time of waste (waste machine oil) in the gasifier and in the PDG on the composition of the product syngas and the efficiency of the gasification process is considered.

В [1–4] технологию ИДП впервые применили для автотермической высокотемпературной конверсии природного газа и аллотермической бескислородной газификации жидких/твердых органических отходов при атмосферном давлении с использованием ИДП объемом ~ 15 дм<sup>3</sup>, работающей с частотой 1 Гц, и проточных реакторов объемом 100 и 40 дм<sup>3</sup>. Концентрации Н<sub>2</sub>, СО и СО<sub>2</sub> в синтез-газе, полученном конверсией природного газа и газификацией жидких/твердых органических отходов, практически не зависели от исходного сырья и объема проточного реактора, что объясняется высокими значениями локальной мгновенной температуры в реакторе (выше 2000 °С). В данной работе аналогичные исследования проведены на конвертере отходов с проточным реактором объемом 40 дм<sup>3</sup> и двумя ИДП суммарным объемом 2,4 и 3,2 дм<sup>3</sup>, что приблизительно в 6 и в 4,5 раз меньше, чем в предыдущих исследованиях. Основная цель исследований состояла в поиске таких конструктивных и режимных параметров установки, при которых продукты газификации содержали бы минимальное количество СО<sub>2</sub> при работе установки с частотой 1 Гц. В качестве отходов использовалось отработанное машинное масло. Показано, что по сравнению с экспериментами, проведенными ранее при более высокой средней температуре стенки реактора-газификатора и при использовании ИДП значительно большего объема, содержание Н<sub>2</sub>, СО, СН<sub>4</sub> и СО<sub>2</sub> в синтез-газе практически не изменилось, однако экономичность процесса газификации существенно повысилась: с помощью 1 г природного газа удалось полностью газифицировать до 4 г сырья. Это объясняется тем, что величина температуры газификации (максимальной температуры продуктов детонации смеси природный газ–кислород после расширения до ~ 1 атм) в экспериментах на новом конвертере отходов сохранилась на том же уровне (выше 2000 °С). Также показано, что определяющую роль в процессе газификации жидкого сырья играет время, в течение которого сырье пребывает в ИДП, а не в самом реакторе-газификаторе. Это объясняется тем, что температура ультра-перегретого пара (УПП) в бегущей детонационной волне значительно выше, чем после расширения в реакторе-газификаторе, и реакции газификации микрокапель сырья протекают в ИДП значительно быстрее. В работе также определены минимальное отношение между расходами УПП и жидкого органического сырья, минимальное отношение между расходами природного газа и жидкого органического сырья и степень использования УПП в процессе газификации жидкого сырья.

### Список литературы

1. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Аксёнов В. С., Шамшин И. О., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Автотермическая конверсия природного газа и аллотермическая газификация жидких и твердых органических отходов ультраперегретым водяным паром. // Горение и взрыв, 2022, т.15, №2, с. 75–8
2. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Шамшин И. О., Аксёнов В. С., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Влияние объема реактора на автотермическую конверсию природного газа и аллотермическую газификацию органических отходов ультраперегретым паром. // Горение и взрыв, 2022, т. 15, №3, с. 71–87
3. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Shamshin I. O., Aksenov V.S., Avdeev K. A., Frolov F. S. Natural gas conversion and liquid/solid organic waste gasification by ultra-superheated steam. // Energies, 2022, Vol. 15, 3616
4. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Avdeev K. A., Frolov F. S. Natural gas conversion and organic waste gasification by detonation-born ultra-superheated steam: Effect of reactor volume. // Fuels, 2022, Vol. 3, No. 3, pp. 375-391

П.С. КУЛЕШОВ<sup>1</sup>, С.И. МИКОЛУЦКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

## МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРЕЛЬЕФА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Для оценки основных параметров нанорельефа, формирующегося на поверхности металлов при лазерной абляции, предлагаются два механизма, в основе которых лежат резонансно-волновая теория капиллярно-деформационных процессов и теория зародышеобразования при кристаллизации. С использованием экспериментальных данных показано, что такие механизмы не только не противоречат, но и дополняют друг друга. Используя оценку характерных времен, в работе анализируется влияние энергии лазерных импульсов на размеры формирующихся поверхностных структур.

P.S. KULESHOV<sup>1</sup>, S.I. MIKOLUTSKIY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute for electrophysics and electric power RAS, Saint Petersburg, Russia

## MECHANISMS OF NANORELIEF FORMATION AT LASER ABLATION

To estimate the main parameters of the nanorelief formed on the surface of metals after laser ablation, two mechanisms are proposed. They are based on the resonant-wave theory of capillary-deformation processes and the theory of nucleation during crystallization. Using experimental data, it is shown that such mechanisms do not contradict, and also complement each other. Using an estimate of the characteristic times, we analyze the effect of the laser pulse energy on the dimensions of the surface structures being formed.

Интенсивное развитие нанотехнологий, в том числе методов формирования металлических микро- и наноструктур при помощи лазерной абляции, приводит к необходимости исследования механизмов образования таких структур. В данной работе рассматриваются механизмы резонансно-деформационного возбуждения капиллярных волн на поверхности расплава металла [1] и зародышеобразования кристаллов при остывании расплава после быстрого нагрева [2] для оценки экспериментов по лазерному наноструктурированию [2, 3].

В [2] представлены эксперименты по лазерной абляции поверхности из стали и бронзы импульсно-периодическим Nd:YAG-лазером на третьей гармонике ( $\lambda = 355$  нм) с энергией в импульсе до 8 мДж и его длительности  $\tau = 10$  нс. Для нержавеющей стали были получены поверхностные структуры в виде застывшей капли диаметром около 1 мкм и поперечным масштабом образовавшегося нанорельефа на стальной подложке в виде борозд и валов в диапазоне 4-6 мкм; для бронзы – застывшие капли диаметром 0.6 мкм на ножках высотой до 1 мкм с характерным расстоянием между ними 2-3 мкм. Пространственная плотность таких структур растет от нескольких единиц до 20 на 100 мкм<sup>2</sup> поверхности при повышении плотности лазерной энергии (или флюенса  $I_t$ ) от 0.3 до 0.85 Дж/см<sup>2</sup>. При дальнейшем повышении флюенса поверхностная плотность структур начинает снижаться. В [3] приведены исследования лазерной абляции ZrO<sub>2</sub> в воздухе под действием импульсов YAG:Nd<sub>3+</sub> лазера, где показано, что диаметр фрагмента диспергации обратно пропорционален интенсивности импульса  $I$  (для  $\tau = 150$  мкс – 200 нм при  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup> и 20 нм при  $10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>), но не зависит от его длительности в диапазоне 0.1-1 мс.

Результаты расчетов масштаба наноструктур, выполненных с помощью капиллярно-волнового механизма [1], дают удовлетворительное сопоставление с экспериментами [2] при выборе диаметра ванны расплава, ограниченного лазерным пятном, в качестве линейного масштаба резонатора. Причем это не противоречит возможности образования наноструктур по механизму образования кристаллических зародышей более мелкого масштаба, так как размеры кристаллических зародышей и время их образования на несколько порядков меньше характерных размеров и времен капиллярных волн. Для застывания нанорельефа достаточно, чтобы на поверхности расплава образовалась твердая корка толщиной равной размеру зародыша кристалла. Расчеты по формулам других механизмов образования нанорельефа [4,5] хуже совпали с экспериментами [2].

В рамках капиллярно-волнового механизма с учетом иерархии характерных времен (время схлопывания газовой каверны в среде и длительность лазерного импульса) удалось объяснить эволюцию пространственных характеристик наноструктур, как для коротких лазерных импульсов около 10 нс [2], так и для длинных около 0.1 мс [3], в зависимости от их энергетических параметров. Показано, что в обоих случаях размеры наноструктур уменьшаются с возрастанием флюенса, но для длинных импульсов размеры наноструктур не зависят от  $\tau$ .

### Список литературы

1. Кулешов П.С., Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д. // Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика. 2022. №1. С. 41-51.
2. Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В. // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122. № 2. С. 159–165.
3. Пячин С.А., Пугачевский М.А. Новые технологии получения функциональных наноматериалов: лазерная абляция, электронное воздействие. Хабаровск, 2013. 38 с.
4. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Левченко А.О. и др. // Письма в ЖЭТФ. Т. 106. В. 4. С. 247 – 251.
5. Emel'yanov V. I. // Laser Physics. 2011. V. 21. P. 1 - 7.

В.Ф. ЛОМАДУРОВ, Т.В. ГУБИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## О ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО НИТРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Показано, что образование твердого нитрата целлюлозы с модифицирующим агентом оказывает существенное влияние на прочностные характеристики полимерных композиций на основе модифицированного нитрата целлюлозы.

V.F. LOMADUROV, T.V. GUBINA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITIONS BASED ON MODIFIED CELLULOSE NITRATE

It has been shown that the formation of solid cellulose nitrate with a modifying agent has a significant effect on the strength characteristics of polymer compositions based on modified cellulose nitrate.

Для создания лазерно-активных сред, способных при определенных условиях генерировать когерентные электромагнитные излучения требуемой длины волны часто используют полимерные композиции на основе нитрата целлюлозы (НЦ), модифицированного 2,4-диазидо-6-азидоэтокси симметричным триазином (МАДА) [1].

Общепринято считать [2], что технологии изготовления оказывают существенное влияние на прочностные характеристики полимерной композиции на основе модифицированного НЦ. Так при технологии изготовления пироксилиновой полимерной композиции получаем сильно анизотропную систему с высокими значениями прочностных характеристик [2]. При изготовлении полимерных композиций в воде по баллиститной технологии получаем систему со слабо проявляющаяся анизотропией и малыми значениями прочностных характеристик [2].

Полимерная композиция «МН» на основе НЦ, модифицированного по баллиститной технологии МАДА, имеет большие абсолютные значения прочности в продольном направлении чем известные энергетические материалы, изготовленные (приготовленные) по баллиститной технологии (см. Таблицу) [1, 2]. Физико-механических свойств полимерной композиции «МН» обладает выраженной анизотропией: прочностные характеристики вдоль оси прессования примерно в 2 раза выше, чем в тангенциальном направлении (Таблица).

*Таблица.* Физико-механические характеристики на растяжение некоторых полимерных композиций на основе модифицированного НЦ при температуре 20°C.

Характеристики	МН*		РНДСИ-5КМ**	БРТТ, Предельные значения ***
	Осевое	Тангенциальное	Осевое	Осевое
$\sigma$ , МПа	20,72	10,10	5,28	10-20
$\epsilon$ , %	12,10	-	12,7	-
E, МПа	550,00	-	233	20-300

\* - Модельная полимерная композиция МН состоит из 58,6% НЦ(N= 12.1) и 40% МАДА, остальное – технологические добавки.

\*\* Химический состав полимерной композиции РНДСИ-5КМ: НЦ(N= 11.8-12.3) +тринитрат глицирина+ стабилизаторы химической стойкости – 95,5%, дополнительные пластификаторы – 2,0%, катализаторы горения – 2,5%, прочие -2,0% [1].

\*\*\* - полимерная композиция БРТТ (баллиститное ракетное твердое топливо) в диапазоне температур  $\pm 50^\circ\text{C}$  [3].

По анизотропии физико-механических свойств и высоким значениям прочности на разрыв исследованная полимерная композиция «МН» на основе НЦ, модифицированного по технологии баллиститных порохов в воде модифицирующим агентом МАДА, ближе к пироксилиновым полимерным композициям, чем к полимерным композициям, изготовленным по баллиститной технологии. Модифицирующий агент МАДА, так же как спиртоэфирная смесь, используемая в качестве модифицирующего агента при производстве пироксилиновых полимерных композиций образуют с НЦ твердый раствор [1, 3].

*Список литературы*

1. Жегров Е.Ф., Милёхин Ю.М., Берковская Е.В. Химия и технология баллиститных порохов, твёрдых ракетных и специальных топлив. Т.1. Химия. М.: РИЦ МГУП им. И. Фёдорова, 2011, 400 с.
2. Косточко А.В., Казбан Б.М. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2014. – 400 с.
3. Ломадунов В. Ф., Губина Т.В. Структурные превращения в модифицированном нитрате целлюлозы// VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022, посвященная 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии по физике Басова Николая Геннадиевича: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. 453 с.

А.В. ИВЧЕНКО, А.А. МЕЛЬНИКОВ

*Самарский национальный исследовательский университет, Самара, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗО-ФАЗНОГО НАНЕСЕНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЧАСТОТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Предложена комбинированная технология формирования декоративных покрытий на поверхности малоуглеродистой стали в среде атмосферного воздуха активированного действием частотного поверхностного разряда. Отмечено изменение цвета получаемого оксидного покрытия с увеличением длительности процесса обработки.

A.V. IVCHENKO, A.A. MEL'NIKOV

*Samara National Research University, Samara, Russia*

## THE PROCESS INVESTIGATION FOR GAS-PHASE FORMATION OF DECORATIVE COATINGS ON SURFACES OF LOW-CARBON STEEL UNDER THE FREQUENCY SURFACE DISCHARGE ACTION IN ATMOSPHERIC AIR

A combined technology for the formation of decorative coatings on the surface of low-carbon steel in atmospheric air activated by the frequency surface discharge action is proposed. With increase in the duration of the treatment process, a change in the color of the resulting oxide coating is recoded.

Известно [1], что покрытия, наносимые на поверхностях металлов, влияют на свойства возникающего при технологической обработке поверхностного слоя и определяют долговечность эксплуатации промышленных изделий. Традиционный способ формирования покрытий на металлической подложке связан с химической и гальванической обработкой в растворах электролитов [2]. Однако проблема утилизации отработанных электролитов негативно влияет на себестоимость выпускаемой продукции и ограничивает масштабы современного производства.

В качестве альтернативы традиционному процессу, в настоящей работе предложена комбинированная технология нанесения декоративных покрытий на поверхности подложек из малоуглеродистой стали методом УФ печати [3] и низкотемпературного оксидирования в воздушной атмосфере ( $p=10^5$  Па), активированной частотным поверхностным разрядом [4]. Предложенный процесс обеспечивал формирование на оголенных металлических поверхностях оксидной пленки толщиной 15-20 мкм при умеренном энергопотреблении ( $W<45$  Вт).

Исследование стадии низкотемпературного окисления малоуглеродистой стали производилась с использованием систем экспериментального комплекса, описанного в [5]. В процессе обработки воздействие плазменных микро-каналов поверхностного разряда приводило в среде атмосферного воздуха к образованию активных частиц, включая УФ-фотоны ( $\lambda \approx 337$  нм) и молекулярный озон ( $O_3$ ). Изменение длительности окисления образцов в пределах 20-240 мин вело к изменению цвета получаемого покрытия (см. рис.1).

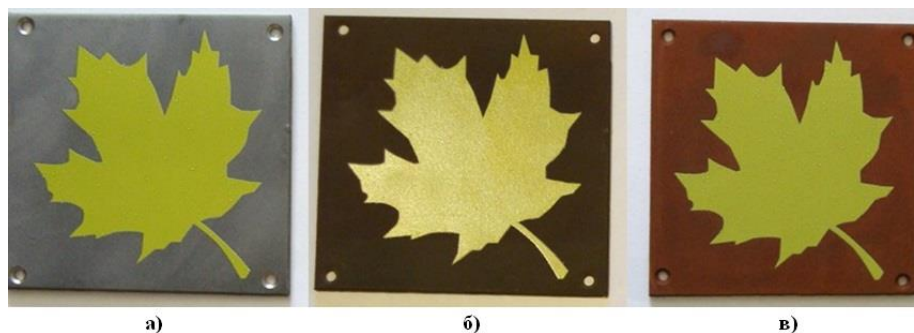


Рис. 1. Изменение внешнего вида подложки в зависимости от длительности обработки:  $t_a < t_b < t_c$ ,  $t_a = 0$

В работе рассматривается изменение свойства поверхностного слоя, полученного в ходе низкотемпературного газо-фазового окисления. Обсуждается взаимосвязь наблюдаемых изменений состояния подложки с параметрами процесса газоразрядной обработки.

### Список литературы

1. Габург Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению. - М.: Техносфера, 2006.
2. Грилихес С.Я. Оксидирование и фосфатирование металлов – Л.: Машиностроение, 1971.
3. Малая полиграфическая энциклопедия. Сборник специальных статей для технологов. Ч1./ под ред. В. Шлямина, М.: 2011.
4. Ivchenko A.V., Timchenko P.E., Zakharov V.P., Marinin V.L. The Properties of Colliding Surface Discharges in Air // Europhysics Conference Abstracts- 2012. - V. 36F-4p.
5. Ивченко А.В. Учебно-научный комплекс для проведения озонотехнологических исследований // Физическое образование в вузах – 2019. –Т.25,№2–С.125-141.



## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГЕОМЕТРИИ ФУЛЛЕРЕНА C<sub>60</sub> МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В настоящей работе приведен анализ изменений среднего радиуса фуллера C<sub>60</sub> в зависимости от температуры в широком диапазоне температур (10-900K). Получено, что средний радиус фуллеренов растет с увеличением температуры с оценочной величиной  $\cong 0.001\text{\AA}$  на каждые 100K прироста температуры. Значения среднего радиуса фуллера C<sub>60</sub>, для выбранного потенциала, лежат в диапазоне 3.64 – 3.65Å. Динамические данные получены программным пакетом LAMMPS.

D.V. ALYABEV

Institute of Ion-plasma and Laser Technology, Tashkent, Uzbekistan

## STATISTICAL ANALYSIS OF FULLERENE C<sub>60</sub> GEOMETRY TEMPERATURE DYNAMICS BY MOLECULAR DYNAMICS

In this paper, the analysis of changes in the mean radius of fullerene C<sub>60</sub> as a function of temperature in a wide temperature range (10-900K) is presented. It is obtained that the average radius of fullerenes increases with the temperature increase at an estimated value of  $\cong 0.001\text{\AA}$  for every 100K of temperature increase. The values of the mean radius of fullerene C<sub>60</sub> are within the range of 3.64-3.65Å for the selected potential. Dynamic data is obtained using the LAMMPS software package.

К настоящему времени интерес к эндодральным фуллеренам сохраняет высокий уровень. Это, прежде всего, связано с развитием методов синтеза и выделения эндодральных фуллеренов [1]. Оценочное моделирование процессов рассеяния атомов на фуллеренах показало сильное влияние входных энергетических и ориентационных параметров на процесс. В связи с этим, отдельно был проанализирован процесс термализации фуллеренов, с целью установления динамического влияния температуры на геометрию свободных фуллеренов C<sub>60</sub>. Одним из параметров, для которого можно рассмотреть температурное влияние – это средний радиус фуллера. Для моделирования этого процесса была создана геометрическая модель 1000 свободных фуллеренов, которые были термализованы стандартными процедурами программного пакета LAMMPS [2], с использованием потенциала [3]. Статистическая обработка полученных данных дает следующую динамику (рис. 1). При росте температуры, средний радиус фуллеренов  $R_T$  ожидаемо растет. Рост  $R_T$  быстрее примерно в три раза, чем температурный рост постоянной решетки кристалла фуллерита C<sub>60</sub> (теоретические и экспериментальные данные – [4-6]). Дальнейший статанализ позволил выделить области температуры, внутри которых  $R_T$  статистически принимает равные значения

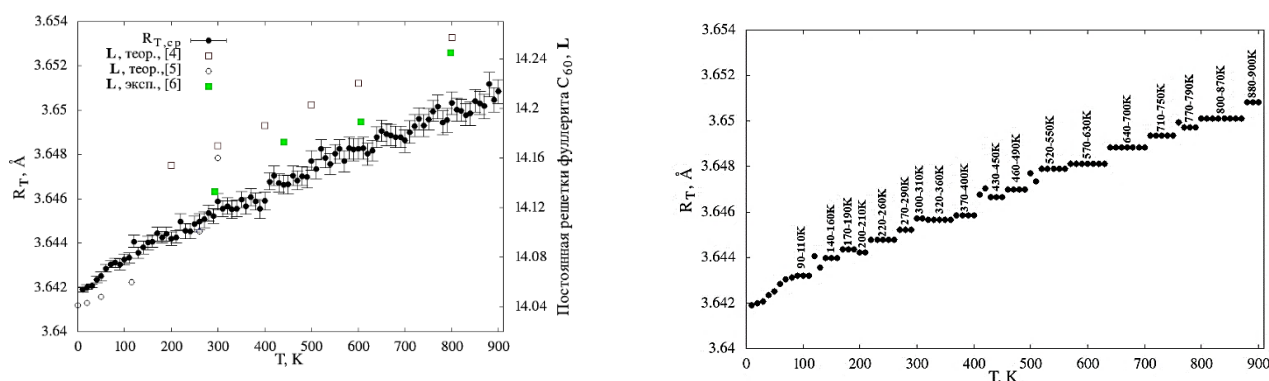


Рис. 1: справа: зависимость среднего радиуса свободных фуллеренов в зависимости от температуры, в сравнении с температурной динамикой постоянной решетки кристалла фуллерита, слева: статистически уточненная зависимость среднего радиуса фуллеренов в зависимости от температуры

Таким образом, температурную зависимость  $R_T$  нельзя считать непрерывной, несмотря на близость численных значений, зависимость скорее имеет дискретный характер.

Список литературы

1. Itagaki H., Fujiwara Y., et al. // AIP Advances 9, 075324 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5100980>
2. Kinaci, Haskins, Sevik and Cagin, // Phys Rev B, 86, 115410 (2012)
3. lammps.org
4. Yildirim, T. and Harris, A. B. // Physical Review B, 46 (12), 7878-7896. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.46.7878>
5. Jiu-xun Sun. // Phys. Rev. B 75, 035424, 2007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.035424>
6. Fischer J. E., Heiney P.A. // Phvs. Chem. Solids Vol. 54 (12). pp. 1725-1757. (1999), [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(93\)90287-2](https://doi.org/10.1016/0022-3697(93)90287-2)



С.А. ГУБИН<sup>1,2</sup>, А.В. КУДИНОВ<sup>1</sup>, Ю.А. БОГДАНОВА<sup>1</sup>, М.Ш. КУРБАНОВ<sup>3</sup>, И.В. МАКЛАШОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ОБЛАСТИ ИОНИЗАЦИИ

Представлены результаты термодинамического анализа процесса карботермического восстановления кремния метаном совместно с углем в электродуговой печи при высоких температурах с ионизацией продуктов.

S.A. GUBIN<sup>1,2</sup>, A.V. KUDINOV<sup>1</sup>, Y.A. BOGDANOVA<sup>1</sup>, M.SH. KURBANOV<sup>3</sup>, I.V. MAKLASHOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Arifov Institute of ion-plasma and laser technologies of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE CARBOTHERMAL REDUCTION OF SILICON USING METHANE AT HIGH TEMPERATURES IN THE IONIZATION REGION

The results of thermodynamic analysis of the process of carbothermic reduction of silicon together with methane and coal in an electric arc furnace at high temperatures with ionization of products are presented.

В [1, 2] экспериментально показана возможность использования метана  $\text{CH}_4$  совместно с углем для получения кремния в электродуговой печи постоянного тока. Метан применялся в качестве части углеродистого восстановителя (до – 80% массовых процентов от общего необходимого количества углерода и до 20% угля). При нагреве метан разлагается на водород и чистый газообразный углерод без загрязняющих примесей. Обеспечивалось поступление метана непосредственно в зону высокой температуры печи через верхний полый графитовый электрод. В месте расположения электрической дуги достигались очень высокие температуры, при которых происходит интенсивная ионизация продуктов разложения реагентов. Поэтому термодинамический расчет ионизации необходим для понимания закономерностей процесса восстановления кремния в области ионизации продуктов при высоких температурах.

Цель работы заключалась в определении на основе равновесной термодинамики оптимального количества метана для восстановления кремния совместно с углем при высоких температурах в области ионизации продуктов.

С помощью термодинамического кода TDS [3], основанного на фундаментальном методе экстремума характеристических функций, решались  $TP$ -задачи при атмосферном давлении и температурах в диапазоне от 2000 К до 10000 К. Рассматривался пиролиз однородно перемешанной смеси твердых частиц диоксида кремния с массовым содержанием 50% – 80%  $\text{SiO}_2$  и конденсированного угля в среде газообразного метана при нормальном давлении, который заполняет пространство между частицами  $\text{SiO}_2$  и С. Предполагалось, что равновесный термодинамический расчет позволяет получить значения среднemasовых параметров и компонентов состава продуктов пиролиза.

В настоящей работе рассматривается характер поведения кремния, находящегося в газовой фазе, и его ионов, т.е.  $\text{Si(g)}$ ,  $\text{Si(g)}^+$  и других кремний содержащих компонентов в области ионизации для повышения общего выхода кремния путем уменьшения количества газообразного монооксида кремния  $\text{SiO(g)}$ . Выброс  $\text{SiO(g)}$  из печи приводит к значительной потере кремния.

Расчеты показали, что при высоких температурах в области ионизации продуктов происходит разложение реагентов и переход их в газообразное состояние  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C(тв)}$ ,  $\text{SiO}_2$ . Диоксид кремния разлагается на О и  $\text{Si(g)}$ ,  $\text{SiO(g)}$  с образованием СО. Массовая доля  $\text{SiO(g)}$  уменьшается с ростом температуры из-за диссоциации, общее количество образующегося кремния Si и  $\text{Si(g)}$ ,  $\text{Si(g)}^+$  возрастает. При остывании продуктов  $\text{Si(g)}$  конденсируется, увеличивая выход кремния. Показано, что при высоких температурах в области ионизации продуктов замена массовой доли угля метаном целесообразна во всей расчетной области (50 – 80)%  $\text{SiO}_2$ . Здесь общее количество образующегося кремния заметно превышает значения, полученные при  $T \leq 2500$  К при отсутствии ионизации.

Однако этот рост количества кремния с увеличением температуры сопровождается значительными потерями энергии на ионизацию, которые делают этот процесс экономически нецелесообразным.

### Список литературы

1. Kurbanov M.Sh., Abdurakhmanov B.M., Ashurov H.B. // Applied Solar Energy. 2018. V. 54. P. 85
2. Abdurakhmanov B.M., Ashurov Kh.B., Kurbanov M.Sh., Nuraliev U.M. Applied Solar Energy. 2014, V. 50. No 4, P. 282.
3. Victorov S.B., El-Rabii H., Gubin S. A., Maklashova I.V., Bogdanova Y.A. // J. Energ. Mat. 2010. V. 28 (sup1). P. 35.

А.А. ЕГОРОВ, Ю.А. БОГДАНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СВОЙСТВ ПЕРЕНОСА ГАЗОВЫХ СИСТЕМ

В данной работе продемонстрировано применение методики Грина-Кубо для расчета свойств переноса (вязкость и теплопроводность) газовых систем на основе молекулярно-динамического моделирования. Для оптимизации параметров расчета коэффициентов переноса разработан алгоритм, применяемый совместно с молекулярно-динамическим моделированием на основе открытого программного пакета LAMMPS. Предложенный алгоритм позволяет в рамках одного расчета вычислять как значение вязкости, так и теплопроводности в согласии с экспериментальными данными.

A.A. EGOROV, YU.A. BOGDANOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CREATION OF A METHOD FOR PROCESSING THE RESULTS OF MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION FOR CALCULATING THE TRANSPORT PROPERTIES OF GAS SYSTEM

The Green-Kubo method is used to calculate the transport properties (viscosity and thermal conductivity) of gas systems based on molecular dynamic simulation. To optimize the parameters of viscosity and thermal conductivity calculation, an algorithm has been developed that is used in conjunction with molecular dynamic simulation based on the open software package LAMMPS. The proposed algorithm makes it possible to calculate transport coefficient in accordance with experimental data within a single calculation.

Для расчета свойств переноса (вязкость и теплопроводность) газовых систем на основе молекулярно-динамического моделирования в программном пакете LAMMPS [2] реализовано несколько как равновесных, так и неравновесных методов. В данной работе используется равновесный метод Грина-Куб [1], позволяющий в рамках одного расчета определить вязкость и теплопроводность на примере гелия и водорода, а также их бинарных смесей.

Метод Грина-Кубо устанавливает связь коэффициентов теплопроводности  $\kappa$  и сдвиговой вязкости  $\eta$  с временными корреляциями спонтанных потоков тепла и импульса. Для использования этого метода в МД моделировании интеграл в исходных уравнениях дискретизируют, в результате чего корреляции потоков считаются по  $p$  точкам, берущихся каждые  $s$  шагов. В итоге общая длина корреляции составляет  $s \cdot p \cdot dt$ , где  $dt$  – размер временного шага в МД.

Показано, что для газовых систем (водорода и гелия) значения корреляции стремятся к нулю, но после определённого момента появляются случайные шумы (рис.1), которые негативно влияют на итоговые значения коэффициентов переноса.

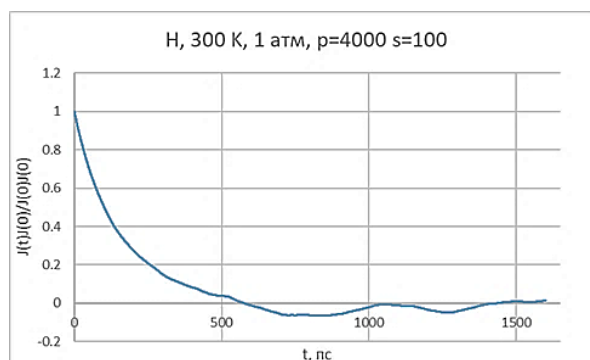


Рис. 1. График автокорреляции потоков тепла водорода, 16 пс

Для этого случая был разработан алгоритм, реализованный в виде компьютерной программы, позволяющий по имеющимся данным молекулярно-динамического моделирования выбрать необходимую длину корреляции, обрезав шумы, и рассчитать значения коэффициентов теплопроводности и вязкости. Применение разработанного алгоритма позволяет повысить точность расчетных значений вязкости и теплопроводности в сравнении с экспериментальными данными [3].

Таким образом, в работе были продемонстрированы метод, позволяющий оптимизировать поиск параметров расчётов свойств переноса (вязкость и теплопроводность) газовых систем (гелий, водород и их бинарных смесей) на основе молекулярно-динамического моделирования в согласии с экспериментальными данными.

### Список литературы

1. Evans D.J., Morriss G.P. Theoretical Chemistry Monograph Series – Canberra: ANU Press, 2008.
2. LAMMPS. – URL: <https://www.lammps.org/>
3. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. – URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>

А.Д. ТРОФИМОВА<sup>1</sup>, П.В. ЧИРКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>РФЯЦ–ВНИИТФ им. Академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕДИ

В работе исследованы различные методики расчета коэффициента теплопроводности меди на основе молекулярно-динамического моделирования. При выполнении работы использован открытый пакет для классической молекулярной динамики LAMMPS, расчет проведен на основе потенциала погруженного атома. Показано, что двухтемпературная модель, учитывающая электронную подсистему, позволяет получить результаты в согласии с экспериментальными данными.

A.D. TROFIKOVA<sup>1</sup>, P.V. CHIRKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center, Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

## CALCULATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF COPPER

The methods for calculating the thermal conductivity coefficient of copper are investigated with molecular dynamic simulation. An open package LAMMPS was used for classical molecular dynamics in this work. The calculation was carried out on the basis of embedded-atom method potential. It is shown that the two-temperature model, taking into account the electronic subsystem, allows us to obtain the results in agreement with the experimental data.

Теплопроводность  $\kappa$  характеризует способность материала передавать тепловую энергию в соответствии с законом Фурье:  $J = -\kappa \text{grad}(T)$ , где  $J$  - тепловой поток (в единицах энергии) в единицу времени на единицу площади,  $\text{grad}(T)$  - пространственный градиент температуры.

В LAMMPS [1] реализуются несколько методов расчета теплопроводности. В данной работы были рассмотрены 3 метода: равновесный метод Грина-Кубо и два неравновесных метода. Согласно методу Грина-Кубо тепловой поток рассчитывается на основе флуктуаций потенциальной и кинетической энергии и тензора напряжений в стационарном равновесном моделировании. В рамках неравновесного метода [2] внешний слой атомов расчетной суперячейки вдоль оси Oz на обоих концах зафиксирован, что обеспечивает адиабатическое граничное условие, позволяя установить температурный градиент. На боковых границах используются периодические граничные условия. Однако применение описанных методов не позволяет достичь согласия с экспериментальными данными, так как не учитывалось наличие свободных электронов в металлах.

Для описания переноса тепла между электронной и атомной подсистемами применяется двухтемпературная модель [3], в которой коэффициент теплопроводности рассчитывается аналогично [4].

На рисунке 1 продемонстрированы профили температуры для системы  $3,6 \times 3,6 \times 72,6$  нм, где показан мгновенный профиль температуры электронной подсистемы, а для профиля температуры атомной подсистемы проведено усреднение по 10 пс. Градиент температуры был определен с помощью линейной регрессии в области, где температуры электронной и атомной подсистем совпадают, и согласно закону Фурье рассчитан коэффициент теплопроводности:  $\kappa=180$  Вт/м\*К. Дополнительно проведены расчеты для системы  $3,6 \times 3,6 \times 145,2$  нм и получен результат  $\kappa=429$  Вт/м\*К, что согласуется с данными [5]:  $\kappa=401$  Вт/м\*К.

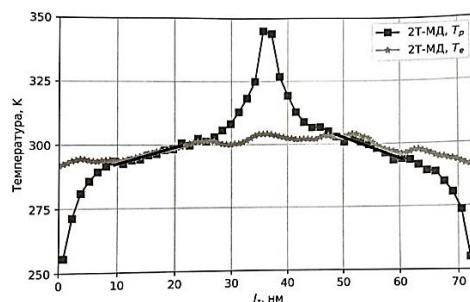


Рис. 1. Температурные профили электронной и атомной подсистем

### Список литературы

1. Aidan P. Thompson, H. Metin Aktulga. // J. Computer Physics Communications. 2022. V 271. 108171.
2. Yan Wang, Xiulin Ruan, Ajit K. Roy. // Phys. Rev. 2012. B 85. 205311.
3. Duffy D. M. and Rutherford A. M. // J. Phys.: Condens. Matter. 2007. 19. 016207.
4. Xiangyang Dong and Yung C Shin. // J. Compos. Mater. 2017. 51 (28). 3941-3953
5. Зиновьев В.Е., Теплофизические свойства металлов при высоких температурах./ Справ. изд., М.: Металлургия, 1989.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ С БОЛЬШИМИ ЧИСЛАМИ ФРУДА**

В данной работе описана математическая модель на основе уравнений мелкой воды для описания растекания жидкости с учетом действия различных физических факторов, представлена её численная реализация двухшаговым методом Лакса-Вендроффа. Устранены проблемы, связанные со специфическими особенностями данной разностной схемы, что позволяет применять её к расчетам течений с большими числами Фруда, и в том числе в областях с сухим дном. Предложен метод расчёта коэффициентов искусственной вязкости. Приведены результаты решения задач об обрушении водяной колонны в замкнутом бассейне и о распространении воды в канале при разрушении дамбы.

A.M. KIRSANOVA, S.I. SUMSKOI

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

**SIMULATION OF LIQUID FLOWS WITH HIGH FROUDE NUMBER**

This paper describes a mathematical model based on the shallow water equations for describing the spreading of a liquid, taking into account the action of various physical factors, and presents its numerical implementation by the two-step Lax-Wendroff method. The problems associated with the specific features of this difference scheme have been eliminated, which makes it possible to apply it to the calculations of flows with large Froude number, including those in areas with a dry bottom. A method for calculating the coefficients of artificial viscosity is proposed. The results of solving problems on the collapse of a water column in a closed region and on the propagation of water in a channel during the destruction of a dam are presented.

Модифицированная система уравнений мелкой воды имеет вид  $\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U(H)}{\partial x} = Q$ , где  $H = (h, uh)^T$ ,  $U = (uh, u^2h + \frac{1}{2}gh^2)^T$ ,  $Q = (q, -gb'_x h + hf'_x^V + f_x^S)^T$ . Для её решения используется двухшаговая разностная схема Лакса-Вендроффа:  $H_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(H_{i+1}^n + H_i^n) \frac{\Delta t}{2\Delta x}(U_{i+1}^n - U_i^n)$  – первый шаг,  $H_i^{n+1} = H_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(U_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - U_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) + \Delta t Q_i^n$  – второй шаг. Достоинством данной разностной схемы является простота в реализации и использовании, что непосредственно снижает скорость вычислений.

Основная проблема заключается в том, что схема Лакса-Вендроффа не сохраняет монотонность. В связи с этим, требуются методы для подавления высокочастотных осцилляций в решении, появляющихся вблизи гидродинамических разрывов при описании сверхкритических течений. Монотонизация решения может быть достигнута, например, путем введения в схему различных процедур коррекции, из-за чего может возникнуть дополнительная необходимость в устранении неконсервативности разностной схемы [1].

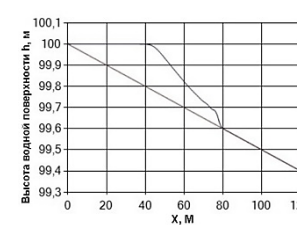
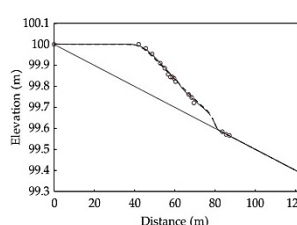
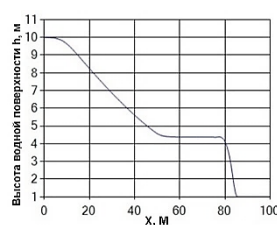
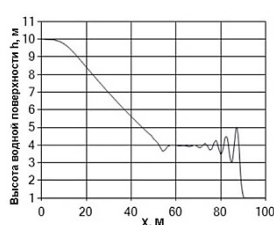


Рис.1. Результат устранения осцилляций в решении канала задачи об обрушении водного столба результаты [2],

Рис.2. Профиль водной поверхности вдоль в момент времени t = 10с; слева –

справа – результаты данной работы

В настоящей работе монотонизация решения достигается путем введения в систему уравнений диссипативного члена  $\mu \frac{\partial \partial H}{\partial x}$ , где  $\mu$  - коэффициент искусственной вязкости. Тогда во второй шаг в разностной схеме Лакса-Вендроффа добавляется слагаемое  $\Delta t \mu_{i,H}^n (H_{i+1}^n - 2H_i^n + H_{i-1}^n)$ . Коэффициент  $\mu_{i,H}^n$  рассчитывается для каждой расчетной ячейки на каждом временном шаге следующим образом:  $\mu_h = \frac{k_1}{\Delta t} \left| \nabla h + \frac{k_2 c \Delta t}{\Delta x} \right|$ , при  $\nabla h < -\frac{k_2 c \Delta t}{\Delta x}$ ;  $\mu_h = 0$ , при  $\nabla h \geq -\frac{k_2 c \Delta t}{\Delta x}$ ;  $\mu_{uh} = \frac{k_1}{\Delta x} |\nabla uh + k_2 c|$ , при  $\nabla uh < -k_2 c$ ;  $\mu_{uh} = 0$ , при  $\nabla uh \geq -k_2 c$ , где  $c = \sqrt{gh}$  - критическая скорость,  $k_1, k_2$  - коэффициенты.

При использовании искусственной вязкости не возникает нарушений консервативности схемы, что значительно упрощает вычисления. Полученное в данной работе численное решение Рис.1, согласуются с аналитическим, а так же с решениями другими методами [1]. Численное решение задачи об обрушении плотины Рис.2 с высокой точностью согласуется с экспериментальными данными и с численным решением методом конечных объемов [2].

Список литературы

1. Н.Г. Бурого, В.А. Герман, А.Д. Никитин и др.// Препринт ИПМех РАН, Москва, 2019, №1182, – 10-19с. doi:10.13140/RG.2.2.30041.98407/1
2. Szu-Hsien Peng // Journal of Applied Mathematics, 2012. P. 9-10. doi:10.1155/2012/489269

К.С. ПАНИН<sup>1,2</sup>, В.А. СМЕТАНЮК<sup>1</sup>, С.М. ФРОЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗА НА СОСТАВ ПРОДУКТОВ ПАРЦИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Работа посвящена моделированию процесса получения синтез-газа при газификации твердого углеводородного сырья. В данной работе в качестве углеводорода использован нормальный гептан  $C_7H_{16}$ . Показано влияние рециркуляции продуктов конверсии на степень конверсии исходного вещества.

K.S. PANIN<sup>1,2</sup>, V.A. SMETANYUK<sup>1</sup>, S.M. FROLOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## EFFECT OF GAS RECIRCULATION ON THE COMPOSITION OF PARTIAL OXIDATION PRODUCTS OF NORMAL HYDROCARBONS

The work is devoted to modeling the synthesis gas production process during the gasification of solid hydrocarbon raw materials. In this work, normal heptane  $C_7H_{16}$  was used as a hydrocarbon. The effect of recycling of conversion products on the degree of conversion of the starting substance is shown.

В работе [1] предложена технология получения ультраперегретого водяного пара (выше 2000 °С) с помощью циклической детонации газовой смеси углеводородного горючего с кислородом и последующего использования такого пара в процессе автотермической и аллотермической газификации органических отходов (сырья) в реакторе-газификаторе. Целевой продукт газификации сырья – синтез-газ, в основном состоящий из CO и H<sub>2</sub> в соотношении, зависящем от сырья и условий газификации: температуры пара и времени пребывания сырья в реакторе-газификаторе. Для регулирования состава синтез-газа в данной работе предложено увеличить время пребывания сырья в реакторе-газификаторе за счет частичной рециркуляции продуктов конверсии и построена термодинамическая модель такой рециркуляции с использованием программного комплекса Cantera [2]. Аналогичный прием часто применяется в химической промышленности и в поршневых двигателях внутреннего сгорания [3]. При моделировании рассмотрен процесс автотермической конверсии органического сырья при атмосферном давлении, причем тепло, необходимое для газификации сырья, получалось в результате сжигания стехиометрической смеси сырья с кислородом. Сырье моделировали нормальным гептаном. При моделировании принято допущение о равновесном составе продуктов конверсии. Расчеты показали, что частичная рециркуляция продуктов конверсии сырья (от 10 до 80%), действительно, позволяет управлять соотношением выходов H<sub>2</sub> и CO в получаемом синтез-газе.

### Список литературы

1. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садьков И. А., Силантьев А. С., Аксёнов В. С., Шамшин И. О., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Автотермическая конверсия природного газа и аллотермическая газификация жидких и твердых органических отходов ультраперегретым водяным паром // Горение и взрыв, 2022, т.15, №2, с. 75-87
2. David G. Goodwin, Harry K. Moffat, Ingmar Schoegl, Raymond L. Speth, and Bryan W. Weber. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. <https://www.cantera.org>, 2022.
3. Сергеев С.С., Фролов С.М., Басевич В.Я., Басара Б., Пришинг П. Моделирование рабочего процесса дизеля с рециркуляцией отработавших газов на базе детального кинетического механизма горения топлива // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 2. № 92. С. 92-101.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ НМХ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Были подобраны параметры уравнения состояния (УРС) нереагирующего НМХ в форме Ми-Грюнаизена, часто используемого для определения термодинамических параметров вещества в широком диапазоне изменения давления и температуры, в том числе в условиях ударного сжатия. В программном пакете LAMMPS было проведено молекулярно-динамическое (МД) моделирование с использованием реакционного силового поля ReaxFF-1g. Коэффициенты УРС были получены на основе экспериментальных данных по изотермическому и ударно-волновому сжатию. Получено хорошее согласие свойств НМХ, рассчитанных на основе полученного УРС, с экспериментальными данными и результатами МД моделирования.

T. I. EYVAZOVA, I. V. MAKLASHOVA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OBTAINING THE PARAMETERS OF THE EQUATION OF STATE FOR HMX BY METHODS OF MOLECULAR DYNAMICS AND THERMODYNAMICS

The parameters of the equation of state (EOS) of unreacting HMX in the Mie-Grüneisen form, which is often used to determine the thermodynamic parameters of a substance in a wide range of pressure and temperature, including shock compression conditions, were selected. The molecular dynamic (MD) simulation based on the open software package LAMMPS was carried out using the reaction force field ReaxFF-1g. The EOS coefficients were obtained on the basis of experimental data on isothermal and shock-wave compression. A good agreement is obtained between the HMX properties calculated by the obtained EOS with the experimental data and the results of MD simulation.

1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктан (НМХ) – высокоэнергетическое взрывчатое вещество, свойства которого необходимо исследовать не только при нормальных условиях, но и в условиях повышенных температур и давлений. С помощью молекулярно-динамического (МД) моделирования в программном пакете LAMMPS [1] были получены характеристики изотермического сжатия НМХ при постоянных температурах 300 К и 450 К в диапазоне давлений  $P = 0,05\text{--}50$  ГПа. В широком диапазоне давлений  $P = 1\text{--}50$  ГПа были получены расчетные зависимости давления в ударной волне от степени сжатия монокристалла октогена (НМХ) и зависимости температуры от давления ударно-волнового сжатия.

Для получения уравнения состояния (УРС) в удобной для практического применения форме были подобраны параметры УРС в форме Ми-Грюнаизена. В УРС выделены две составляющие для расчёта давления и энергии: «холодная» и тепловые. Соотношения для потенциальных «холодных» составляющих давления и энергии имеют вид соответственно:

$$P_n(\delta) = \frac{c_0^2 \rho_0}{n} (\delta^n - 1), \quad E_n(\delta) = \frac{c_0^2}{n} \left( \frac{\delta^{n-1} - 1}{n-1} + \frac{1}{\delta} - 1 \right),$$

где  $\rho_0$  – плотность вещества при нормальных условиях,  $c_0$  – скорость звука в сплошном несжатом холодном веществе,  $\rho$  – текущая плотность вещества,  $\delta = \frac{\rho}{\rho_0}$  – относительное сжатие,  $n$  – подгоночный параметр, который подбирался путём аппроксимации экспериментальной изотермы при  $T = 300$  К [1, 2].

Соотношения для тепловых составляющих давления и энергии имеют вид:

$$P_T(\delta) = (\gamma - 1)\rho_0 \delta E_T, \quad E_T(\delta) = C_V T,$$

где  $C_V$  – теплоёмкость НМХ при постоянном объёме,  $T$  – текущая температура,  $\gamma = \frac{2}{h-1}$ ,  $h$  – параметр, определяемый в работе и характеризующий величину предельного сжатия вещества. Константа  $\gamma$  связана с коэффициентом Грюнаизена  $\Gamma$  следующим образом:  $\gamma = \Gamma - 1$ . Для определения подгоночного коэффициента  $h$  была использована ударная адиабата Гюгонно [3–5].

Полученное в работе УРС хорошо согласуется с имеющимися результатами МД моделирования, расчётными и экспериментальными данными [1–5].

### Список литературы

1. LAMMPS. – URL: <https://www.lammps.org/>
2. Yoo C.S., Cynn H., Howard W.M., Holmes N. Equations of state of unreacted high explosives at high pressures. // Eleventh International Detonation Symposium Colorado. 1998. pp. 951-957.
3. Olinger B., Roof B., Cady H. The linear and volume compression of  $\beta$ -HMX and RDX. // Proceedings of the Symposium (International) on High Dynamic Pressures, C.E.A., Paris, 1978. pp. 3–8
4. Dick J. J., Hooks D. E., et al. Elastic-plastic wave profiles in cyclotetramethylene tetranitramine crystals. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96, pp. 374–379.
5. Zaug J.M., Armstrong M.R., Crowhurst J.C., et al. Ultrafast dynamic response of single crystal  $\beta$ -HMX // AIP Conf. Proc. 2017.
6. Marsh S.P. LASL Shock Hugoniot Data. 1980.



## ВЛИЯНИЕ Н-ДОПИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКИХ СИСТЕМ

Рассмотрены новые композитные материалы на основе углерода и его влияние на разложение энергоемких систем: увеличение скорости горения, повышение выделения тепла. Неметаллические наноматериалы на основе углерода играют важную роль в различных потенциальных применениях, особенно после появления графена и углеродных нанотрубок, которые демонстрируют выдающиеся свойства, обусловленные их уникальными наноструктурами. Химические ракетные топлива обычно используются для создания значений удельного импульса. Для более высокой эффективности, ракетное топливо должно иметь большую теплоту сгорания для достижения высоких температур и должно производить продукты сгорания, содержащие простые легкие молекулы, содержащие такие элементы, как водород, углерод, кислород.

BEKBOSSYNNOVA S. O

Kazakh National University Al Farabi, Almaty, Kazakhstan

## EFFECT OF N-DOPED CARBON NANOMATERIAL ON THE THERMAL DECOMPOSITION OF ENERGY-INTENSIVE SYSTEMS

New carbon-based composite materials and its effect on the decomposition of energy-intensive systems are considered: an increase in the rate of combustion process, an increase in heat generation. Carbon-based nonmetallic nanomaterials play an important role in various potential applications, especially after the advent of graphene and carbon nanotubes, which demonstrate outstanding properties due to their unique nanostructures. Chemical rocket fuels are commonly used to generate specific impulse values. For higher efficiency, rocket fuel must have a greater heat of combustion to reach high temperatures and must produce combustion products containing simple light molecules containing elements such as hydrogen, carbon, oxygen.

Наноматериалы на основе углерода являются потенциальной альтернативой металлическим катализаторам благодаря их низкой стоимости, экологичности и хорошей коррозионной стойкости.[1] С целью изучить влияние наноматериалов на основе углерода на термическое разложение перхлората аммония, были рассмотрены функционализированные многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ-СООН). Перхлорат аммония является наиболее распространенным окислителем и высокоэнергетическим компонентом смесевых твердых топлив. Термическое разложение этого окислителя может напрямую влиять на поведение при горении (скорость горения и энергетические характеристики) твердого топлива. В последнее время многие исследователи также изучили различные катализаторы термического разложения перхлората аммония для улучшения его горючих свойств. Небольшое количество катализатора может снизить температуру термического разложения, особенно более высокую температуру пиролиза, и увеличить кажущуюся теплоту разложения. Это может улучшить скорость горения и эффективность топлива. Многостенные углеродные нанотрубки подвергаются кислотной обработке, образуя функционализированные многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ-СООН). Средний диаметр и длина этих нанотрубок варьировались от 10 до 20 нм и от 5 до 15 мкм соответственно. [2] Функционализированные МУНТ и исходные МУНТ были изучены анализами FE-SEM и TEM (рис.1).

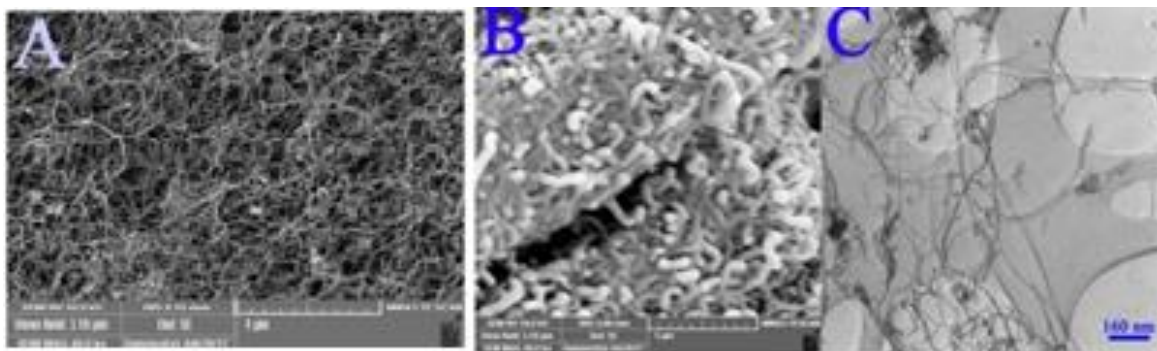


Рис.1. А: изображение FE-SEM исходных МУНТ; В: изображение FE-SEM функционализированных МУНТ; С: изображение TEM функционализированных МУНТ.

### Список литературы

1. Jeon, I.-Y., Noh, H.-J., & Baek, J.-B. Nitrogen-doped Carbon Nanomaterials: Synthesis, Characteristics and Applications. Chemistry // An Asian Journal. 2019. doi:10.1002/asia.201901318
2. Tavakoli H. Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate in the Presence of Functionalized MWCNTs. // J Nanostruct, 2022; 12(2):235-244. DOI: 10.22052/JNS.2022.02.002.



## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕДИ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ–ПАР

В работе рассмотрены четыре простые модели уравнений состояния. На основе каждой из этих моделей получено уравнение состояния меди с помощью экспериментальных данных по изобарическому расширению жидкой фазы. Предложен метод определения теплоемкости на основе данных по ударному сжатию пористых образцов. Проведены расчеты изобар, а также ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки исходно пористых образцов. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными.

К.А. BOYARSKIKH, K.V. KHISHCHENKO  
Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

## EQUATION OF STATE OF COPPER NEAR THE REGION OF THE LIQUID–VAPOR PHASE TRANSITION

The paper considers four simple models of equations of state. For each of these models, an equation of state for copper was obtained using experimental data on the isobaric expansion of the liquid phase. A method is proposed for determining the heat capacity based on data from experiments on shock compression of initially porous samples. Calculations of isobars, as well as shock adiabats and unloading isentropes of porous samples, have been carried out. The calculation results are compared with experimental data.

В работе рассмотрены четыре простые модели уравнений состояния:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}, \quad (1)$$

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^{4/3}}, \quad (2)$$

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+\chi b)}, \quad (3)$$

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^\xi}. \quad (4)$$

Здесь (1) – это уравнение Ван-дер-Ваальса; (2) – уравнение из [1]; (3) – уравнение из [2]; (4) – уравнение с тремя параметрами, в котором третий параметр определяет степень объема в холодной части давления. В формулах (1)–(4)  $P$  – это давление;  $T$  – температура;  $V$  – удельный объем;  $a$ ,  $b$ ,  $\chi$  и  $\xi$  – параметры;  $R$  – удельная газовая постоянная. Параметры моделей подобраны на основе экспериментальных данных по изобарическому расширению жидкой фазы меди и данных о зависимости давления от температуры на линии насыщения. Для всех моделей параметры варьировались в широком диапазоне значений, для каждого набора параметров рассчитывалась изобара, соответствующая экспериментальному давлению. Далее определялось отклонение результатов расчета от экспериментальных данных. Набор параметров, соответствующий наименьшему отклонению, признавался оптимальным.

Также в работе предложен метод расчета теплоемкости (в предположении ее постоянства) на основе данных по ударному сжатию пористых образцов. По всем четырем моделям была получена теплоемкость примерно равная  $3R$  с отклонением от этого значения около одного процента в большую сторону.

По полученному значению теплоемкости рассчитывались ударные адиабаты и изоэнтропы разгрузки исходно пористых образцов.

### Список литературы

1. Ликальтер А.А. // УФН. 2000. Т. 170. № 8. С. 831.
2. Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р. // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. Т. 1. № 2. С. 67.
3. Alekseev Yu.L., Ratnikov B.P., Rybakov A.P. // Zh. Prikl. Mekh. Tekh. Fiz. 1971. V. 2. P. 101.
4. Al'tshuler L.V., Bushman A.V., Zhernokletov M.V., Zubarev V.N., Leont'ev A.A., Fortov V.E. // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1980. V. 78. P. 741.

Н.Н. СЕРЕДКИН<sup>1,2,3</sup>, К.В. ХИЩЕНКО<sup>1,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный

<sup>5</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ Au–Ge ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Построена модель уравнения состояния системы Au–Ge. Проведен расчет ударных адиабат для сплавов золота с германием с использованием уравнения состояния сплава, а также смесевым методом, полагающим аддитивность ударных адиабат компонентов. Проведено сравнение результатов расчетов с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов для сплавов Au–Ge с разными массовыми долями компонентов.

N.N. SEREDKIN<sup>1,2,3</sup>, K.V. KHISHCHENKO<sup>1,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

<sup>5</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

## MODELING OF SHOCK-WAVE PROCESSES IN THE Au–Ge SYSTEM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

A model of the equation of state for the Au–Ge system is constructed. The shock adiabats of gold alloys with germanium are calculated using the equation of state of the alloy, as well as using the mixture method, which assumes the additivity of the shock adiabats of the components. The results of calculations are compared with the available data of shock-wave experiments for Au–Ge alloys of different mass fractions of the components.

Знание термодинамических свойств материалов представляет интерес для решения фундаментальных и прикладных проблем физики экстремальных состояний вещества.

В работе представлена модель уравнения состояния для системы Au–Ge при высоких давлениях и температурах на основе тепловых и калорических уравнений состояния, а также массовых долей компонентов смеси.

В работе рассматриваются несколько составов системы Au–Ge, а также проводится сравнение с данными ударно-волновых экспериментов. Ударные адиабаты для системы Au–Ge рассчитаны на основе принципа аддитивности ударных адиабат компонентов [1],

$$V_{12}(P) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i V_i(P), \quad (1)$$

а также на основе температурного уравнения состояния сплава Au–Ge:

$$E_{12}(P, T) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i E_i(P, T). \quad (2)$$

где  $P$  – давление;  $V_{12}$  – удельный объем смеси;  $V_i$  – удельный объем  $i$ -того компонента;  $\alpha_i$  – весовая концентрация  $i$ -того компонента;  $E_{12}$  – удельная внутренняя энергия смеси;  $E_i$  – удельная внутренняя энергия  $i$ -того компонента.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

### Список литературы

1. Alekseev Y.F., Al'tshuler L.V., Krupnikova V.P. Shock compression of two-component paraffin–tungsten mixtures // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1971. V. 12. № 4. P. 624–627.

**Секция  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

Руководитель секции – Юрков Дмитрий Игоревич д.т.н.,  
зав. кафедрой 24

Секретарь секции – Масленников Сергей Павлович д.т.н.,  
профессор кафедры 24

Тел./факс: 8 (495) 788-56-99, доб. 9796

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

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ЗАМЕДЛЕНИЯ И ДИФФУЗИИ НЕЙТРОНОВ В ВОДЕ АКТИВАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Разработан лабораторный стенд по исследованию процессов замедления и диффузии нейтронов в воде активационными методами. С помощью расчётных данных о распределении количества нейтронов в замедлителе в зависимости от их энергии на определенных расстояниях от радионуклидного источника на основе ( $\alpha, n$ ) реакции были оценены значения длины замедления и диффузии нейтронов в воде.

M.I. BABICH, R.F. IBRAGIMOV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## LABORATORY STAND FOR STUDYING THE PROCESSES OF SLOWING DOWN AND DIFFUSION OF NEUTRONS IN WATER BY ACTIVATION METHODS

A laboratory stand was developed to study the processes of slowing down and diffusion of neutrons in water by activation methods. Using the calculated data on the distribution of the number of neutrons depending on their energy at certain distances from the radionuclide source, based on the ( $\alpha, n$ ) reaction, the values of the deceleration length and diffusion of neutrons in water were estimated.

Создание лабораторного стенда для исследований процессов замедления и диффузии нейтронов в воде активационными методами является актуальной задачей для получения студентами практических навыков решения задач нейтронной физики.

В работе в качестве активационного детектора используется пластинка из природного индия. Источником нейтронов является источник типа PuBe, замедлителем в работе выступает вода. Регистрация вторичного излучения осуществляется с помощью спектрометра на основе особо чистого германия, предварительно откалиброванного по внутренней эффективности регистрации.

Длительность облучения активационного детектора из индия должна составлять порядка 15-20 часов, чтобы в образце накопилось достаточное количество радиоактивного изотопа  $^{116m}\text{In}$ . После окончания облучения необходимо «охладить» детектор в течение 10 минут. За это время в индии почти полностью распадутся накопленные короткоживущие изотопы [1]. Время регистрации вторичного излучения составляет 10 минут для набора достаточной статистики. В экспериментах должен использоваться кадмиевый фильтр, который полностью экранирует тепловые нейтроны. Вычитая из количества нейтронов, попавших в детектор, в эксперименте без фильтра, количество, попавшее в эксперименте с фильтром, получим количество тепловых нейтронов, попавших в пластинку. Для определения полного возраста нейтронов в водородосодержащей среде можно воспользоваться формулой:  $\tau = \frac{1}{6} \frac{\int_0^\infty r^2 J_p(r) 4\pi r^2 dr}{\int_0^\infty J_p(r) 4\pi r^2 dr}$ , где  $J_p$  - плотность резонансных нейтронов,  $r$  - расстояние от источника до точки облучения. Расчетное и стандартное значение возраста тепловых нейтронов в воде при нормальных условиях:  $\tau_p = 29.2 \text{ см}^2$ ,  $\tau_c = 29.6 \text{ см}^2$

Длиной замедления  $L_S$  называют величину, равную:  $L_S = \sqrt{\tau}$ . Расчетное и стандартное значение длины замедления нейтронов в воде  $L_S$  равно:  $L_{Sp} = 5.4 \text{ см}$ ,  $L_{Sc} = 5.2 \text{ см}$ .

Длина диффузии в воде  $L$  определяется как:  $L = \frac{M_{H_2O}}{\rho_{H_2O} N_A} \sqrt{\frac{1}{6\sigma_{aH}(2\sigma_{aH} + 2\sigma_{sH} + \sigma_{sO})}}$ , где  $\sigma_{aH} = 0.332 \text{ барн}$ ,  $\sigma_{sH} = 30.19 \text{ барн}$ ,  $\sigma_{sO} = 3.915 \text{ барн}$ . Расчетное и стандартное значение длины диффузии нейтронов в воде  $L$  равно:  $L_p = 2.63 \text{ см}$ ,  $L_c = 2.71 \text{ см}$ .

По экспериментальным данным было получено значение выхода нейтронов из источника  $\Phi$  с относительным отклонением  $\varepsilon$ :  $\Phi = (10 \pm 3) \cdot 10^5 \text{ нейтронов/секунду}$ ,  $\varepsilon = 30\%$ . Паспортный выход из источника составляет  $(10 \pm 1.5) \cdot 10^5 \text{ нейтронов/секунду}$ . Экспериментально рассчитанное значение совпадает с паспортным в пределах погрешности.

### Список литературы

1. G. Medkour Ishak-Boushaki, K. B. // Algiers-Algeria: EPJ Web of Conferences, 2012.
2. Ibragimov R.F., Ryabeva E.V., et al. // Москва: Физика в ядерной энергетике.
3. Фролов М.В. и др. // Нижний Новгород: Научно-технический вестник Поволжья, 2021.

## НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА В ОБРАЗЦЕ

В работе рассмотрены основные пассивные и активные нейтронные методы обнаружения делящегося вещества в образце, применяемые в досмотровых установках. Приведены теоретические расчеты для оценки возможности использования данных методов при обнаружении обогащенного урана. Разработана модель для обнаружения наличия  $^{235}\text{U}$  в образце DDAA методом с использованием инструментов пакета программ Geant4.

N.O. BLOKHIN, E.V. RYABEVA, R.F. IBRAGIMOV, O.V. CHAKILEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NEUTRON METHODS FOR DETECTING ENRICHED URANIUM IN A SAMPLE

We considered the main passive and active neutron methods for detecting fissile material in a sample which are used in nuclear safeguards systems. Theoretical calculations are presented to assess the possibilities of using these methods to detect enriched uranium. A model has been developed for detecting fissile materials in a sample by using DDAA with Geant4 software package.

Обнаружение делящихся веществ, в частности обогащенного урана, в условии экранирования рентгеновскими методами затруднительно и малоэффективно. Наиболее эффективным для данных целей являются нейтронные методы. Оценить экспериментально эффективность существующих методов обнаружения обогащенного урана затруднительно. Поэтому актуальной задачей является оптимизация на основе моделирования существующих установок обнаружения ДВ, например, с использованием инструментов пакета программ Geant4 [1], с последующей оценкой эффективности используемых методов и детекторов для обнаружения обогащенного урана.

Целью работы было изучение возможности использования существующих методов обнаружения обогащенного урана в образце; моделирование временной характеристики числа нейтронов в присутствии различной массы и обогащения образца  $^{235}\text{U}$  и без. Для решения данной задачи были рассмотрены следующие методы обнаружения делящихся веществ: DDAA (метод времени жизни нейтрона) [2], NAA (нейтронно-активационный анализ).

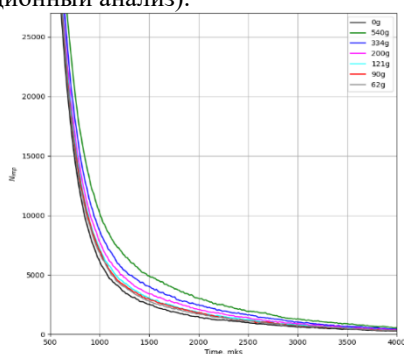


Рис. 1. Временная характеристика числа нейтронов для различных масс  $\text{U}^{235}$  в образце

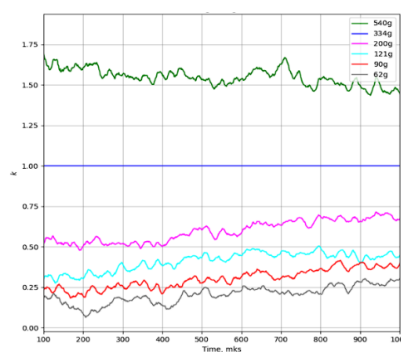


Рис. 2. Критерий для определения массы образца  $^{235}\text{U}$  по отношению к калибровочной кривой (синий цвет)

Оценена возможность использования данных методов для обнаружения обогащенного  $^{235}\text{U}$ . Из-за малого сечения и большого периода полураспада  $^{236}\text{U}$  NAA сводится к регистрации линии  $\sim 74.6$  кэВ от  $^{239}\text{U}$ , облученного тепловыми нейтронами.

Выделены основные моменты при разработке схем для обнаружения ДВ на основе DDA метода, позволяющие оптимизировать существующие установки, в частности использование импульсного генератора нейтронов на основе d-t реакции и размещения дополнительно слоя из графита, имеющего большой коэффициент отражения нейтронов.

Построены временные характеристики числа нейтронов в зависимости от массы  $^{235}\text{U}$  в образце при одинаковом обогащении (рисунок 1) и в зависимости от обогащения при неизменной массе. Полученные характеристики совпали с теоретическими и были сопоставлены с экспериментальными результатами предыдущих работ по данной тематике [3, 4], для подтверждения корректности разработанной модели. Предложен критерий k (рисунок 2), позволяющий оценить массу (% содержания)  $^{235}\text{U}$  в образце, на основе сравнения с априорной зависимостью в интересующем временном интервале  $\sim 1000$ - $2500$  мкс.

### Список литературы

1. Geant4 Collaboration, Introduction to GEANT4 User Documentation, 2010.
2. Development of Differential Die-Away Instrument for Characterization of Swedish Spent Nuclear Fuel, Tomas Martinik
3. I. Israelashvili et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A785 (2015) 14-20;
4. V.F. Batyaev, O.V. Bochkarev, S.V. Sklyarov. Int. J. Modern Physics: Conference Series Vol. 27 (2014).

## ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗРЯДОМ В ПАРАХ СМЕСЕЙ ЦЕЗИЯ С ДРУГИМИ МЕТАЛЛАМИ

Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик импульсных источников ИК излучения путем введения в состав цезиевой плазмы других щелочных металлов. Выполнен термодинамический анализ, который позволил определить оптимальный состав плазмообразующей среды, и экспериментально доказана эффективность замены ртути на рубидий, что обеспечило рост пиковой силы излучения цезиевой лампы в среднем ИК диапазоне в 1,6 раза.

S.V. GAVRISH

Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd

## PULSED INFRARED SOURCES WITH A DISCHARGE IN VAPORS OF MIXTURES OF CESIUM WITH OTHER METALS

The issues of improving the operational characteristics of pulsed sources of IR radiation by introducing other alkali metals into the composition of the cesium plasma are considered. A thermodynamic analysis was performed, which made it possible to determine optimal composition of plasma-forming environment, and the efficiency of replacing mercury with rubidium was experimentally proven, which ensured an increase of a cesium lamp peak radiation strength in the mid-IR range by 1.6 times.

На сегодняшний день эффективность ограниченного сапфировой оболочкой импульсного цезий – ртуть – ксенонового разряда (цезиевой лампы), используемого в качестве источника ИК излучения в оптико-электронных системах, не вызывает сомнения [1]. В то же время продолжают поиски путей повышения эксплуатационных характеристик цезиевых ламп, в частности, за счет введения в плазмообразующую среду цезия других щелочных металлов. Изучению и сопоставлению спектрально – энергетических характеристик разряда в парах смесей цезия с калием, рубидием или ртутью посвящена данная работа. Исследования проводились в несколько этапов.

На первом этапе был разработан универсальный источник электрического питания газоразрядной лампы, обеспечивающий работу при мощности до 2,5 кВт и частоте следования токовых импульсов 400÷500 Гц. Дополнительно предложена методика измерения температурных полей, построенная на тепловизионном измерении ИК излучения нагретых элементов лампы в спектральном диапазоне более 7 мкм.

На втором этапе исследований выполнен термодинамический анализ разряда в парах сплавов цезия с ртутью, рубидием и калием. С использованием математической модели [2] проведена оценка давления и теплопроводности паров металлов и ртути над их сплавами (рисунки 1 и 2) и выполнен анализ полученных результатов, который рекомендовал введение в цезиевый разряд паров рубидия в количестве не более 25вес. %.

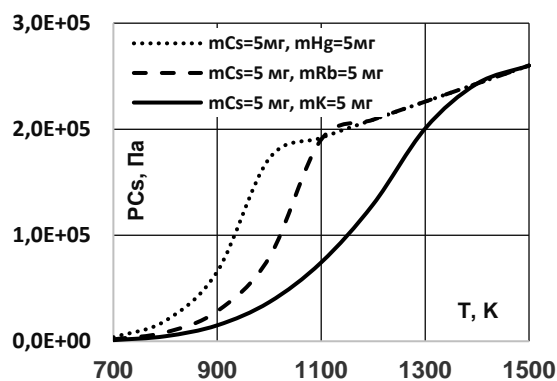


Рис. 1. Давления насыщенных паров цезия над сплавами с калием, рубидием и ртутью в зависимости температуры холодной точки газоразрядной лампы

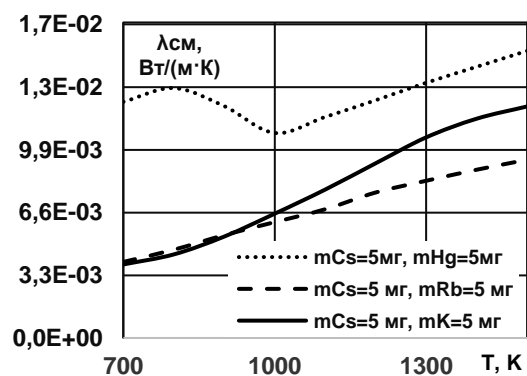


Рис. 2. Зависимость теплопроводности насыщенных паров цезия над его сплавами в зависимости от состава и температуры холодной точки газоразрядной лампы

Третьим этапом исследований было изучение спектрально – энергетических характеристик импульсных ламп диаметром 7 мм и длиной плазменного канала 90 мм при удельной электрической нагрузке 430 Вт/см. Установлено и обосновано, что разряд в цезий – рубидиевой смеси имеет преимущество в сравнении с остальными плазмообразующими средами, так как пиковая сила излучения такого ИК источника выше в 1,6 раза, чем у цезиевых ламп при наличии в плазме ртути или калия. Обозначены перспективные направления дальнейших работ.

### Список литературы

1. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. //Успехи прикладной физики. -2018. - Т. 6, №4.- С. 333 - 348.
2. Гавриш С.В. // Прикладная механика и техническая физика. - 2011.- Т 52, № 6. - С. 92-99.

## МЕТОД ОЦЕНКИ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА $ZnS+{}^6LiF$

С использованием пакета библиотек Geant4 получены модельные отклики регистрирующих элементов на основе сцинтиллятора  $ZnS+{}^6LiF$  в составе детектора нейтронного излучения. Определены эффективность регистрации нейтронов и коэффициенты пересчета числа тритонов в амбиентный эквивалент дозы нейтронов. Найдены относительные погрешности оценки амбиентного эквивалента дозы нейтронов, полученного с использованием эффективности регистрации нейтронов и коэффициента пересчета.

A.P. DENISENKO, V.A. KUGAVDA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## PROCEDURE FOR ESTIMATION OF AMBIENT DOSE EQUIVALENT OF NEUTRONS BY $ZnS+{}^6LiF$ SCINTILLATOR DETECTOR

Using the Geant4 library package, model responses of detecting elements based on a  $ZnS+{}^6LiF$  scintillator as part of a neutron radiation detector were obtained. The efficiency of neutron detection and the conversion coefficients of number of tritons into the neutron ambient dose equivalent are determined. The relative uncertainties of neutron ambient dose equivalent estimation obtained using the neutron detection efficiency and the conversion coefficient are found.

Зависимость амбиентного эквивалента дозы (АЭД) нейтронов от энергии нейтронов имеет вид нелинейно возрастающей функции, которая представлена в стандарте ICRP-74 [1]. Для определения АЭД нейтронов в точке измерения необходимо либо знать спектр нейтронов в данной точке, либо иметь детектор, энергетическая зависимость отклика которого имеет вид, подобный дозовой кривой ICRP-74. Данная работа сфокусирована на моделировании детектора в Geant4 и втором способе определения АЭД.

Детектор представляет собой шар из полиэтилена с семью регистрирующими элементами, представляющими собой цилиндры из органического стекла со слоем сцинтиллятора  $ZnS+{}^6LiF$  на торце. Регистрация нейтронов происходит за счет реакции  ${}^6Li(n,\alpha){}^3H$ , поэтому в модели нейтрон считается зарегистрированным, если обнаружен тритон.

Для каждого регистрирующего элемента получены отклики в ответ на нейтронное излучение. Отклик представляет собой зависимость количества зарегистрированных тритонов от энергии падающих нейтронов в диапазоне  $10^{-8}$ –19,9 МэВ. Полученные отклики необходимо преобразовать в АЭД, используя подобие откликов и дозовой кривой. Сделать это можно следующим образом:

$$\dot{H}^*(10) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 \left( \frac{E_j - E_1}{\Delta E} \right)^{+1} < \Delta >_i \cdot n_i(E_j),$$

где  $\dot{H}^*(10)$  – АЭД, пЗв;  $< \Delta >_i$  – коэффициент пересчета числа тритонов в АЭД в энергетической группе, пЗв/имп.;  $n_i(E_j)$  – число тритонов в  $i$ -м сцинтилляторе при энергии нейтронов  $E_j \in [E_1; E_2]$ ;  $i$  – номер сцинтиллятора;  $j$  – номер энергии нейтронов.

Оценить АЭД нейтронов можно и через эффективность регистрации нейтронов в энергетической группе:

$$\dot{H}^*(10) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 \left( \frac{E_j - E_1}{\Delta E} \right)^{+1} \left( < \alpha >_i \cdot \frac{F_n(E_j)}{n_i(E_j)} \cdot \frac{1}{n_i(E_j)} \right),$$

где  $< \alpha >_i$  – эффективность регистрации нейтронов в энергетической группе;  $F_n(E_j)$  – флюенс нейтронов с энергией  $E_{n,j}$ .

Стандартный способ оценки АЭД нейтронов через дозовые постоянные по данным из ICRP-74:

$$\dot{H}^*(10) = k_n(E) \cdot F_n(E)$$

где  $k_n(E)$  – коэффициент пересчета флюенса нейтронов в АЭД, пЗв·см<sup>2</sup>.

Эффективность регистрации нейтронов в  $i$ -м сцинтилляторе уменьшается с ростом энергии нейтронов и уменьшается в сторону от центра сферы детектора. Относительные погрешности оценки АЭД нейтронов в энергетических группах, рассчитанные через  $< \alpha >_i$ , составляет не более 3,0%, и через  $< \Delta >_i$ , не превышает 3,6%. Погрешность оценки АЭД нейтронов в энергетическом диапазоне от 1,3 МэВ до 20 МэВ, рассчитанная через  $< \alpha >_i$ , составляет 0,08%, и через  $< \Delta >_i$ , составляет 1,33%.

### Список литературы

1. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation: дата введения 1974. – Ottawa, Ontario, Canada: The International Commission on Radiological Protection, 1996. – 205 с.



С.В. КОЛЕСНИКОВ, И.С. ЛЕВЦОВ, А.П. ДЕНИСЕНКО  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ ДОЗИМЕТРА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА ZnS+6LiF**

В данной работе представлены результаты разработки и тестирования системы сбора и передачи данных с детектора на обрабатывающее устройство с помощью современного микроконтроллера ESP32 с поддержкой Wi-Fi соединения.

S.V. KOLESNIKOV, I.S. LEVTSOV, A.P. DENISENKO  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **AUTOMATION OF THE OPERATION OF A NEUTRON RADIATION DOSIMETER BASED ON ZnS+6LiF SCINTILLATOR**

This paper presents the results of the development and discovery of a data acquisition and transmission system with a detector on a processing device using a modern ESP32 microcontroller with support for Wi-Fi connections.

Во время работы с дозиметром нейтронного излучения на основе сцинтиллятора ZnS+6LiF [1] для повышения автономности, мобильности и скорости развертывания установки была разработана система дистанционной передачи данных от детектора на обрабатывающее устройство с помощью Wi-Fi соединения. Для решения этой задачи был использован микроконтроллер ESP32, реализованный в виде платы Piranha ESP32

Piranha ESP32 это плата на микроконтроллере Espressif ESP32-WROOM-32, с тактовой частотой до 240 МГц, с помощью которой можно создавать устройства интернет вещей, управляемых на расстоянии. Тактовая частота в 240 МГц платы Piranha ESP32 позволяет использовать её как систему сбора и передачи данных от детектора на приемное устройство.

Для передачи данных на обрабатывающее устройство, была разработана программа для Piranha ESP32, которая позволяет передавать данные на сервер, где осуществляется сбор и хранение информации. Доступ к управлению процессом сбора данных и к результатам измерения возможен с любого устройства, где есть WEB-браузер и выход в интернет. На экран пользователя выводится информация, получаемая с детектора, и имеется функционал для управления процессом измерения.

Для проверки корректной работы системы сбора и передачи данных на всех каналах для сбора данных был проведён ряд экспериментов [2], таких как предельная загрузка на один канал, допустимые параметры входного импульса от детектора, расстояние на котором осуществляется стабильная передача данных между системой сбора данных и точкой доступа [3].

В целом работа данной системы показала удовлетворительные результаты и обладает следующими параметрами: количество одновременно работающих каналов сбора данных – 2, предельная частота следования импульсов до 100 кГц, удаленность системы сбора данных от точки доступа – до 100 м прямой видимости (без размещения на устройстве приемо-передающей антенны).

### *Список литературы*

1. В. Н. Марин [и др.]. Новый тип стинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодах // - Москва : ИЯИ, 2015. - 12 с.
2. Е.В. Рябева. Статистические методы обработки результатов измерений (с примерами в среде Mathcad) // М.: Буки-Веди, 2019. – 396с.
3. В.В. Дмитренко, В.Т. Самосадный, В.В. Кадилин [и др] // Приборы и системы управления №9, 1998, с. 60.

## ОЦЕНКА МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТОПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Рассмотрен метод нахождения массы изотопа в веществе на основе спектров наведенной активности после облучения потоком быстрых нейтронов генератора ИНГ-07Т. Проведен эксперимент по определению массы алюминия в металлической пластине и в оксиде алюминия. Определена погрешность массы и проанализированы факторы, вносящие основной вклад в погрешность.

D.V. LUNEV, E.V. RYABEVA, A.P. DENISENKO  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ESTIMATION OF MASS CHARACTERISTICS OF ISOTOPES USING NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS ON THE EXAMPLE OF ALUMINUM OXIDE

A method for finding the mass of an isotope in a substance based on the spectra of induced activity after irradiation with a fast neutron flux of the ING-07T generator is considered. An experiment was carried out to determine the mass of aluminum in a metal plate and in aluminum oxide. The mass uncertainty is found and the factors making the main contribution to the uncertainty are analyzed.

Нейтронно-активационный анализ часто используется при решении задач элементного анализа вещества. Он основан на регистрации вторичного излучения веществ после их облучения потоком нейтронов.

В работе рассмотрена одна из методик определения массы элемента в веществе на основе спектра вторичного излучения. Расчет массы на основе спектров вторичного гамма-излучения вещества может быть проведен по следующей формуле:

$$m = \frac{N_{\text{ппп}} \lambda e^{\lambda t_{\text{охл}}} M}{\varphi G_{\text{го}} G_{\text{од}} \varepsilon_{\text{внутр}} \eta (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) N_{\alpha} \sigma C}$$

Таким образом, зная количество отсчетов в пике полного поглощения  $N_{\text{ппп}}$ , постоянную распада  $\lambda$ , время облучения  $t_{\text{обл}}$ , измерения  $t_{\text{изм}}$  и охлаждения  $t_{\text{охл}}$  (переноса вещества после облучения к детектору для регистрации спектра наведенной активности), плотность потока нейтронов  $\varphi$ , геометрические факторы при облучении вещества  $G_{\text{го}}$  и регистрации спектра  $G_{\text{од}}$ , внутреннюю эффективность детектора для энергии, соответствующей энергии испускаемых частиц,  $\eta$  и микроскопическое сечение реакции  $\sigma$ , в результате которой образуется вторичное излучение, для энергии нейтронов, облучающих вещество, можно определить массу элемента в веществе.

Для проверки данного метода был проведен эксперимент с тонкой алюминиевой пластинкой. Определена масса алюминия в пластинке на основе спектров вторичного гамма-излучения реакции  ${}^{13}\text{Al}^{27}(\text{n}, \text{p}){}^{12}\text{Mg}^{27}$ . Полученная масса совпала с действительной массой пластинки в пределах погрешности и представлен в таблице ниже.

$m_{\text{эксп}}$ , Г	$m_{\text{теор}}$ , Г	Дата эксперимента
$6.2 \pm 0.8$	6.62	01.12.2022

Данный эксперимент доказал применимость описанного выше метода. Далее, аналогичным образом была определена масса алюминия в оксиде алюминия и проведено сравнение со значением массы, рассчитанной исходя из массы образца и относительной массы алюминия в соединении. Полученный результат совпал с действительной массой алюминия в образце и представлен в таблице ниже.

Энергия пика, кэВ	$m_{\text{эксп}}$ , Г	$m_{\text{теор}}$ , Г	Дата эксперимента
843	$15.7 \pm 2.1$	13.76	15.12.2022
1014	$15.0 \pm 2.0$	13.76	15.12.2022

Анализ факторов, влияющих на погрешность определения массы, показал, что основной вклад вносит погрешность сечения реакции.

### Список литературы

- Fleming R.F., Lindstrom R.M. // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles. - 1987. - V 113, # 1. p. 35 - 42.

Е.Э. ЛУПАРЬ, И.В. УРУПА, Е.В. РЯБЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ МАКЕТА МНОГОКАНАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЗАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ**

В докладе приводятся результаты исследования характеристик детектора нейтронов на основе кремниевых фотомножителей (SiPM) и пластмассового сцинтиллятора с возможностью раздельной регистрации нейтронов и гамма-излучения, оптимизированного для увеличения входной загрузки. Для этой цели используется макет многоканального детектора нейтронов, объединяющий 4 независимых идентичных спектрометрических канала регистрации, каждый из которых включает пластмассовый сцинтиллятор EJ-276 9x9x20 мм, просматриваемый SiPM 6x6 мм SensL C-серии и предварительный усилитель. Обработка сигналов осуществляется дигитайзером CAEN VX1730SB. Приводятся результаты тестовых измерений на изотопном источнике PuBe и генераторе 14 МэВ нейтронов ИНГ-27, оцениваются параметры разделения.

E.E. LUPAR, I.V. URUPA, E.V. RYABEVA

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **ESTIMATION OF THE QUALITY OF NEUTRON AND GAMMA RADIATION SEPARATION FOR A MULTICHANNEL DETECTOR PROTOTYPE OPTIMIZED TO INCREASE THE LOADING CAPACITY**

The report presents the results of a study of neutron detector based on a plastic scintillator with the possibility of separate detection of neutrons and gamma radiation and silicon photomultipliers (SiPM), optimized to increase the input load. For this purpose, the prototype of a multichannel neutron detector is used, which combines 4 independent identical spectrometric registration channels, each one includes a EJ-276 9x9x20 mm plastic scintillator, SiPM 6x6 mm SensL C-series and a preamplifier. Signal processing is carried out by CAEN VX1730SB digitizer. The results of test measurements with the PuBe isotope source and the ING-27 14 MeV neutron generator are presented, and the separation parameters are estimated.

Измерение энергетических спектров от различных источников нейтронного излучения является сложной и актуальной задачей, важной как для ядерной физики, так и для практических задач ядерной энергетики, радиационной безопасности и др. На кафедре 24 НИЯУ МИФИ разрабатывается спектрометр нейтронов, построенный на основе методики дискриминации регистрируемых частиц по форме импульса (PSD) [1,2].

В рамках этой работы было изготовлено 2 макетных детектора: на основе сцинтиллятора стильбен/EJ-276 большого размера (2') и вакуумного ФЭУ с задачей достижения наилучших характеристик по разрешению и качеству разделения, а также макет многоканального детектора, использующего сцинтилляторы малого размера, просматриваемые SiPM [3,4]. Второй макет разрабатывался для изучения возможности расширения рабочего диапазона детектора по входной загрузке (регистрируемому потоку нейтронного излучения), в частности, при работе с импульсными источниками нейтронов с длительностью импульса ~десятков мкс, при сохранении удовлетворительного качества разделения. Для этой цели в макете используются многоканальность с независимой обработкой сигналов, позволяющая пропорционально увеличить статистику в спектрах для нейтронных импульсов, с одной стороны, а также минимизация длительности сигнала с детектора аппаратными и программными средствами, с другой. Уменьшение длительности сигнала, как посредством изменения его формы, так и уменьшением времени интегрирования (неполное собирание заряда медленной компоненты высвечивания), приводит к снижению параметра разделения. В методике PSD для оценки качества разделения применяется параметр FoM (Figure of Merit): отношение расстояния между максимумами пиков нейтронов и гамма-излучения на PSD-диаграмме к их суммарной ширине. В общем случае разделение считается хорошим, если  $FoM \geq 1,27$  [5], что соответствует расстояниям между максимумами пиков  $\geq 3$  суммарных среднеквадратичных отклонений. Для макета на ФЭУ FoM составляет 1,3-1,4, для многоканального макета допустимым значением FoM принят уровень 0,7-0,8 (обеспечивающий разделение на уровне 1,6-1,9 $\sigma$  при пороге 100-200 кэВee).

### *Список литературы*

1. F.D. Brooks. // Nuclear Inst. and Methods, vol. 4 (1959), pp. 151-163.
2. E.V. Ryabeva et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 1034, 166791.
3. M.P. Taggart, C. Payne and P.J. Sellin. // Journal of Physics: Conference Series 763 (2016), 012007.
4. F. Ferrulli et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1010 (2021), 165566.
5. N. Zaitseva et al. // Nuclear Inst. and Methods A 668 (2012), pp. 88-93.

## АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Спроектирована архитектура, которая позволяет проводить автоматизированное управление квазистационарным плазменным ускорителем и осуществлять сбор данных о параметрах плазменного потока. В будущем эта система обеспечит работу ускорителя в частотном режиме, позволит регулировать параметры разряда и проводить общий мониторинг оборудования

A.A. MAMONOV, K.M. GUTOROV  
SRC «TRINITI», Moscow, Troitsk, Russia

## THE ARCHITECTURE OF THE AUTOMATED CONTROL AND DATA ACQUISITION SYSTEM OF THE QUASI-STATIONARY PLASMA ACCELERATOR

The architecture of the automated system of the Quasi-stationary plasma accelerator was designed. It allows controlling the plasma accelerator and acquisitioning data of plasma flow. Also, system permit accelerator to work in frequency mode. System adjust the discharge parameters and monitor condition of equipment.

В настоящий момент в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» проводятся экспериментальные исследования работы квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) [1]. Нерешённой проблемой КСПУ является отсутствие централизованного управления подсистемами и диагностическим оборудованием. Наряду с этим существует необходимость запуска установки в частотном режиме (длительность импульса разряда – 1 мс, частота следования импульсов – до 10 Гц). Система должна собирать данные от осциллографов и скоростных камер для измерения плазменного потока по времяпролётной методике и по Доплеровскому смещению [2, 3]. На данном этапе проводилась разработка архитектуры автоматизированной системы управления и сбора данных. Определены требования к системе и ее задачи.

Архитектура системы изображена на рис.1. Промышленный ПК предназначен для отображения параметров эксперимента и изменения уставных значений оператором. ПК в паре с ПЛК проводят общий мониторинг, в который входит измерение температуры отдельных узлов установки и контроль электробезопасности. Данные об уставных значениях и результатах измерений архивируются в базе данных. Подсистема диагностики выполняет сбор данных о параметрах плазменной струи, а именно спектр излучения плазмы, и разряда, то есть его ток и напряжение на электродах. Подсистема управления включает газовую подсистему (манометры и клапаны) и энергетическую подсистему (конденсаторные батареи, блоки зарядки батарей, разрядники). Блок оптических синхросигналов обеспечивает срабатывание узлов в нужные моменты времени. Устройство быстрого управления выполняет оперативный контроль эксперимента.

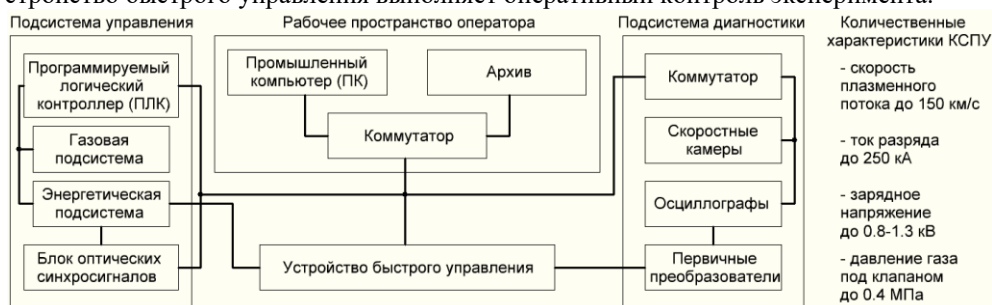


Рис. 1. Общая блок-схема автоматизированной системы управления и сбора данных

За время порядка 90 мс система должна собрать данные измерительных преобразователей, провести их обработку, принять решение о целесообразности следующего разряда и подстроить его уставные значения, отправить инструкции в электронные устройства. Система должна работать в режиме реального времени, иметь распределенную структуру и высокую помехозащищенность. Топология линий связи должна обеспечивать параллельную передачу данных в устройства высокоуровневого и быстрого управления, аналогично [4], со скоростью 1 Гбит/с. Разбиение пространства памяти системы на блоки обеспечивает параллелизм при записи и чтении, что позволяет оператору следить за работой ускорителя в процессе эксперимента [5].

### Список литературы

1. Климов Н.С. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42, №3. С. 52-63.
2. Малютин А.Ю. и др. // XLIX Межд. звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. Сб.тез. 2022. С.163.
3. Ярошевская А.Д. и др. // XLIX Межд. звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. Сб.тез. 2022. С.164.
4. W. Zheng et al. // 2016 IEEE-NPSS Real Time Conference (RT). 2016. P. 1-3
5. S. Li, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. Vol. 57, №. 2. P. 696-699.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В МОЩНОМ МНОГОЛУЧЕВОМ КЛИСТРОНЕ С УЧЕТОМ СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В работе представлены результаты численного моделирования распространения электронных пучков в мощных многолучевых клистронах с учетом собственных магнитных полей в магнитных фокусирующих системах с униполярным и периодическим распределением магнитного поля. Приведена методика расчета амплитуды возникающего собственного магнитного поля и степень отклонения электронного луча в униполярном магнитном поле с учетом собственного магнитного поля.

A.A. MATVEEV, S.P. MASLENNIKOV, V.M. SABLIN  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRON BEAM TRANSPORT IN A POWERFUL MULTIPATH KLYSTRON TAKING INTO ACCOUNT SELF MAGNETIC FIELDS

The paper presents the results of numerical simulation of electron beam propagation in high-power multipath klystrons taking into account their self-magnetic fields in magnetic focusing systems with unipolar and periodic magnetic field distribution. The method of calculating the amplitude of the arising intrinsic magnetic field and the degree of deflection of the electron beam in a unipolar magnetic field, taking into account the self-magnetic field, is given.

Развитие вакуумной электроники привело к увеличению энергии и тока электронного пучка, что обеспечивало повышение выходной мощности приборов. При проектировании электронно-оптических систем (ЭОС), например, мощных релятивистских клистронов, формирующих интенсивные электронные пучки высоких энергий, необходим учет не только электрических, но и магнитных полей, создаваемых электронным потоком. Значительную роль в повышении удельной мощности вакуумных СВЧ приборов играют вопросы, связанные с формированием и транспортировкой интенсивных электронных потоков в протяженных каналах пространства взаимодействия с электромагнитными полями. При небольшом диаметре расположения пролетных каналов и высокого уровня амплитуды токов в многолучевых клистронах, собственные магнитные поля каждого электронного потока влияют друг на друга [1]. Поэтому суперпозиция этих магнитных полей приводит к формированию азимутально направленного отклоняющего магнитного поля (рис.1а), которое для некоторых ЭОС является критическим, при котором наблюдается низкий коэффициент токопрохождения, особенно в ЭОС с протяженными пролетными каналами. [2]

Провести оценку амплитуды собственного магнитного поля на электронные лучи можно с помощью следующего алгоритма. Магнитное поле имеет как продольную  $B_z$  и азимутальную  $B_\theta$  составляющую, поэтому силовая линия является винтовой с углом закручивания  $tg\gamma = B_\theta / B_z$ . Циклотронный радиус траектории находится по формуле  $R = v_z tg\gamma / \eta B_z$ . Причем при малой величине циклотронного радиуса электроны будут двигаться практически по силовой линии магнитного поля. Ввиду того, что все силовые линии будут поворачиваться на один и тот же угол  $\gamma$ , то осевые линии электронных пучков должны отклониться на тот же угол. Тогда на длине  $L$  это отклонение даст смещение  $\Delta m = Ltg\gamma = LB_\theta / B_z$ . Полученные результаты наглядно показали, что увеличение длины прибора и тока пучка приводит к росту влияния собственного магнитного поля электронного потока на его отклонение. На рис. 1б представлены результаты расчетов, выполненных для многолучевого клистрона при ускоряющем напряжении 115 кВ и токе пучка 9,5 А.

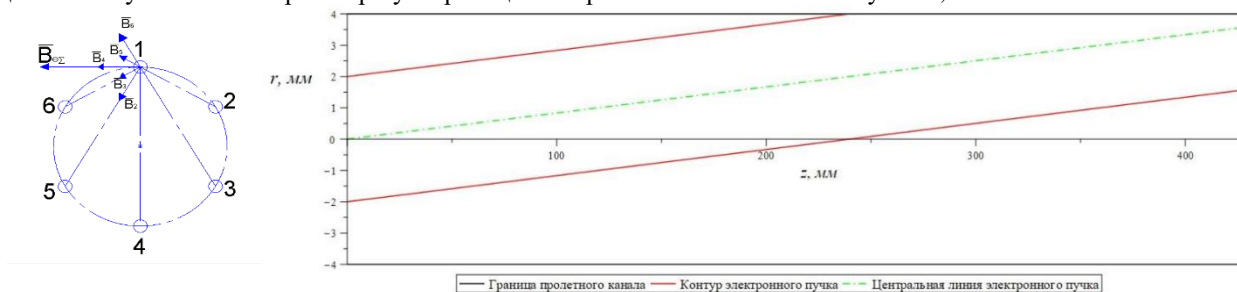


Рис. 1. Суперпозиция собственных магнитных полей (а), результаты расчетов для электронного потока в клистроне (б)

### Список литературы

1. Беломытцев С.Я. Физика сильноточных пучков заряженных частиц // Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 115 с.
2. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. 2012.

## ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ В АМПЛИТУДНОМ МЕТОДЕ

В работе рассмотрены два алгоритма восстановления энергетических спектров по аппаратурным откликам различных детекторов ионизирующего излучения. Приведены результаты тестирования данных алгоритмов (PRIP и GRAVEL) на ряде экспериментальных откликов на источники гамма- (образцовые спектрометрические гамма-источники  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ) и нейтронного (изотопный источник PuBe, генераторы ИНГ-07Т, НГ-150М) излучения для различных типов детекторов. Проведена оценка возможностей алгоритмов и их сравнительный анализ по ряду характеристик.

M.Y. MISHIN, R.F. IBRAGIMOV, E.V. RYABEVA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ITERATIVE ALGORITHMS FOR UNFOLDING SPECTRA WITH THE AMPLITUDE METHOD

The unfolding algorithms (PRIP and GRAVEL) are considered in this work. Algorithms are tested on a number of experimental responses to gamma (model spectrometric gamma sources  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ) and neutron (isotope source PuBe, generators ING-07T, NG-150M) radiation for various types of detectors. The evaluation of the algorithms' capabilities and their comparative analysis on a number of characteristics are carried out.

Восстановление спектров ионизирующих излучений является актуальной задачей в различных областях науки и техники. Знание как можно более точной информации о спектре излучения позволяет повысить точность методов анализа ядерно-физических свойств вещества. К таким методам можно отнести, например, осуществление анализа изотопного состава различных исследуемых объектов (образцы горных пород, объекты, имеющие археологическую ценность, взрывчатые, радиационно- или химически опасные вещества).

В данной работе рассмотрен амплитудный метод спектрометрии, позволяющий программным путем решить задачу отыскания энергетического распределения частиц излучения посредством наличия индивидуальной формы откликов у детектора излучения. Существующие алгоритмы имеют различные показатели точности восстановления и скорости сходимости решения. Кроме этого, результат приближения решения сильно зависит от параметров, используемых в работе алгоритма и начального приближения решения.

В работе представлен пример реализации следующих алгоритмов:

- 1) GRAVEL. Итерационный алгоритм, являющийся модификацией алгоритма SAND-II;
- 2) PRIP (The potential reduction interior point). Пример из семейства алгоритмов внутренних точек, используемых для решения задач линейного программирования.

Данные алгоритмы представляют собой классические итерационные алгоритмы, которые могут быть применимы к решению переопределённых СЛАУ. Проведено тестирование данных алгоритмов путем восстановления спектров гамма- и нейтронного излучений [1] с использованием матриц откликов для сцинтилляционных детекторов на основе алмазного чувствительного элемента (рис. 1), кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и полупроводникового детектора на основе особо чистого германия (ОЧГ), полученных расчётным путем с помощью программного пакета Geant4. Результаты тестирования демонстрируют высокую степень точности восстановления спектров излучений, представляющих собой набор моноэнергетических линий. Текущие результаты работы применимы к реальным задачам восстановления в практической деятельности.

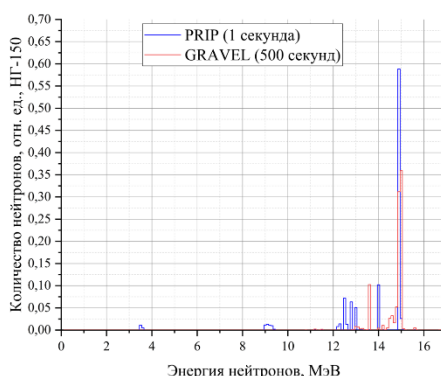


Рис. 1. Результаты восстановления спектра излучения генератора нейтронов НГ-150 для детектора на основе алмазного чувствительного элемента.

### Список литературы

1. V.V. Gaganov E.V. Ryabeva et. al. // J. of Instrumentation. 2022. Vol. 17, №. 9. p.1-11

О.А. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, А.О. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, В.П. ТРЕБУХ<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «НПП «Магратеп», Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен обзор работ, показывающий возможности эффективного использования микроволновой электромагнитной энергии в процессах вскрытия и обогащения минерального сырья. Разработаны проекты установок для эффективной обработки минеральных материалов с продуктопроводом в виде трубы реторты и с конвейерным перемещением сырья. Представлены результаты работы модульной микроволновой установки в различных технологических режимах.

O.A. MOROZOV<sup>1</sup>, A.O. MOROZOV<sup>1</sup>, V.P. TREBUH<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock Company 'NPP 'Magratep', Fryazino, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF MODULAR MICROWAVE INSTALLATIONS FOR EFFICIENT PROCESSING OF MINERAL MATERIALS

The review of works showing the possibilities of microwave electromagnetic energy effective use in processes of opening and enrichment of mineral raw materials is carried out. Installations projects for efficient processing of mineral materials with a product pipeline in retort pipe and with conveyor movement of raw materials have been developed. The results of modular microwave installation in various technological modes are presented.

В последнее десятилетие в России активизировались работы по исследованию микроволнового воздействия на минеральное сырье и внедрению данных технологий. Цели этих научных работ достаточно разнообразны: обезвоживание/сушка, интенсификация технологических процессов обогащения руд и рудных концентратов, восстановление дефицитных металлов из техногенных отходов, шламов и отработанных катализаторов. Например, в 2018 - 2019 г на Ковдорском ГОК успешно испытан опытный образец промышленной установки для высокоинтенсивной тепловой обработки минерального сырья с СВЧ-мощность установки 50 кВт на частоте 915 МГц [1]. Исследования, также проведенные на лабораторных установках мощности, показывают необходимость создания эффективных промышленных установок СВЧ-обработки минерального сырья для горно-обогатительной промышленности с производительностью более 300 кг/час на выходе из установки.

В работе рассмотрены два возможных варианта создания модульной микроволновой установки для эффективной обработки минеральных концентратов. В первом варианте в качестве продуктопровода использовалась вращающаяся труба реторта диаметром до 300 мм расположенная под изменяющимся углом от 3° до 15° к поверхности. Вокруг трубы размещается симметричная шестигранная рабочая камера на гранях которой устанавливаются источники СВЧ излучения. В качестве источников СВЧ излучения использовался разработанный сумматор складывающей мощность 4х магнетронов на частоте 2,46 ГГц в общую мощность 3,2 кВт. Установка имеет блочную конструкцию. В одном блоке устанавливается 2 СВЧ-источника на нечетных гранях шестигранника. Используются смещенные чередующиеся модули на трубе-реторте длиной 6 метров возможно разместить до 10 СВЧ модулей общей СВЧ-мощностью 64 кВт. В трубе возможно организовать циркуляцию воздуха.

Второй вариант установки состоит из стандартных антенных блоков, устанавливаемых на общую раму конвейерной ленты шириной от 300 мм до 800 мм [2]. Антенный блок устанавливался непосредственно над конвейером на расстоянии от 60 мм до 150 мм. Выполнена разработка универсального блока микроволнового нагрева на 6 магнетронов СВЧ мощностью 850 Вт каждый на частоте 2,46 ГГц. Разработанный блок состоит из корпуса, в котором расположены антенный модуль, система воздушного охлаждения и два отделения для размещения коаксиально волноводных переходов с магнетронами и трансформаторными источниками питания к ним. В качестве антенны использовалась плоская рупорная антенна с раскрытием по широкой стенке и с диаграммой направленности в поперечном сечении на 2/3 перекрывающей ширину конвейера. Расположением антенн возможно создавать равномерное облучение в поперечном сечении при ширине конвейера. Разработана конструкция и изготовлен универсальный блок микроволновой обработки, включающий в себя антенный узел, магнетроны с источниками питания и системы охлаждения и управления. Выполнено исследование электродинамических характеристик антенных блоков. Проведенные исследования работы СВЧ-модуля на высоком уровне мощности показали высокую эффективность при обработке минерального сырья. Таким образом, создание микроволновой установки для эффективной обработки минеральных материалов является выполнимой задачей.

### Список литературы

1. А.О. Морозов, В.П. Требух, А.С. Бриенков и др. // Межд. конф. ЛАПЛАЗ-2019, 2019. с. 241-242.
2. A.O. Morozov, A.V. Prokopenko // Int. Conf. Actual Problem Electron Devices Engineer. APEDE 2022, 2022. p. 221-222



Н.А. ХАЛИМОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

## САМОСБОРКА УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Продemonстрировано формирование макромасштабных углеродных структур, характеризующихся  $sp-sp^2$ -гибридизацией за счет самосборки в коллоидных растворах под действием электрического тока, проходящего через коллоидный раствор содержащий металлоуглеродные комплексы. Результатом формирования являются губкоподобные углеродные матрицы (спонжи) допированные наночастицами золота, обладающие высоким коэффициентом поглощения света. Полученные материалы были исследованы методами комбинационного рассеяния света и растровой электронной микроскопии.

N.A. KHALIMOV.

A.G. and N.G. Stoletov Vladimir State University, Vladimir, Russia

## SELF-ASSEMBLY OF CARBON STRUCTURES DURING ELECTROLYSIS

The formation of macroscale carbon structures characterized by  $sp-sp^2$ -hybridization due to self-assembly in colloidal solutions under the influence of electric current passing through the colloidal solution containing metal-carbon complexes is demonstrated. The formation results in sponge-like carbon matrices (sponges) doped with gold nanoparticles that have a high light absorption coefficient. The obtained materials were investigated by Raman scattering and scanning electron microscopy.

Разнообразие вариантов химических связей углерода позволяет образовывать огромное количество аллотропных форм, обладающих набором уникальных свойств. С начала XXI века появилось несколько низкоразмерных углеродных наносистем, таких как фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ) и графен. Они перспективны для применения в нанoeлектронике, фотонике, оптике ТГц диапазонов и так далее [1]. В связи с этим существует очевидная технологическая потребность в разработке надежных и простых в использовании методов синтеза углеродных наноструктур с заданными электрическими и оптическими свойствами. Эффективный контроль над результатами синтеза углерода могут обеспечить наночастицы благородных металлов (НЧ), выступающие в качестве катализаторов роста. Графеновые листы с внедренными металлическими НЧ [2] весьма перспективны для ТГц-генерации благодаря возможности инъекции горячих носителей из НЧ в графеновую матрицу. Также линейные  $sp$ -углеродные цепочки, стабилизированные золотыми частицами [3], демонстрируют образование краевых электронно-дырочных состояний, которые вызывают образование экситонов.

В данной работе продемонстрирован способ самосборки  $sp-sp^2$  углеродных губок в водной среде в процессе электролиза. Для усиления реакции распада исходных частиц и роста кластеров в коллоидной среде, применялся иттербиевый (Yb) волоконный лазер с длиной волны 532 нм, обеспечивающий селективное возбуждение именно золотых НЧ. Результаты электронной микроскопии и спектры комбинационного рассеяния подтверждают образования  $sp-sp^2$  структур (рис. 1).

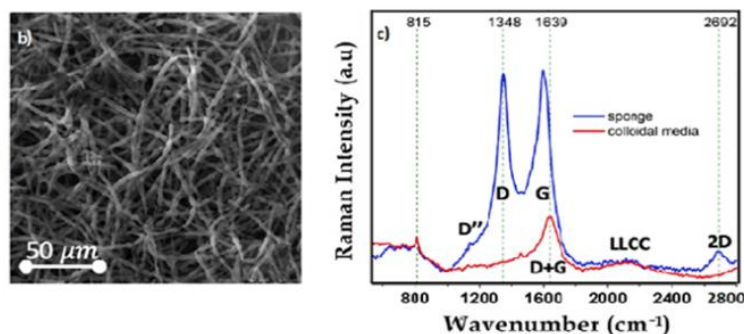


Рис. 1. РЭМ- изображение спонжа (а), б) КР- спектры осажденного спонжа и коллоидного раствора

### Список литературы

1. Bianco, A. // Carbon 2018, 132, 785–801.
2. Zhou Y.; Cao C. et. al. // Matter 2020, 2, 1307–1323.
3. Weinhold, L.; Chatterjee, S.; Klar, P.J. // Commun. Phys. 2019, 2, 18.

Д.И. ЮРКОВ<sup>1,2</sup>, В.А. ЛАВРЕНИН<sup>2</sup>, Б.Д. ЛЕМЕШКО<sup>1,2</sup>, Ю.В. МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>, И.А. ПРОКУРАТОВ<sup>1</sup>

*1 – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия*

*2 – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА БАЗЕ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ**

Описана работа субкилоджоульного импульсного нейтронного генератора СГПФ на базе камеры плазменного фокуса Т19-Л316 при его использовании в учебном процессе на базе кафедры 24 «НИЯУ МИФИ». Генератор СГПФ является источником импульсного нейтронного излучения с энергией 2,5 МэВ, уровнем выхода нейтронов  $\sim 10^6$  нейтр./имп. и длительностью импульса (10–20) нс.

D.I. YURKOV<sup>1,2</sup>, V.A. LAVRENIN<sup>2</sup>, B.D. LEMESHKO<sup>1,2</sup>, Yu.V. MIKHAILOV<sup>1</sup>, I.A. PROKURATOV<sup>1</sup>

*1 – Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

*2 – National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **PULSED NEUTRON AND X-RAY RADIATIONS GENERATOR ON THE BASIS OF PLASMA FOCUS CHAMBERS FOR USE IN EDUCATIONAL PROCESS IN UNIVERSITIES**

The operation of the subkilojoule pulsed neutron generator СГПФ based on the Т19-Л316 plasma focus chamber is described when it is used in the educational process on the basis of Department 24 of the National Research Nuclear University MEPHI. The СГПФ generator is a source of pulsed neutron radiation with an energy of 2.5 MeV and a neutron yield level of  $\sim 10^6$  neutrons/pulse and pulse duration (10–20) ns.

Явление сжатия токоплазменной оболочки в нецилиндрический z-пинч в специальных газоразрядных камерах (плазменный фокус – ПФ), используется как источник большого набора излучений – поток нейтронов с энергией 2,5 или 14 МэВ, мягкое и жесткое рентгеновское излучение, кумулятивные плазменные струи, электронные и ионные пучки. Благодаря объединению большого набора разных типов излучений в одной компактной установке (генератор с камерой ПФ), такие установки являются хорошими и удобными приборами для их использования в учебном и научном процессе в высших учебных заведениях.

В докладе описана работа субкилоджоульного импульсного нейтронного генератора СГПФ на базе камеры ПФ Т19-Л316 при его использовании в учебном процессе на базе кафедры 24 «НИЯУ МИФИ». Генератор СГПФ является источником импульсного нейтронного излучения с энергией 2,5 МэВ, уровнем выхода нейтронов  $\sim 10^6$  нейтр./имп. и длительностью импульса (10–20) нс. Приведены описания работ с СГПФ по определению уровня выхода нейтронов с помощью активационного детектора, по определению временных параметров импульсного жесткого рентгеновского излучения и нейтронного излучения с помощью сцинтилляционных детекторов по времяпролетной методике. Рассмотрена отдельная область исследований, которая затрагивает изучение электротехнических характеристик СГПФ, поскольку в его основе лежит генератор импульсных токов с амплитудой разрядного тока до 200 кА.

Также описано применение генератора в научно-исследовательской деятельности в области воздействия плазменной струи, формируемой в камере ПФ, для модификации поверхностного слоя конструкционных материалов.

**Секция  
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

Руководитель секций	– д.ф.-м.н., профессор Попруженко Сергей Васильевич
Секретарь секций	– д.ф.-м.н., профессор Городничев Евгений Евгеньевич – к.ф.-м.н., доцент Воронова Нина Сергеевна

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9377

E-mail: [gorodn@theor.mephi.ru](mailto:gorodn@theor.mephi.ru), [nsvoronova@mephi.ru](mailto:nsvoronova@mephi.ru)

М.Л. ГОРЕЛИК<sup>1</sup>, Б.А. ТУЛУПОВ<sup>2</sup>, Ш. ШЛОМО<sup>3</sup>, М.Г. УРИН<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московская экономическая школа, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Циклотронный Институт, Техасский А&М Университет, Колледж Стейшн, США

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## О СВОЙСТВАХ ИЗОСКАЛЯРНЫХ ГИГАНТСКИХ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ

В рамках полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели предложено описание основных свойств изоскалярных гигантских мультипольных резонансов в ряде среднетяжелых сферических ядер. Результаты расчетов характеристик и параметров гигантских резонансов сравниваются с соответствующими экспериментальными данными.

M.L. GORELIK<sup>1</sup>, B.A. TULUPOV<sup>2</sup>, S. SHLOMO<sup>3</sup>, M.H. URIN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Moscow Economic School, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, USA

<sup>4</sup>National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

## ON PROPERTIES OF ISOSCALAR GIANT MULTIPOLE RESONANCES IN MEDIUM-HEAVY SPHERICAL NUCLEI

Main properties of the isoscalar giant multipole resonances in a few medium-heavy spherical nuclei are described within the semimicroscopic particle-hole dispersive optical model. The results of the calculations of the characteristics and parameters of giant resonances are compared with the corresponding experimental data.

В последние годы выполнен большой объем теоретических исследований основных свойств изоскалярных гигантских мультипольных ( $L = 0 - 3$ ) резонансов в средне-тяжелых магических ядрах [1, 2]. В работах [2] исследования выполнены в рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели (ЧДДОМ), обладающей уникальными возможностями в описании многообразия гигантских резонансов (ГР) в указанных ядрах. Эти возможности обусловлены совместным учетом основных мод релаксации высокоэнергетических возбуждений типа частица-дырка, ассоциированных с ГР. В рамках ЧДДОМ возможно описание основных характеристик ГР: силовых функций, переходных плотностей, вероятностей прямого однонуклонного распада.

В данной работе представлены результаты дополнительных, по отношению к выполненным в [2], исследований свойств упомянутых ГР. 1) На примерах, относящихся к изоскалярным монополю, дипольному и квадрупольному ГР в <sup>90</sup>Zr, выполнено сравнение расчетных силовых функций с полученными из анализа сечений возбуждения указанных ГР в ( $\alpha, \alpha'$ )-реакциях [3, 4]. На данный момент такой анализ выполняется экспериментаторами с использованием независящих от энергии возбуждения переходных плотностей, полученных в рамках коллективной модели. 2) Для адекватного сравнения с соответствующими экспериментальными данными [5] дополнен метод пересчета полученных в рамках ЧДДОМ относительных вероятностей (брэнчингов) прямого однонуклонного распада ГР. Чтобы учесть существенную зависимость дифференциальной вероятности распада от проницаемости потенциального барьера для испускаемого нуклона, указанная вероятность пересчитывается к наблюдаемой кинетической энергии нуклона по оптикомодельной проницаемости. Эта величина вычисляется в рамках модели без использования свободных параметров. Дополненный метод реализован на ряде примеров. 3) Для описания в рамках ЧДДОМ силовой функции изоскалярного монополю ГР для цепочки четных изотопов олова <sup>112-124</sup>Sn [6] модель обобщена на случай приближенного учета спаривания в нейтронной подсистеме указанных ядер. С учетом большой (по сравнению с удвоенной спаривательной щелью) энергии возбуждения изучаемых ГР обобщение модели реализовано за счет замены чисел заполнения квадратами соответствующих коэффициентов боголюбовского преобразования. Сравнение расчетных характеристик и параметров рассмотренных ГР с соответствующими экспериментальными данными, вместе с результатами полученными в [2], позволяет заключить, что ЧДДОМ является достаточно эффективным инструментом для исследования и описания свойств гигантских резонансов.

### Список литературы.

1. U. Garg and G. Colo // Progr. Part. Nucl. Phys. 2018 V. 101 P. 55.
2. Gorelik M.L., Shlomo S., Tulupov B.A., and Urin M.H. // Phys. Rev. C 2021 V. 103 P. 034302, <https://arxiv.org/abs/2201.04202>.
3. Gupta Y.K., Howard K.B., Garg U., Matta J.T. et al. // Phys. Rev. C 2018 V. 97 P. 064323
4. Youngblood D.H., Lui Y.-W., Krishichayan, Button J. et al. // Phys. Rev. C 2013 V. 88 P. 021301(R).
5. Hunyadi M., Van den Berg A.M., Davids B., Harakeh M.N. et al. // Phys. Rev. C 2007 V. 75 P. 014606.
6. Li T., Garg U., Liu Y., Marks R. et al. // Phys. Rev. C 2010 V. 81 P. 034309.

**ИЗОСКАЛЯРНЫЙ ГИГАНТСКИЙ МОНОПОЛЬНЫЙ РЕЗОНАНС В ИЗОТОПАХ Ca**

Свойства изоскалярного гигантского монополярного резонанса (ГМР) в изотопах Ca изучаются в рамках микроскопической модели, основанной на взаимодействии Скирма. Волновые функции  $0^+$  состояний учитывают связь между одно-, двух- и трехфононными компонентами. Взаимодействие со сложными конфигурациями приводит к перераспределению силы монополярных возбуждений в область низких и высоких энергий возбуждения, а также улучшает описание экспериментальных данных. Показано, что гросс-структура ГМР в изотопах  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$  определяется сложными конфигурациями.

N.N. ARSENYEV, A.P. SEVERYUKHIN

*Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics JINR, Dubna, Russia***ISOSCALAR GIANT MONOPOLE RESONANCE IN THE Ca ISOTOPE CHAIN**

The properties of the isoscalar giant monopole resonance (ISGMR) in the Ca isotope chain are analyzed in the framework of a microscopic model based on a Skyrme interaction. The effects of the coupling between one-, two- and three-phonon terms in the wave functions of  $0^+$  states have been studied. Using the same set of parameters, we describe available experimental data. The effects of the phonon-phonon coupling leads to a redistribution of the main monopole strength to lower energy states and also to higher energy tail. It is shown that the gross structure of the ISGMR in the calcium isotopes  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$  is caused by the complex configurations.

Всестороннее изучение изоскалярного гигантского монополярного резонанса (ГМР) давно является предметом теоретических и экспериментальных исследований [1,2]. Анализ свойств ГМР является важной задачей не только с точки зрения структуры ядра [2,3], но и из-за особой роли, которую они играют при описании многих астрофизических процессов, таких как взрыв сверхновых [4] или эволюция нейтронных звезд [5]. Одним из популярных подходов описания ГМР является квазичастичное приближение случайных фаз с самосогласованным средним полем, полученным с эффективными силами Скирма [2,3]. Изучение распределения монополярной силы в области гигантского резонанса предполагает учет связи простых частично-дырочных конфигураций с более сложными (двух- и трех-фононными) конфигурациями [3,6,7]. Это делает необходимым расчет в большом конфигурационном пространстве. Сепарабельзация остаточного взаимодействия Скирма позволяет обойти эту трудность и проводить вычисления независимо от конфигурационного пространства [8,9]. Такие расчеты не требуют введения новых параметров.

В данном докладе мы анализируем влияние связи между одно-, двух- и трех-фононными компонентами волновых функций на свойстве ГМР в изотопах  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$ . Используя один набор параметров сил Скирма, мы описываем имеющиеся экспериментальные данные [10,11]. Взаимодействие со сложными конфигурациями приводит к перераспределению силы монополярных возбуждений как в область низких, так и в область высоких энергий возбуждения [12]. Показано, что учет этого взаимодействия играет решающую роль в описании тонкой структуры ГМР.

*Список литературы*

1. Blaizot J.P. // *Phys. Rep.* 1980. Vol. 64. P. 171–248.
2. Garg U., Colò G., *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2018. Vol. 101. P. 55–95.
3. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P. // *Universe.* 2021. Vol. 7, P. 145; *Phys. At. Nucl.* 2022. Vol. 85. P. 912–918.
4. Bethe H.A. // *Rev. Mod. Phys.* 1990. Vol. 62. P. 801–866.
5. Lattimer J.M., Prakash M. // *Phys. Rep.* 2000. Vol. 333, P.121–146.
6. Soloviev V.G. *Theory of Atomic Nuclei: Quasiparticles and Phonons.* 1992. Bristol/Philadelphia.
7. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N. // *Phys. Rev. C.* 2021. Vol. 104. P. 024310.
8. Giai N.V., Stoyanov Ch., Voronov V.V. // *Phys. Rev. C.* 1998. Vol. 57. P. 1204–1209.
9. Severyukhin A.P., Voronov V.V., Giai N.V. // *Eur. Phys. Jour. A.* 2004. Vol. 22. P. 397–403.
10. Howard K., Garg U., Itoh M., Akimune H., Bagchi S., Doi T., Fujikawa Y., Fujiwara M., Furuno T., Harakeh M., Hijikata Y., Inaba K., Ishida S., Kalantar-Nayestanaki N., Kawabata T., Kawashima S., Kitamura K., Kobayashi N., Matsuda Y., Nakagawa A., Nakamura S., Nosaka K., Okamoto S., Ota S., Weyhmler S., Yang Z. // *Phys. Lett. B.* 2020. Vol. 801. P. 135185.
11. Olorunfunmi S.D., Neveling R., Carter J., von Neumann-Cosel P., Usman I.T., Adsley P., Bahini A., Baloyi L.P.L., Brümmer W., Donaldson L.M., Jivan H., Kheswa N.Y., Li K.C.W., Marín-Lámbarrí D.J., Molema P.T., Moodley C.S., O'Neill G.G., Papka P., Pellegrini L., Pseudo V., Sideras-Haddad E., Smit F.D., Steyn G.F., Aava A.A., Diel F., Dunkel F., Jones P., Karayonchev V. // *Phys. Rev. C.* 2022. Vol. 105. P. 054319.
12. Arsenyev N.N., Severyukhin A.P. // *Phys. At. Nucl.* 2023. Vol. 86, in press.

В.И. БОНДАРЕНКО<sup>1</sup>, М.Г. УРИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;

## ОПИСАНИЕ ЗАРЯДОВО-ОБМЕННЫХ ГИГАНТСКИХ СПИН-ДИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ В РАМКАХ ЧАСТИЧНО-ДЫРОЧНОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Базовая версия полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели адаптирована к описанию основных свойств зарядовообменных гигантских (3-х компонентных) спин-мультипольных резонансов в среднетяжелых магических материнских ядрах. Адаптированная версия модели использована для вычисления силовых функций спин-дипольных резонансов в материнских ядрах <sup>48</sup>Ca, <sup>90</sup>Zr, <sup>132</sup>Sn и <sup>208</sup>Pb. На этой основе предложена интерпретация структуры указанных резонансов, а также вычислены энергии максимумов, полные ширины и проценты исчерпывания правила сумм. Результаты расчетов, выполненных для указанных ядер, сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

V.I. BONDARENKO<sup>1</sup>, M.H. URIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Research Center “Crystallography and Photonics,” Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russia

## DESCRIPTION OF CHARGE-EXCHANGE GIANT SPIN-DIPOLE RESONANCES IN MEDIUM-HEAVY MAGIC PARENT NUCLEI WITHIN PARTICLE-HOLE DISPERSIVE OPTICAL MODEL

The basic version of the semi-microscopic particle-hole dispersive optical model has been adapted to a description of the main properties of charge-exchange giant (3-component) spin-multipole resonances in medium-heavy magic parent nuclei. An adapted version of the model was used to calculate the strength functions of spin-dipole resonances in the <sup>48</sup>Ca, <sup>90</sup>Zr, <sup>132</sup>Sn and <sup>208</sup>Pb parent nuclei. On this basis, an interpretation of giant-resonances structure is proposed, the maximum energies, total widths and percentages of the sum rule exhaustion are evaluated. The results of calculations performed for mentioned parent nuclei are compared with the available experimental data.

В сообщении излагаются результаты первого этапа объемного теоретического исследования основных свойств зарядовообменных (изовекторных) гигантских спин-дипольных резонансов и их обертонов (ИВГСДР<sup>(+)</sup> и ИВГСДР<sup>(+)</sup>2, соответственно) в материнских ядрах <sup>48</sup>Ca, <sup>90</sup>Zr, <sup>124</sup>Sn, <sup>208</sup>Pb. Выполненное в рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели (ЧДДОМ) исследование является прямым продолжением предложенного в [1] описания основных характеристик и параметров Гамов-Теллеровского и зарядовообменных гигантских спин-монопольных резонансов в указанных материнских ядрах. (В [1] даны ссылки на работы, в которых содержатся как формулировка ЧДДОМ, так и многочисленные приложения модели). К основным характеристикам произвольного гигантского резонанса (ГР) относятся определенные в широком интервале энергий возбуждения силовые функции, переходные плотности и вероятности прямого однонуклонного распада. В данном сообщении представлены следующие результаты: 1) ЧДДОМ адаптирована к описанию зарядовообменных гигантских (3-х компонентных) спин-мультипольных ГР в среднетяжелых магических материнских ядрах. Приведены соотношения модели, непосредственно используемые в расчетах характеристик указанных ГР. По сравнению с [1] эти соотношения расширены за счет описания двойной переходной плотности. 2) Подобранные в [1] специфические параметры модели (интенсивность спин-изоспиновой части сил Ландау-Мигдала, «фрагментационные» параметры), наряду с универсальными (в приложениях ЧДДОМ) параметрами среднего поля использованы в расчетах силовых функций  $J^\pi = 0^-; 1^-; 2^-$  компонент ИВГСДР<sup>(+)</sup> и ИВГСДР<sup>(+)</sup>2 в указанных выше материнских ядрах. Полученные на этой основе усредненные по J силовые функции использованы для интерпретации структуры изучаемых ГР, а также расчетов таких параметров, как энергия максимума, полная ширина, процент исчерпывания правила сумм. Расчетная энергия максимума ИВГСДР<sup>(-)</sup> в ядре <sup>208</sup>Pb оказалась в хорошем согласии с соответствующей экспериментальной величиной [2]. В завершающем этапе исследования предполагаются расчеты переходных плотностей и вероятностей прямого однонуклонного распада рассмотренных ГР.

### Список литературы.

- [1]. V.I. Bondarenko and M.H. Urin, Phys.Rev. C 106, 024331 (2022)
- [2]. H. Akimune, I. Daito, Y. Fujita, M. Fujiwara, M. B. Greenfield, M. N. Harakeh, T. Inomata, J. Jänecke, K. Katori, S. Nakayama, et al., Phys. Rev. C 52, 604 (1995).

А.П. СЕВЕРЮХИН

Лаборатория Теоретической Физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна, Россия

## ДВОЙНОЙ ГАММА-РАСПАД КВАДРУПОЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ ОЛОВА

Впервые оценена ширина двойного  $\gamma$ -распада ядерного состояния  $2^+_{1}$  нейтронно-избыточных изотопов олова  $^{120-132}\text{Sn}$ . Расчеты выполнены с учетом большого конфигурационного пространства в рамках микроскопической модели, построенной на функционале плотности энергии Скирма. Мы получили дипольную поляризуемость, обобщенную на случай двойного  $\gamma$ -распада, и оценили ширину двойного  $\gamma$ -распада относительно одинарного как  $10^{-8}$ .

A.P. SEVERYUKHIN

*Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna, Russia*

## THE DOUBLE $\gamma$ DECAY OF QUADRUPOLE STATES OF NEUTRON-RICH TIN ISOTOPES

The double  $\gamma$  decay of the  $2^+_{1}$  state of neutron-rich tin isotopes  $^{120-132}\text{Sn}$  is studied for the first time. The microscopic model based on the Skyrme energy density functional. The approach enables one to perform the calculations in very large configurational spaces. We estimate the generalized electric dipole polarizabilities involved in the  $\gamma\gamma/\gamma$  decay process and make a prediction for the branching ratio of the competitive  $\gamma\gamma$ -decay relative to its single  $\gamma$ -decay calculated to be  $10^{-8}$ .

Экспериментальное подтверждение двойного  $\gamma$  распада ядерного перехода в условиях конкуренции с одинарным описано в работе [1]. Измеряемая поляризуемость ( $\alpha_{LL}$ ) определяет относительную ширину двойного  $\gamma$  распада. Новый эксперимент [2] уточнил свойства ядерного двойного  $\gamma$  распада, в частности, в отношении вклада различных мультипольностей. Однако ядерный  $\gamma\gamma$ -распад с доминирующим вкладом  $E1E1$  еще не найден.

Используя микроскопические расчеты с функционалом плотности энергии Скирма, мы впервые исследовали свойства  $\gamma\gamma/\gamma$  распада состояния  $2^+_{1}$  четно-четного ядра [3]. Ширина двойного  $\gamma$ -распада состояния  $2^+$  чувствительна к величине смешивания простых и сложных конфигураций Гигантского Дипольного Резонанса (ГДР). Показано, что однофононная ГДР конфигурация и двухфононная конфигурация типа [ГДР $\times 2^+_{1}$ ] играет ключевую роль в расчете ширины [3].

В качестве примера мы рассмотрели  $^{48}\text{Ca}$ , для которого дипольная поляризуемость была недавно измерена. Впервые рассчитано отношение ширин  $\gamma\gamma/\gamma$ -распадов и получено максимальное значение  $10^{-8}$ , которое может быть проверено экспериментально. В рамках предложенной модели мы рассмотрели нейтронно-избыточные изотопы олова  $^{120-132}\text{Sn}$  [4], для которых также существуют экспериментальные оценки дипольной поляризуемости. Таким образом, продемонстрирована возможность введения обобщенной поляризуемости  $\alpha_{E1E1}$  как новой ядерной наблюдаемой.

### Список литературы

1. Walz C. et al. // Nature. 2015. Vol. 526, P. 406.
2. Söderström P.-A. et al. // Nature Commun. 2020. Vol. 11, P. 3242.
3. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N. // Phys. Rev. C. 2021. Vol. 104, P. 024310.
4. Severyukhin A.P., Arsenyev N.N. // Phys. of Atom. Nucl. 2022. Vol. 85, P. 919.



## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ

Рассмотрена тороидальная природа  $1^+$  состояний при 6-11 МэВ в рамках полностью самосогласованного приближения хаотических фаз. Особое внимание уделяется состояниям при 8.24 и 10.04 МэВ для сферического ядра  $^{58}\text{Ni}$ . Эти состояния носят тороидальный характер.

Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

## INDIVIDUAL TOROIDAL STATES IN SPHERICAL NUCLEI

The toroidal nature of  $1^+$  states at 6-11 MeV is considered within the framework of a completely self-consistent quasiparticle random phase approximation. Special attention is paid to the states at 8.24 and 10.04 MeV for the spherical core  $^{58}\text{Ni}$ . These states are toroidal nature.

В эксперименте (DALINAC) [1] для ядра  $^{58}\text{Ni}$  представлены состояния при 8.24 и 10.04 МэВ с высоким значением трансверсального форм-фактора. Задачей нашего исследования было микроскопическое исследование данных состояний в рамках квазичастичного приближения хаотических фаз. Для этого был использован репрезентативный набор сил Скирма. Были получены низкоэнергетические состояния имеющие тороидальный характер.

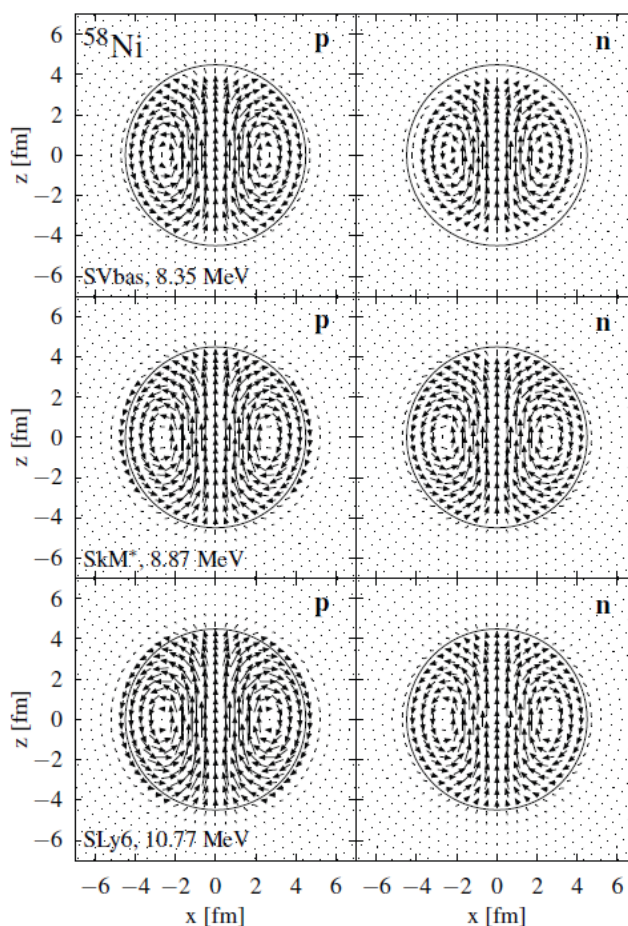


Рис. 1. Протонный и нейтронные токи для низкоэнергетических дипольных состояний для разных сил Скирма.

Токи для основных двухквазичастичных состояний соответствующие данным состояниям также носят тороидальный характер.

### Список литературы

1. W. Mettner, A. Richter, W. Stock, B.C. Metsch, and A.G.M. Van Hees// Nucl. Phys. 1987. Vol. 473, P. 160.

Е. В. МАРДЫБАН<sup>1,2</sup>, Е. А. КОЛГАНОВА<sup>1,2</sup>, Т. М. ШНЕЙДМАН<sup>1</sup>, Р. В. ДЖОЛОС<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,

<sup>2</sup>Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

## ЭВОЛЮЦИЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ЦЕПОЧКЕ ИЗОТОПОВ Zr

Исследованы наблюдаемые свойства низколежащих коллективных состояний цепочки изотопов Zr на основе геометрической коллективной модели. Применяется квадрупольно-коллективный гамильтониан Бора с потенциалом, имеющим два минимума: сферический и деформированный. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными по энергиям возбуждения и приведенными  $B(E2)$  вероятностями переходов.

E. V. MARDYBAN<sup>1,2</sup>, E. A. KOLGANOVA<sup>1,2</sup>, T. M. SHNEIDMAN<sup>1</sup>, R. V. JOLOS<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia,

<sup>2</sup>Dubna State University, Dubna, Russia

## EVOLUTION OF THE COLLECTIVE POTENTIAL IN THE Zr ISOTOPE CHAIN

The observed properties of the low-lying collective states of Zr isotope chain based on the geometrical collective model are investigated. The quadrupole-collective Bohr Hamiltonian with the potential having two minima, spherical and deformed, is applied. Good agreement with the experimental data on the excitation energies and  $B(E2)$  reduced transition probabilities is obtained.

Свойства коллективных низколежащих состояний изотопов Zr указывают на то, что одни из этих состояний в основном сферические, а другие в основном деформированные. В наших предыдущих работах [1,2] было показано, что структура низколежащих коллективных состояний <sup>96</sup>Zr может быть удовлетворительно описана в рамках геометрической коллективной модели, основанной на гамильтониане Бора с потенциалом, подтверждающим существование различных формы ядра. На основании этих результатов возникает вопрос о возможности исследования свойств низколежащих коллективных состояний <sup>92-102</sup>Zr на основе пятимерной геометрической квадрупольной коллективной модели.

Применяется квадрупольно-коллективный гамильтониан Бора, зависящий как от переменных формы  $\beta$ , так и от  $\gamma$ , с потенциалом, имеющим сферический и деформированный минимумы. Относительная глубина двух минимумов, высота и ширина барьера, жесткость потенциала вблизи обоих минимумов определяются таким образом, чтобы добиться наилучшего описания наблюдаемых свойств низколежащих коллективных состояний <sup>92-102</sup>Zr. Получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по энергиям возбуждения и приведенным вероятностям E2-переходов. Описана эволюция коллективного потенциала с ростом  $A$  и найдены распределения волновых функций коллективных состояний в плоскости  $\beta$ - $\gamma$ .

Показано, что низкоэнергетическая структура <sup>92-102</sup>Zr может быть удовлетворительно описана в рамках геометрической коллективной модели с гамильтонианом Бора. Зависимость потенциальной энергии от  $\beta$  фиксируется для наилучшего описания экспериментальных данных. Результирующий потенциал эволюционирует с увеличением  $A$  от наличия только одного сферического минимума в <sup>92</sup>Zr через потенциалы, имеющие как сферический, так и деформированный минимумы, к потенциалу с одним деформированным минимумом в <sup>102</sup>Zr [3].

### Список литературы

1. E. V. Mardyban, E. A. Kolganova, T. M. Shneidman, R. V. Jolos, and N. Pietralla, Phys. Rev. C 102, 034308 (2020).
2. D. A. Sazonov, E. A. Kolganova, T. M. Shneidman, R. V. Jolos, N. Pietralla, and W. Witt, Phys. Rev. C 99, 031304(R) (2019).
3. E. V. Mardyban, E. A. Kolganova, T. M. Shneidman, R. V. Jolos, Phys. Rev. C 105, 024321 (2020).

В. О. НЕСТЕРЕНКО<sup>1,2</sup>, М. А. МАРДЫБАН<sup>1,2</sup>, П.-Г. РЕЙНХАРД<sup>3</sup>, А. РЕПКО<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория теоретической физики, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, 141980, Россия

<sup>2</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская область, 141982, Россия

<sup>3</sup> Институт теоретической физики II, Университет Эрлангена, D-91058, Эрланген, Германия

<sup>4</sup> Институт физики Словацкой Академии Наук, 84511 Братислава, Словакия

## ПОВЕДЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ В СИЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЯДРАХ <sup>24</sup>Mg И <sup>20</sup>Ne

Мы предлагаем самосогласованное описание для момента инерции (МИ) основного состояния в сильно вытянутых легких ядрах <sup>24</sup>Mg и <sup>20</sup>Ne (с равновесными квадрупольными деформациями  $\beta_2=0.605$  и  $0.72$  соответственно [1]). Эти ядра дают интересную возможность исследовать зависимость МИ от спаривания, корреляций в основном состоянии и формы ядра при экстремальных деформациях.

V. O. NESTERENKO<sup>1,2</sup>, M.A. MARDYBAN<sup>1,2</sup>, P.-G. REINHARD<sup>3</sup>, A. REPKO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region 141980, Russia

<sup>2</sup> Dubna State University, Dubna, Moscow Region 141982, Russia

<sup>3</sup> Institut für Theoretische Physik II, Universität Erlangen, D-91058, Erlangen, Germany

<sup>4</sup> Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, 84511 Bratislava, Slovakia

## BEHAVIOR OF MOMENT OF INERTIA IN HIGHLY DEFORMED <sup>24</sup>Mg AND <sup>20</sup>Ne

We suggest the self-consistent description of the ground-state moment of inertia (MI) in highly prolate light nuclei <sup>24</sup>Mg and <sup>20</sup>Ne (with experimental equilibrium axial quadrupole deformations  $\beta_2=0.605$  and  $0.72$ , respectively [1]). These nuclei provide an interesting opportunity to explore dependence of MI on the pairing, ground-state correlations and nuclear shape at extreme deformations.

Расчеты выполнены в рамках трех сил Скирма: SVbas, SkM\* и Sly6 в диапазоне  $0.1 < \beta_2 < 1.6$ . Применяются три подхода [2]: Инглис-Беляев (в рамках метода Хартри-Фока-Боголюбова), Таулеса-Валатина (в рамках приближения случайных фаз [3]) и адиабатическое приближение зависящее от времени (в рамках метода Хартри-Фока). Для подходов Инглиса-Беляева и адиабатического приближения используется программный код SKYAX [4]. Все три подхода показывают, что вблизи равновесной деформации спаривание в ядрах <sup>24</sup>Mg и <sup>20</sup>Ne исчезает и мы имеем максимум МИ. С дальнейшим ростом деформации, выше равновесных значений, наблюдается спад МИ. Такое поведение МИ объясняется перестройкой одночастичных уровней с ростом деформации.

Анализ позволяет выявить основные двухквaziчастичные вклады, ответственные за поведение МИ в различных режимах.

### Список литературы

1. Database <http://www.nndc.bl.gov>
2. P.Ring and P.Schuck, TheNuclearMany-BodyProblem (Springer-Verlag,Berlin,1980)
3. A. Repko, J. Kvasil and V.O. Nesterenko, Phys. Rev. C **99**, 044307 (2019).
4. P.-G. Reinhard, B. Schuetrumpf, and J. A. Maruhn, Comput. Phys. Commun. **258**, 107603 (2021).

Е. В. СКИРДОВА, Н. С. ВОРОНОВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ БОЗЕ-ГАЗОВ СО СТЕПЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Работа посвящена получению универсальных соотношений для бозе-газов со степенным потенциалом взаимодействия посредством вычисления контакта Тана. На малых масштабах в разреженном пределе решается задача рассеяния для медленных частиц, найдена волновая функция и ее связь с парной корреляционной функцией бозе-газа. Получено соотношение для плотности потенциальной энергии, найдена связь плотности потенциальной энергии с контактом Тана.

E. V. SKIRDOVA, N. S. VORONOVA

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## UNIVERSAL RELATIONS FOR BOSE GAS WITH POWER-LAW INTERACTION

Current study is devoted to derivation of universal relations for Bose gases with power-law interactions using the Tan's contact. At short distances in the rarified limit, the scattering problem for slow particles is solved, the wavefunction and its connection to second-order correlation function are defined. Relation for the potential energy density was obtained and its connection with Tan's contact was found.

Контакт Тана – универсальная величина, которая позволяет описать большое количество свойств низкотемпературных газов с короткодействующими взаимодействиями, начиная от распределения импульса, заканчивая пространственной двухчастичной корреляционной функцией. Первоначально данная константа была введена для фермионов [1,2], после чего идея универсальных соотношений была распространена на системы одномерных [3] и двумерных бозонов с дипольными взаимодействиями [4]. Данная работа посвящена вычислению контакта Тана и выводу универсальных соотношений для двумерных и трехмерных бозе-газов с произвольным (интегрируемым на бесконечности) степенным потенциалом взаимодействия.

Рассмотрен двумерный Бозе-газ со степенным взаимодействием  $U(r) = Q/r^\alpha$ , где  $\alpha > 2$ . На малых масштабах ( $r \ll n^{-1/2}$ , где  $n$  – плотность частиц) решается задача рассеяния для медленных частиц и найдена волновая функция, позволяющая определить корреляционную функцию  $g_2(r) \propto \psi^2(r)$  на малых расстояниях. Получены асимптотики данного решения, позволяющие определить коэффициент пропорциональности между  $g_2(r)$  и  $\psi^2(r)$  через контакт Тана  $C$  [4].

Интегрирование парного коррелятора с потенциалом взаимодействия позволяет найти универсальную связь плотности потенциальной энергии системы с контактом Тана:

$$\frac{U}{S} = \frac{\hbar^2 C}{4\pi(\alpha - 2)}.$$

На дальних масштабах (в длинноволновом пределе  $r \gg a$ , где  $a$  – длина рассеяния) парный коррелятор и, соответственно, контакт Тана вычисляются в приближении Боголюбова. Сшивка двух решений на промежуточных расстояниях позволяет определить значение контакта Тана  $C$  через плотность частиц и отношение рассматриваемых масштабов.

Аналогично рассматривается случай трехмерного бозе-газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 21–52–12038.

### *Список литературы*

1. S. Tan, Energetics of a strongly correlated Fermi gas, *Ann. Phys.* **323**, 2952 (2008).
2. S. Tan, Generalized virial theorem and pressure relation for a strongly correlated Fermi gas, *Ann. Phys.* **323**, 2987 (2008).
3. H. Yao, D. Clement, A. Minguzzi, P. Vignolo, and L. Sanchez-Palencia, Tan's Contact for Trapped Lieb-Liniger Bosons at Finite Temperature, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 220402 (2018).
4. J. Hofmann and W. Zwerger, Universal relations for dipolar quantum gases, *Phys. Rev. Res.* **3**, 013088 (2021).

## ОПТИЧЕСКИЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ

Рассмотрены изменение эффективного гамильтониана экситонных поляритонов и изменение эффективного магнитного поля, создаваемого продольно-поперечным расщеплением в микрорезонаторе, обусловленные вращением системы. Рассчитывается степень круговой поляризации света, излучаемого вращающейся поляритонной системой, в зависимости от угла поляриной системы координат в плоскости образца и ее эволюция времени.

F. A. SHABUNIN, N. S. VORONOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OPTICAL SPIN HALL EFFECT IN A ROTATING SYSTEM OF EXCITON-POLARITONS

We consider the changes produced in the effective exciton-polariton Hamiltonian and the effective magnetic field due to the longitudinal-transverse splitting (TE-TM splitting) in a microcavity produced by rotation of the system as a whole. We calculate the degree of circular polarization of the light emitted by the exciton-polariton system depending on the angle of the polar coordinate system on the sample plate, as well as its evolution in time.

В данной работе рассматривается полупроводниковый микрорезонатор в режиме сильной связи между оптической модой и экситонами в квантовой яме. В этом режиме наблюдаются новые собственные моды, называемые экситонными поляритонами. Рассматривается одно из состояний нижней поляритонной ветви с  $\vec{k} \neq 0$ , которое резонансно возбуждается линейно-поляризованным светом. Продольно-поперечное расщепление экситонного закона дисперсии и ТЕ-ТМ расщепление фотонных мод резонатора порождают в поляритонном гамильтониане эффективное магнитное поле, ориентированное в плоскости микрорезонатора, которое приводит к прецессии вектора поляризации поляритонов, если тот ему не параллелен. В результате упругого рассеяния поляритонов и прецессии их псевдоспина наблюдается так называемый оптический спиновый эффект Холла [1]: в двух противоположных квадрантах на плоскости образца возникает преимущественно правая циркулярная ( $\sigma^+$ ) поляризация, а в двух других – левая ( $\sigma^-$ ). Схема эффекта показана на рис. 1. Степень круговой поляризации в ходе такого процесса выражается как  $\rho_c(\theta) = \pm \Omega t \sin(2\theta)/(1 + \Omega^2 \tau^2)$ .

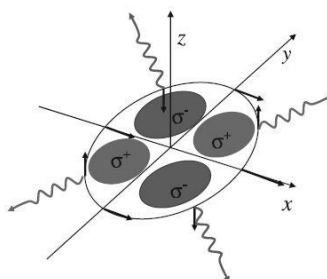


Рис. 1. В первой и третьей четвертях псевдоспины поляритонов параллельны оси Z, что соответствует право поляризованному излучению, во второй и четвертой – антипараллельны оси Z, что соответствует право поляризованному излучению [1]

В данной работе рассматривается динамика поляризаций (псевдоспинов) поляритонной системе при наличии вращения вокруг оси Z. Получено преобразование эффективного гамильтониана, описывающего экситон-поляритонную систему в микрорезонаторе с продольно поперечным расщеплением, а именно,  $\hat{H} = \hat{R} \hat{H}_0 \hat{R}^\dagger - \hbar \vec{\omega}_z \hat{L}_z$ , где  $\hat{R}$  – оператор вращения,  $\hat{H}_0$  – гамильтониан стационарной системы,  $\hat{L}_z$  – оператор углового момента. Данное преобразование позволяет вывести новый вид проекций эффективного магнитного поля на оси x и y. Решаются уравнения эволюции для псевдоспинов, с учетом члена, описывающего поток поляритонов из начального состояния, и слагаемого, учитывающего конечное время жизни поляритонов, совместно с уравнением, описывающим динамику населенности поляритонов в рассеянном состоянии. Получено выражение для степени круговой поляризации света, излучаемого вращающейся системой экситонных поляритонов, в зависимости от времени.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20–52–7816 (совместно с Национальным исследовательским советом Италии).

### Список литературы

1. A. Kavokin, G. Malpuech, and M. Glazov, Optical Spin Hall Effect, Phys. Rev. Lett. 95, 136601(2005).

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГИБРИДИЗОВАННЫХ ЭКСИТОНОВ В БИСЛОЯХ MoS<sub>2</sub>

Исследуется взаимодействие между дипольными экситонами в бислое дихалькогенидов переходных металлов с учетом их гибридизации с прямыми экситонами. Получены выражения для матричных элементов взаимодействия различных типов экситонов в бислое с учетом как прямых, так и обменных процессов в зависимости от переданного импульса.

V. A. MASLOVA, N. S. VORONOVA

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian Quantum Center, Skolkovo Innovation Center, Moscow, Russia

## INTERACTION OF HYBRID EXCITONS IN MoS<sub>2</sub> BILAYERS

We study the interaction between indirect (dipolar) excitons in transition metal dichalcogenide bilayers accounting for the hybridization with the direct excitons. Expressions for the matrix elements of the interaction of different types of excitons in a bilayer, taking into account both direct and exchange processes dependent on the transferred momentum are obtained.

Дипольные экситоны в бислоях дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) и их гибридизация с прямыми экситонами открывает путь к изучению и наблюдению многочастичных квантовых явлений [1]. Взаимодействие между экситонами в таких структурах детально не изучено, так как из-за пониженной экранировки потенциал взаимодействия носителей заряда отличается от кулоновского описания и описания Рытовой – Келдыша [4].

В работе исследуется взаимодействие дипольных экситонов в бислое MoS<sub>2</sub>, которые являются гибридизованным состоянием непрямых экситонов А-типа (hIX) и прямых В-экситонов (hB). Учитывая делокализацию дырок между двумя слоями, мы получаем систему уравнений Ванье, описывающую амплитуды прямых и непрямых экситонов как для hIX, так и hB, решение которой позволяет теоретически определить расщепление между состояниями hIX и hB и из сравнения с экспериментальными спектрами поглощения [2, 3] извлечь константу туннелирования.

Проведен расчет матричных элементов взаимодействия для различных видов экситонов с учетом как прямых, так и обменных процессов и получена зависимость полного взаимодействия непрямых и гибридизованных дипольных экситонов от переданного импульса (рис. 1a,b). Видно, что взаимодействие дипольных гибридизованных экситонов слабее, чем взаимодействие непрямых А-экситонов за счет примеси прямого В-состояния, но остается достаточно сильным.

В пределе низкой плотности полученные зависимости позволяют оценить константу взаимодействия гибридизованных дипольных экситонов в бислое MoS<sub>2</sub>:  $V_{hIX}^{hBN}(0) \approx 2,0$  эВ·нм<sup>2</sup>,  $\bar{V}_{hIX}^{hBN}(0) \approx -1,5$  эВ·нм<sup>2</sup>,  $V_{hIX}^{vac}(0) \approx 7,0$  эВ·нм<sup>2</sup>,  $\bar{V}_{hIX}^{vac}(0) \approx -6,6$  эВ·нм<sup>2</sup>, где  $V(\bar{V})$  обозначает взаимодействие экситонов с параллельными (антипараллельными) дипольными моментами. Отметим, что хотя полученное значение  $V_{hIX}^{hBN}(0)$  согласуется с предыдущими исследованиями [3], эти константы взаимодействия не могут точно описать экспериментальное синее смещение линии непрямого экситона в спектре отражения бислоя [2], поскольку диполь-дипольное взаимодействие нельзя аппроксимировать контактным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 21–52–12038.

### Список литературы

1. I. C. Gerber, E. Courtade, S. Shree et al., Interlayer excitons in bilayer MoS<sub>2</sub> with strong oscillator strength up to room temperature, Phys. Rev. B 99, 035443 (2019).
2. B. Datta, M. Khatoniari et al., Highly nonlinear dipolar exciton-polaritons in bilayer MoS<sub>2</sub>, Nat. Commun. 13, 6341 (2022).
3. C. Louca, A. Genco, S. Chivazzo et al., Nonlinear interactions of dipolar excitons and polaritons in MoS<sub>2</sub> bilayers, arXiv:2204.00485 (2022).
4. N. A. Asriyan, I. L. Kurbakov, A. K. Fedorov, and Yu. E. Lozovik, Optical probing in a bilayer dark-bright condensate system, Phys. Rev B 99, 085108 (2019).

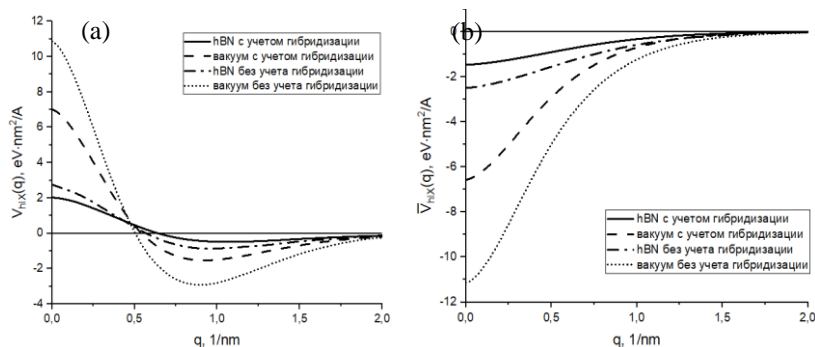


Рис. 1. Матричный элемент взаимодействия hIX в случае параллельных (a) и антипараллельных (b) диполей.



А. ГРУДИНИНА<sup>1</sup>, М. ЭФТИМИО-ЦИРОНИ<sup>2,3</sup>, В. АРДИЦЦОНЕ<sup>2,3</sup>, Д. САНВИТТО<sup>3</sup>, Н. ВОРОНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Университет Саленто, Экотекне, Лечче, Италия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский совет, Институт нанотехнологий, Лечче, Италия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОГО КОНДЕНСАТА В СВЯЗАННОМ СОСТОЯНИИ В КОНТИНУУМЕ

Изучены коллективные возбуждения бозе-конденсата экситонных поляритонов в волноводе с насечками, проведено сравнение с экспериментальными данными.

A. GRUDININA<sup>1</sup>, M. EFTHYMIU-TSIRONI<sup>2,3</sup>, V. ARDIZZONE<sup>2,3</sup>, D. SANVITTO<sup>3</sup>, N. VORONOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Università del Salento, Campus Ecotekne, 73100 Lecce, Italy

<sup>3</sup>CNR Nanotec, Institute of Nanotechnology, 73100, Lecce, Italy

## INVESTIGATION OF ELEMENTARY EXCITATIONS OF A BOUND-IN-THE-CONTINUUM EXCITON-POLARITON CONDENSATE

We theoretically analyze and compare with experimental observations the Bogoliubov spectrum of the exciton-polariton Bose-condensate in a waveguide with gratings.

Связанные в континууме состояния наблюдаются в различных системах, в том числе в волноводах с насечками [1]. В оптических волноводах с насечками две распространяющихся навстречу друг другу фотонных моды могут связываться, что приводит к формированию двух новых фотонных мод, одна из которых демонстрирует связанное в континууме состояние при нулевом импульсе, характеризующееся отсутствием радиационных потерь. В недавней работе [2], где рассматривалась система, состоящая из такого волновода с погруженными в него квантовыми ямами, было показано, что данные фотонные моды могут, в свою очередь, связаться с экситоном и образовать четыре поляритонных моды, закон дисперсии самой нижней из которых является седлом вокруг состояния  $k=0$ . Также в работе было продемонстрировано, что с усилением накачки поляритоны конденсируются в седловой точке, которая является (квази-)связанным в континууме состоянием с очень долгим временем жизни, а не в точках глобального минимума.

В работе изучен спектр коллективных возбуждений связанного в континууме поляритонного конденсата. Применяя ранее развитое описание Хартри-Фока-Боголюбова для поляритонов [3], мы получили сильно анизотропный спектр боголюбовских возбуждений (рис. 1), который хорошо согласуется с экспериментальными данными. Были предсказаны некоторые специфические свойства спектра, такие как формирование в  $k=0$  точки локального минимума, уплощение спектра вдоль  $k_y$  при ненулевых  $k_x$  и его дальнейшая линейзация с ростом  $k_y$ . Кроме того, было продемонстрировано возникновение возбужденных состояний на одной энергии с конденсатом, так что поляритоны могут легко рассеиваться в эти состояния из макроскопически-заселенного долгоживущего состояния в  $k=0$ ; однако, эти возбужденные состояния обладают коротким временем жизни и поэтому хорошо видны в спектре фотолюминесценции.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-52-7816 (совместно с Национальным исследовательским советом Италии) и Фондом развития теоретической физики и математики «Базис», проект № 22-1-5-30-1.

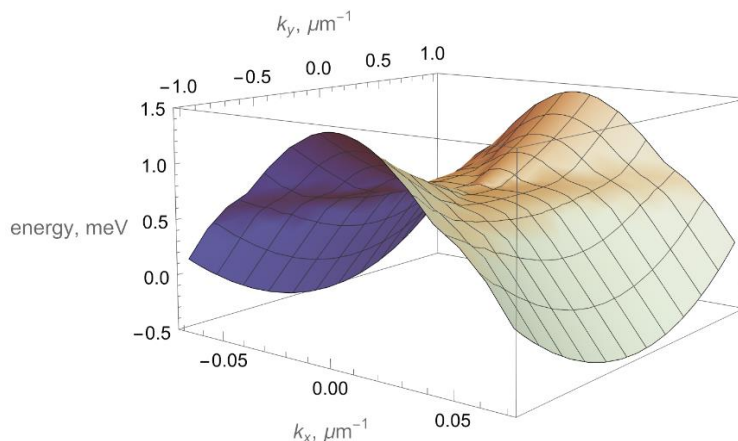


Рис. 1. Спектр элементарных возбуждений конденсата в седловой точке.

### Список литературы

1. Hsu C. W., Zhen B., Soljacic M. et al. // Nat. Rev. Mater. 2016. Vol. 1, №9. P. 1-13
2. Ardizzone V., Riminucci F., Sanvitto D. et al. // Nature 2022. Vol. 605, №. 7910. P. 447-452
3. Grudinina A., Kurbakov I., Lozovik Yu., Voronova N. // Physical Review B 2021. Vol. 104, №. 12. P. 125301



М. А. ПОСАЖЕНКОВ, Н. С. ВОРОНОВА

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ЭФФЕКТЫ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И САМОЛОКАЛИЗАЦИИ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОМ БОЗЕ-КОНДЕНСАТЕ

Рассматривается система уравнений Гросса-Питаевского с накачкой и утечкой для описания двухкомпонентного экситон-поляритонного бозе-эйнштейновского конденсата с резонансной оптической накачкой. Исследуется влияние запаздывающего локального подогрева кристаллической решетки на пространственно-временную динамику системы (эффект самолокализации экситонов). Проводится сравнение с экспериментом.

M. A. POSAZHENKOV, N. S. VORONOVA

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## EFFECTS OF RETARDATION AND SELF-LOCALIZATION IN AN EXCITON-POLARITON BOSE CONDENSATE

We consider a set of coupled driven-dissipative Gross-Pitaevskii equations describing two-component Bose-Einstein condensate of exciton-polaritons in presence of resonant optical pump. We study the influence of local retarded heating of the crystal lattice on the spatio-temporal dynamics of the system (the self-localization effect). Simulation results are compared with experiment.

Экситонные поляритоны в микрорезонаторе – это полупроводниковая система, позволяющая наблюдать различные коллективные бозонные эффекты, такие как бозе-конденсация, сверхтекучесть и др. В экспериментальной работе [1] докладывалось об эффекте поляритонной самолокализации. Авторы наблюдали, что, несмотря на отталкивательные взаимодействия, поляритонный конденсат через некоторое время после накачки образует поток, направленный к центру пятна накачки, после чего частицы локализируются в небольшой (по сравнению с областью накачки) области, где остаются в течение продолжительного времени.

В [1] обсуждается возможный механизм подобной самофокусировки системы: большие плотности экситонов разогревают кристаллическую решетку полупроводника, так как усиливается экситон-фононное взаимодействие и поляритонный эффект Оже. Из-за подогрева решетки происходит сужение запрещенной зоны, что эффективно меняет экситон-фотонную отстройку и приводит к красному смещению нижней ветви поляритонной дисперсии. Данный процесс учитывается локально (в каждой точке системы), с учетом запаздывания по времени по сравнению с увеличением экситонной плотности в системе и тепловой релаксации кристаллической решетки:

$$\Delta E(r, t) = -\frac{b}{T_R} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_R}\right) |\psi_{ex}(r, \tau)|^4 d\tau, \quad (1)$$

где  $b$  – фитирующий параметр,  $T_R$  – время тепловой релаксации,  $\psi_{ex}$  – макроскопическая волновая функция экситонной компоненты поляритонного конденсата. Данная работа посвящена теоретическому исследованию влияния создаваемого эффективного удерживающего потенциала (эффекта коллективного полярона) на временную динамику системы в различных режимах (в зависимости от параметров накачки).

Численное моделирование с учетом сложных эффектов утечки и резонансной накачки позволяет провести подробный анализ системы и влияния эффектов подогрева с запаздыванием. Изучаются различные режимы, включающие отсутствие локализации (простая диффузия конденсата), расходящиеся цилиндрические волны (в срезе плотности наблюдается несколько пиков) и режим сильной локализации (когда все частицы скапливаются в центральной области много меньше пятна накачки). Проводится сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20–52–7816.

### *Список литературы*

1. L. Dominici, M. Petrov, M. Matuszewski et al. // Nat. Commun. **6**, 8993 (2015).

А. Б. КУКУШКИН, А. А. КУЛИЧЕНКО

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПРОГУЛКИ ЛЕВИ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ НЕЛОКАЛЬНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Показано, что флуктуации плотности плазмы в токамаке, наблюдаемые с помощью рефлектометрии ЭМ волн, могут иметь турбулентное происхождение, так как показатель спада в распределении Леви для вероятности длины свободного пробега флуктуаций плотности, найденный в формализме интегро-дифференциальных уравнений нелокального переноса флуктуаций в режиме типа «прогулок Леви», оказался близок к его аналогу в эмпирическом законе Ричардсона для гидродинамической турбулентности газов и жидкостей.

A. B. KUKUSHKIN, A. A. KULICHENKO

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## LÉVY WALKS AS A UNIVERSAL MECHANISM OF NONLOCALITY OF TURBULENCE

It is shown that plasma density fluctuations in a tokamak, observed using EM wave reflectometry, can be of turbulent origin, since the decay coefficient in the Lévy distribution for the probability of the free path of density fluctuations found in the formalism of integro-differential equations of non-local transfer of fluctuations in the regime of the "Lévy walks" type, turned out to be close to its counterpart in Richardson's empirical law for the hydrodynamic turbulence of gases and liquids.

Нелокальность гидродинамической турбулентности газов и жидкостей выражается в том, что эмпирический закон Ричардсона (Richardson  $l^3$  scaling law) для квадрата относительного смещения частиц  $R$  как функции времени  $t$  соответствует существенно более быстрому, «супердиффузионному» распространению, по сравнению с диффузионным законом ( $R^2 \propto t$ ). Это стало основанием для подхода [1], предложившего линейное интегро-дифференциальное уравнение переноса, в котором ядро интегрального оператора медленно спадает с ростом расстояния. Это соответствует супердиффузионному (нелокальному) переносу в режиме «прогулок Леви» (т.е. «полетов Леви» [2] с учетом конечной скорости переносчиков, см. обзор [3]).

В [4, 5] сформулирован близкий к [1] подход, основанный на применении концепции прогулок Леви к описанию нелокальных свойств флуктуаций плотности турбулентной среды. Это сделано в терминах переноса резонансного излучения в модели Бибермана-Холстейна (см., напр., обзор [6]), обобщенной на случай конечной скорости переносчиков возбуждения среды и позволившей объединить скейлинги для полетов и прогулок Леви [7]. Учёт нелинейности процессов заключён в предположении существования долгоживущих флуктуаций плотности плазмы (напр., единенных волн типа солитонов). Такая кинетическая модель турбулентной среды позволяет описать динамику статистического ансамбля локализованных возмущений среды, которую можно рассматривать в линейном приближении с учётом следующих процессов: рождение флуктуаций из энергии среды; обратный процесс их исчезновения; движение в среде с конечной длиной свободного пробега; остановка флуктуации без ее исчезновения («захват» бегущей флуктуации) и возобновление движения. При этом феноменологически введенные параметры указанных процессов подлежат восстановлению путём сравнения с экспериментальными данными. Применительно к плазме токамака, такими данными в [4, 5] стали спектральные и пространственные характеристики парной корреляционной функции рассеяния зондирующей ЭМ-волны. Это позволило, в частности, получить универсальное описание связи наблюдаемой квазикогерентной компоненты (Quasi-Coherent Mode) в спектре рассеянных ЭМ-волн в плазме токамаков с процессом типа рассеяния Мандельштама—Бриллюэна (QCM) была впервые обнаружена на токамаке Т-10 [8]).

В настоящей работе показана универсальность механизма нелокальности переноса возмущений в стохастической среде, выражаемой законом динамических парных корреляций типа эмпирического закона Ричардсона для гидродинамической турбулентности газов и жидкостей.

### Список литературы

1. Shlesinger M.F., West B.J., Klafter J. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 11.
2. Shlesinger M., Zaslavsky G.M.; Frisch U. (Eds.) *Lévy Flights and Related Topics in Physics*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1995.
3. Ziburdaev V., Denisov S., Klafter J. // Rev. Mod. Phys. 2015. Vol. 87. P. 483.
4. Kukushkin A.B., Kulichenko A.A. // *Symmetry*. 2022. V. 14, № 6. P. 1265 (32 pages).
5. Кукушкин А.Б., Куличенко А.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. Вып. 2. С. 105-122.
6. Абрамов В.А., Коган В.И., Лисица В.С. Перенос излучения в плазме // Вопросы теории плазмы, под ред. М.А. Леоного-вича и Б.Б. Кадомцева, Москва, Энергоатомиздат, 1982, вып. 12, с. 114.
7. Кукушкин А.Б., Куличенко А.А., Соколов А.В. // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. № 5. С. 978—996.
8. Vershkov V.A., Soldatov S.V., Dreval V.V. // Rev. Sci. Instrum. 1999. Vol. 70. P. 1700.

А. М. НИКИШИН<sup>1</sup>, Г. С. БИСНОВАТЫЙ-КОГАН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

## УСТРАНЕНИЕ ХАББЛОВСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ И МАТЕРИИ В СОВРЕМЕННОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Сформулировано расширение принятой  $\Lambda$ CDM космологической модели, учитывающее действие остаточного инфляционного скалярного поля в современной Вселенной в виде добавочной компоненты тёмной энергии. Исследована возможность существования динамического равновесия между этим полем и тёмной материей, приводящего к изменению закона расширения в период после рекомбинации. Предложенная модель применена к решению проблемы Хаббловского несоответствия, в рамках которой найдены возможные функции связи тёмной материи и дополнительной компоненты тёмной энергии, устраняющие расхождение.

А. М. NIKISHIN<sup>1</sup>, G. S. BISNOVATYI-KOGAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## ELIMINATION OF THE HUBBLE TENSION IN THE PRESENCE OF THE INTERCONNECTION BETWEEN DARK ENERGY AND MATTER IN THE MODERN UNIVERSE

An extension of the known  $\Lambda$ CDM cosmological model is formulated that takes into account the action of the residual inflationary scalar field in the modern Universe in the form of an additional dark energy component. The possibility of the existence of a dynamic equilibrium between this field and dark matter, which leads to a change in the expansion law in the post-recombination period, is investigated. The proposed model is applied to the solution of the Hubble discrepancy problem, and possible functions of the connection between dark matter and an additional dark energy component, which eliminate the tension, have been found.

В современной космологии существует множество нерешённых вопросов, часть из которых связана с природой тёмной энергии и тёмной материи. Предложен ряд космологических моделей, которые основываются на идее инфляционного скалярного поля, принимающегося основной причиной инфляции в ранней Вселенной, а также источником существующего вещества [1-2].

Считается, что переход скалярного поля в вещество оканчивается на ранних стадиях эволюции Вселенной. В работе сделано предположение, что после стадии активного рождения вещества скалярное поле не исчезает, а продолжает взаимодействовать с веществом, находясь вблизи минимума своего потенциала. Данное взаимодействие состоит в превращении скалярного поля в вещество и сопровождается обратным процессом превращения вещества в скалярное поле, что приводит к их динамическому равновесию [3]. Рассматриваем только стадии эволюции после рекомбинации, где тёмная материя (DM) – преобладающий компонент вещества.

Известно, что скалярное поле даёт вклад в плотность энергии, поэтому на протяжении периода после рекомбинации ( $0 \leq z \leq 1100$ ) наряду с постоянной Эйнштейна ( $\Lambda$ ), отражающей постоянную компоненту тёмной энергии, возникает дополнительная меньшая переменная компонента DEV ( $\Lambda_V$ ). В работе предположено, что равновесие скалярного поля и DM выражается в линейной связи плотностей энергии вида  $\rho_{DM} = \alpha(z)\rho_{DEV}$ , где  $\alpha(z)$  – функция красного смещения [4]. Для поддержания равновесия и близким к постоянному соотношению энергий допускается существование широкого спектра масс частиц DM.

Важнейшим космологическим параметром, характеризующим темп расширения Вселенной, является параметр Хаббла  $H(t)$ , современное значение которого есть постоянная Хаббла  $H_0$ . Одна из насущных проблем космологии — Hubble Tension [5], состоит в расхождении значений постоянной Хаббла, измеренных по наблюдениям поздней Вселенной ( $z \leq 1$ ) и по наблюдениям флуктуаций реликтового излучения ( $z \approx 1100$ ) [6]. В работе это несоответствие связывается с ошибкой пересчёта от момента рекомбинации ( $H_{rec}$ ) до настоящего времени ( $H_0$ ) и объясняется отклонением существующей космологической модели от общепринятой  $\Lambda$ CDM модели действием добавочной компоненты DEV на стадиях после рекомбинации. В рамках расширенной модели рассмотрены различные функции  $\alpha(z)$ , позволяющие устранить Хаббловское несоответствие, и показана возможность решения задачи путём введения малой добавки DEV.

### Список литературы

1. A. D. Linde Chaotic inflation // Physics Letters B. — 1983. — Т. 129, № 3/4. — С. 177—181.
2. A. A. Starobinsky Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations // Physics Letters B. — 1982. — Т. 117, № 3/4. — С. 175—178.
3. G. S. Bisnovatyı-Kogan Cosmological Model with Interconnection between Dark Energy and Matter // Universe. — 2021. — Т. 7, № 11. — С. 412; arXiv:2002.05602v1 [astro-ph.CO] 13 Feb 2020.
4. Г. С. Бисноватый-Коган, А. М. Никишин Устранение Хаббловского несоответствия при наличии взаимосвязи темной энергии и материи в современной Вселенной // Астрономический Журнал — 2023. — Т. 100, № 2. — С. 133—143.
5. A.G. Riess The expansion of the Universe is faster than expected // Nature Reviews Physics. —2020. — Т.2, №1. — С.10—12.
6. E. D. Valentino [и др.] In the realm of the Hubble tension—a review of solutions // Classical and Quantum Gravity. — 2021. — Июль. — Т. 38, № 15. — С. 153001.

В. В. ВЕДЕНЯПИН, Н. Н. Фимин, В. М. Чечёткин  
ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## О ВЫВОДЕ ТЕНЗОРА ЭНЕРГИИ-ИМПУЛЬСА И УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ГРАВИТАЦИИ ИЗ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Рассмотрены вывод и свойства уравнений Власова-Эйнштейна.

V. V. VEDENYAPIN, N. N. FIMIN, V. M. CHECHETKIN  
Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## ON THE DERIVATION OF THE ENERGY-MOMENTUM TENSOR AND THE EQUATIONS OF ELECTRODYNAMICS AND GRAVITY FROM THE PRINCIPLE OF LEAST ACTION AND DARK ENERGY

We consider derivation and properties of Vlasov-Einstein equations.

В классических работах (см. [1–4]), уравнения для полей предлагаются без вывода правых частей. Здесь мы даем вывод правых частей уравнений Максвелла и Эйнштейна в рамках уравнений Власова–Максвелла–Эйнштейна из классического, но немного более общего принципа наименьшего действия [5–11]. Получающийся вывод уравнений типа Власова даёт уравнения Власова–Эйнштейна отличные от того, что предлагались ранее [12–15]. Предлагается способ перехода от кинетических уравнений к гидродинамическим следствиям [5–8], как это делалось раньше уже самим А.А. Власовым [4]. В случае гамильтоновой механики от гидродинамических следствий уравнения Лиувилля возможен переход к уравнению Гамильтона–Якоби, как это делалось уже в квантовой механике Е. Маделунгом [16], а в более общем виде В.В.Козловым [17–18]. Таким образом получаются в нерелятивистском случае решения Милна–Маккри, нерелятивистский аналог решений типа Фридмана нестационарной эволюции Вселенной. Это позволяет проанализировать Лямбду Эйнштейна и темную энергию.

### Список литературы

1. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: ЛКИ, 2007.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
3. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975, 696 стр.
4. Власов А.А. Статистические функции распределения. М.: Наука, 1966. 356 стр.
5. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и МГД. Тождество Лагранжа и форма Годунова // Теоретическая и математическая физика. ---2012. Т. 170. № 3. С. 468–480.
6. Веденяпин В.В., Негматов М.-Б. А., Фимин Н.Н. Уравнения типа Власова и Лиувилля, их микроскопические, энергетические и гидродинамические следствия. Изв. РАН. Сер. матем. 2017. Т. 81. № 3. С. 45–82.
7. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и магнитной гидродинамики. Тождество Лагранжа, форма Годунова и критическая масса. СМФН, 2013, том 47, С. 5–17.
8. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова. М.: Физматлит, 2001.
9. Веденяпин В.В. Уравнение Власова-Максвелла-Эйнштейна // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 188. 20 с.
10. Vedenyapin V.V., Fimin N.N., Chechetkin V.M. The system of Vlasov–Maxwell–Einstein-type equations and its nonrelativistic and weak relativistic limits // International Journal of Modern Physics D, 2020. V. 29. № 1. 23 p.
11. Vedenyapin, V., Fimin, N., Chechetkin, V. The properties of Vlasov–Maxwell–Einstein equations and its applications to cosmological models // European Physical Journal Plus. 2020. № 400. 14 с.
12. Cercignani C., Kremer G.M. The relativistic Boltzmann Equation: theory and applications. Boston, Basel, Berlin: Birghause, 2002.
13. Choquet–Bruhat Y., Damour T. Introduction to general relativity, black holes and cosmology. New York: Oxford University Press. 2015.
14. Rein G., Rendall A.D. Global existence of solutions of the spherically symmetric Vlasov–Einstein system with small initial data. Commun. Math. Phys. 150, 561–583, (1992).
15. Kandrup H.E., Morrison P.J. Hamiltonian structure of the Vlasov–Einstein system and the problem of stability for spherical relativistic star clusters // Ann. Phys. 1993. V. 225. P. 114–166.
16. Madelung E. Quantentheorie in hydrodynamischer form (Quantum theory in hydrodynamic form), Z Phys, 40 (1926), 322–326.
17. Козлов В. В. Гидродинамика гамильтоновых систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1 Матем. Мех., 1983, № 6, 10–22;
18. Козлов В. В., Общая теория вихрей, Изд-во Удмуртского ун-та, Ижевск, 1998, 239с.

Н. Н. ФИМИН, В. М. ЧЕЧЕТКИН  
ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## К ВОЗМОЖНОСТИ ОПИСАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ГРАВИТАЦИОННО-СВЯЗАННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ УРАВНЕНИЯ ВЛАСОВА-ПУАССОНА

Установлены критерии формирования нестационарных псевдопериодических структур в системе гравитирующих частиц, описываемых системой уравнений Власова--Пуассона. Исследованы условия ветвления решений нелинейного интегрального уравнения для обобщенного гравитационного потенциала, приводящие к возникновению когерентных сложных состояний относительного равновесия в нестационарных системах массивных частиц.

N. N. FIMIN, V. M. CHECHETKIN  
*M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, Russia*

## ON THE POSSIBILITY OF DESCRIPTION OF LARGE-SCALE GRAVITATING-CONNECTED STRUCTURES ON THE BASIS OF VLASOV-POISSON EQUATIONS PROPERTIES

The criteria for the formation of nonstationary pseudoperiodic structures in a system of gravitating particles described by the system of Vlasov--Poisson equations, are established. Branching conditions for solutions of a nonlinear integral equation for a generalized gravitational potential are studied, leading to the emergence of coherent complex states of relative equilibrium in non-stationary systems of massive particles.

Возникновение крупномасштабных структур малой размерности в космологических моделях с точки зрения многочастичной динамики гравитационно взаимодействующих "элементарных" субструктур (представляющих собой звезды, звездные скопления, галактики и пр.) в настоящее время в большинстве научных публикаций описывается на основе моделей, представляющих собой развитие методики, предложенной Я.Б. Зельдовичем (теория "блинов"). Базирующиеся на этом допущении результаты моделирования эволюционной динамики для ансамбля субструктур позволяют в принципе получить вполне достоверно выглядящую картину строения наблюдаемой части Вселенной; однако при этом необходимо введение определенных предположений и допущений физического плана, которые позволяют упомянутой картине выглядеть непротиворечивой и логически завершенной. Наличие таких дополнительных допущений не является априорно единственным возможным набором условий возникновения войдов и стенок, и их вряд ли следует возводить в ранг постулатов, как это неявно делается в большинстве современных публикаций, посвященных космологическому строению Вселенной. Можно показать, что для описания формирования макроструктур наличие специфического спектра когерентных возмущений гидродинамических параметров среды не является необходимым условием, и анализ возникновения и эволюции этих структур может быть основан на применении более глубокого математического аппарата (например, использующего свойства кинетического уравнения Власова-Пуассона), чем исследование генезиса последствий гидродинамической джинсовской неустойчивости. При этом срок формирования крупномасштабных "неустойчивостей" вариабелен и может быть вынесен за рамки первичных горячих стадий эволюции Вселенной. Последнее фактически делает в определенном смысле излишним привлечение результатов постинфляционной стадии расширения. Модификация межчастичного ньютоновского гравитационного потенциала путем включения в рассмотрение квадратичного по модулю радиус-вектора

слагаемого в правой части его определения (с коэффициентом, пропорциональным космологическому параметру Эйнштейна) приводит к эффективному отрицательному давлению в системе взаимодействующих частиц. Поэтому условие равновесности для элемента материи с учетом антигравитационного воздействия лямбда-члена можно рассматривать как критерий образования макроструктур во Вселенной. При этом становится очевидным ответ на вопрос о существующих масштабах космологической структуры (масштаб, меньший, чем соответствующая условию нулевой суперпозиции сил гравитации и антигравитации, длина волны Джинса, определяемая точкой перегиба обобщенного потенциала Ньютона, приводит к коллапсу равновесного однородного распределения материи, а больший – соответственно, к фрагментации системы). Основной задачей настоящей работы является описание неравновесной динамики статистического ансамбля гравитационно взаимодействующих частиц, в условиях применимости нерелятивистского формализма одночастичных функций распределения пребывающего в состоянии, близком к условно-равновесному (что подразумевает наличие нестационарных распределений частиц с малыми отклонениями по норме с достаточно длительным временем изменения топологии их системы). Рассматривается методика анализа дисперсионных соотношений для системы уравнений Власова-Пуассона, что с физической точки зрения соответствует получению условно-равновесных решений в виде псевдоупорядоченных структур низкой размерности и реализации условий почти-периодического строения системы частиц (обусловленного крупномасштабной "псевдокристаллизацией" системы гравитационно-связанных субструктур). Это реализуется на основе исследования решений системы уравнений Власова-Пуассона и исследуют возможность появления ветвления решений, приводящего к деформации вторичных структур.

*Список литературы*

1. Gurzadyan V.G., Fimin N.N., Chechetkin V.M. // A&A. 2022. Vol. 666, A149. 1–6.



Б. К. НОВОСАДОВ

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия*

## **О МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ ПРИ ПОМОЩИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ**

Получена оценка кинетической энергии системы релятивистских электронов с помощью неравенства Коши – Буняковского, на основе которой предложено вспомогательное скалярное уравнение шрёдингеровского типа с целью квантовохимических исследований энергетических состояний тяжелых химических элементов.

B. K. NOVOSADOV

*V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia*

## **AN ESTIMATION OF HEAVY ATOM ENERGIES WITH THE HELP OF AN AUXILIARY RELATIVISTIC SCALAR WAVE EQUATION**

An estimation of the kinetic energy of a relativistic electron system has been obtained with the help of the Cauchy - Buniakovsky inequality on the base of which an auxiliary scalar equation of a Schroedinger type has been suggested for quantum chemical investigations of energetic states of heavy chemical elements.

Квантовая механика релятивистской системы частиц, взаимодействующих между собой и с внешним электромагнитным полем (это может быть тяжелый химический элемент) не имеет формального оформления, подобного уравнению Шрёдингера для системы частиц. Основным уравнением в релятивистской квантовой механике служит уравнение Дирака для одного электрона. Квадрированное уравнение Дирака, обнаруживающее его связь с уравнением Паули, позволяет сравнить его также с уравнением Шрёдингера, потому что содержит вторые производные по координатам и электромагнитные потенциалы электрона, к которым добавляются спин-орбитальные поправки; последние напоминают своим функциональным видом инерционные вращательные потенциалы в виде обратной квадратичной зависимости от радиуса, связанные с угловым моментом вращения электрона во внешнем поле.

Развитие теории Периодической системы элементов соотносится с применением релятивистских моделей системы электронов в атомах нижней части таблицы Д.И. Менделеева. Обнаружение сверхтяжелых элементов остается фундаментальной проблемой науки и сопряжено с огромными экспериментальными трудностями, а также с вопросами предсказания химических свойств нестабильных электронных систем. Поэтому возрастает принципиальная значимость теории и надежных оценок спектральных и химических свойств тяжелых элементов. В свою очередь, вариационные методы исследования сложных систем опираются на математическую модель, в которой импульсы входят в модельный гамильтониан в виде квадратичных форм, в то время как операторы Дирака содержат линейные формы по импульсам. В работе предлагается выход из этого затруднения и предложено скалярное многочастичное уравнение сравнения шрёдингеровского типа, оператор которого позволяет использовать традиционную вариационную формулировку для развития численных методов оценки энергий тяжелых атомов.

Так, вспомогательное релятивистское волновое уравнение для двух электронов имеет вид (обозначения понятны)

$$E^2 \varphi = q c^2 (\hat{p}_1^2 + m^2 c^2 + \hat{p}_2^2 + m^2 c^2) \varphi, \text{ где } q \in [1, 2].$$

В. П. ЯКОВЛЕВ<sup>1</sup>, С. В. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ<sup>1</sup>, Д. С. ЧУЧЕЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук ФИАН, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ РЕЗОНАНСНЫХ АТОМОВ С ЧАСТИЦАМИ БУФЕРНОГО ГАЗА НА ФОРМУ ВНУТРИДОПЛЕРОВСКОГО РЕЗОНАНСА

Внутридоплеровский резонанс регистрируется по коэффициенту поглощения пробной встречной волны в ячейке с атомами щелочных металлов. Его форма определяется не только эффектом оптической накачки непоглощающего состояния, но и изменением функции распределения по скоростям из-за процессов столкновений резонансных атомов с частицами буферного газа, которые описаны как диффузия в пространстве скоростей

V. P. YAKOVLEV<sup>1</sup>, S. V. PETROPAVLOVSKY<sup>1</sup>, D. S. CHUCHELOV<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS), Moscow, Russia

## INFLUENCE OF RESONANCE ATOMS' COLLISIONS WITH PARTICLES OF BUFFER GAS ON THE SHAPE OF DOPPLER-FREE RESONANCE

Doppler-free resonance in a cell with atoms of alkali metals is registered through the absorption coefficient of a probe wave. Its shape is determined by (i) optical pumping of some undetected state and (ii) change of velocity distribution due to collisions of the resonance atoms with the particles of the buffer gas. The latter are described as diffusion in velocity space.

В недавнем эксперименте [1] был продемонстрирован метод, позволяющий контролировать присутствие нежелательных частиц примесного газа в резонансной атомной ячейке по форме внутридоплеровского резонанса в коэффициенте поглощения пробной волны. В результате столкновений с примесными частицами меняется функция распределения резонансных атомов щелочного металла по скоростям [2,3], что влияет на форму внутридоплеровского резонанса.

Волна накачки и пробное встречное излучение взаимодействуют с резонансными атомами на открытом переходе, когда возбужденное состояние имеет парциальный канал распада в недетектируемое состояние, что приводит к эффекту оптической накачки этого состояния. Кинетика процесса атомных столкновений описывается с помощью уравнения Фоккера-Планка как диффузия в пространстве скоростей.

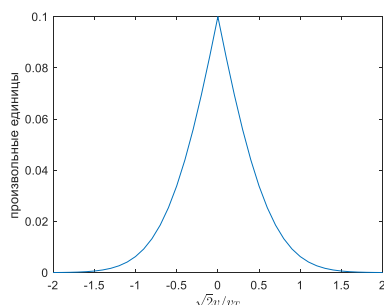


Рис. 1. Форма внутридоплеровского резонанса как функция резонансной атомной скорости в единицах тепловой скорости

В рамках ряда упрощающих предположений удастся получить аналитическое выражение, описывающее стационарный профиль коэффициента поглощения пробной волны при медленном сканировании лазерной частоты (см. Рис.1), которое зондирует доплеровский контур, для различных значений оптических параметров, коэффициента диффузии и констант релаксации. Сравнение с результатами экспериментов показывает, что полученная формула вполне удовлетворительно описывает крылья кривой внутридоплеровского резонанса и, в этом плане, может быть полезной для контроля давления примесного газа, но нуждается в существенной модификации вблизи центра линии, когда обе встречные лазерные волны взаимодействуют с одной и той же группой атомов вблизи нулевой продольной скорости.

### Список литературы

1. Д.С. Чучелов, М.И. Васильковская, В.Р. Васильев и др // Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛАПИАЗ-2022. Сб. научных трудов VIII Международной конференции, Москва 2022, С.86
2. Smith P.W., Hänsch R. // Phys. Rev. Lett. V. 26. 1971. P. 740.
3. Thornton D.E. et al. // Optics Communications. 2011. V. 284. P. 2890.



## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ВКЛАД В ОПТИЧЕСКИЙ КОНДАКТАНС ФАРАДЕЕВСКОЙ СРЕДЫ

Вычислен интерференционный вклад в оптический кондактанс образца неупорядоченной фарадеевской среды. Обнаружено, что причиной подавления интерференции волн в магнитном поле являются акты рассеяния с переворотом спиральности. Магнитное поле не разрушает интерференцию волн с одинаковой спиральностью, но подавляет её для волн с противоположной спиральностью. Показано, что в квазиодномерном случае магнитное поле позволяет управлять переходом к режиму Андерсоновской локализации света в длинном волноводе.

Е. Е. GORODNICHEV, D. B. ROGOZKIN  
 National Research Nuclear University "MEPhI"

## INTERFERENCE CONTRIBUTION TO THE OPTICAL CONDUCTANCE OF A FARADAY MEDIUM

We calculate the interference contribution to the optical conductance of a sample of a disordered Faraday medium. It has been found that the reason for the suppression of wave interference in a magnetic field is the scattering process with helicity flip. The magnetic field does not destroy the interference of waves with the same helicity, but suppresses it for waves with the opposite helicity. It is shown that in the quasi-one-dimensional case, the magnetic field makes it possible to control the transition to the regime of Anderson localization of light in a long waveguide.

Эффект слабой локализации в металлах с примесями есть, как известно [1], следствие интерференции электронных волн, проходящих по обращённым во времени траекториям. Он проявляется, в частности, в виде отрицательного магнетосопротивления - уменьшения отрицательной интерференционной поправки к кондактансу с ростом магнитного поля, что обусловлено эффектом Ааронова-Бома. Для световых волн влияние магнитного поля на интерференцию обусловлено эффектом Фарадея. В отличие от электронов, магнитное поле вообще не приводит к разрушению интерференции волн с одинаковой спиральностью [2]. Механизм разрушения интерференции включается только из-за процессов рассеяния с переворотом спиральности. В итоге, как и в случае отрицательного магнетосопротивления металлов с примесями, с ростом магнитного поля интерференционный вклад в оптический кондактанс магнитоактивного образца также уменьшается.

В присутствии магнитного поля  $\vec{H}$  усреднённый по расположению рассеивателей интерференционный вклад в кондактанс, как и в случае электронных волн в проводниках с примесями [1] можно также выразить через сумму лестничных диаграмм  $\langle \hat{G}(\vec{h}) \hat{G}^*(-\vec{h}) \rangle_L$

$$\langle \delta T^{(c)}(\vec{h}) \rangle = -\frac{4 l_{tr}}{3 L^2} \cdot \int d\vec{r} \langle G_{ik}(\vec{r}, \vec{r}|\vec{h}) G_{ki}^*(\vec{r}, \vec{r}|\vec{h}) \rangle_L \quad (1)$$

где  $l_{tr}$  - транспортная длина, функция Грина  $G_{ik}(\vec{r}, \vec{r}|\vec{h})$  описывает распространение электромагнитных волн в случайной фарадеевской среде.  $\vec{h} = 2V\vec{H}$  ( $V$  - постоянная Верде).

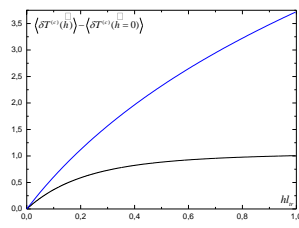


Рис. 1

При прохождении света через среду интерференция волн происходит в двух «куперонных» модах [2]. В условиях медленного затухания циркулярной поляризации наблюдаемая величина  $\langle \delta T^{(c)}(\vec{h}) \rangle - \langle \delta T^{(c)}(\vec{h}=0) \rangle$  с увеличением магнитного поля выходит на плато и стремится к величине, пропорциональной отношению транспортной длины к длине затухания циркулярной поляризации (см. рис. 1, нижняя кривая). В отсутствие эффекта сохранения циркулярной поляризации выход на плато сдвигается в область больших  $h \sim 1/l_{tr}$  (см. рис. 1, верхняя кривая).

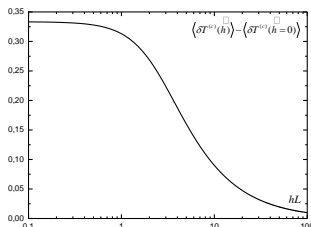


Рис. 2

При распространении света в длинном волноводе (Q1D-случай) мода, которая при  $\vec{h} = 0$  переходила бы в основную моду циркулярной поляризации, быстро затухает и интерференция волн наблюдается только в одной моде. В пределе  $\vec{h} = 0$  интерференционный вклад в кондактанс совпадает с известным результатом для скалярных волн. С увеличением  $h$  величина  $\langle \delta T^{(c)}(\vec{h}) \rangle - \langle \delta T^{(c)}(\vec{h}=0) \rangle$  убывает как  $-1/hL$  (см. рис 2). Качественно изменение  $\langle \delta T^{(c)}(\vec{h}) \rangle - \langle \delta T^{(c)}(\vec{h}=0) \rangle$  с ростом поля напоминает поведение интерференционной поправки к электронному кондактансу, но функциональные зависимости различаются.

В Q1D-случае магнитное поле позволяет управлять переходом к режиму сильной Андерсоновской локализации света в длинном волноводе. При транспорте электронов в проволоках аналогичный эффект наблюдать трудно, поскольку при увеличении длины проволоки происходит разрушение когерентности электронных волн из-за неупругих взаимодействий, температуры и других факторов [1].

### Список литературы

- [1]. E.Akkermans, G.Montambaux, *Mesoscopic physics of electrons and photons*, Cambridge, University Press, 2007.  
 [2]. E.E. Gorodnichev, K.A. Kondratiev, D.B. Rogozkin, *Phys. Rev. B* **105**, 104208 (2022)

## ДВОЙНОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ РАССЕЯНИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОНА ГЕЛИОПОДОБНЫМ АТОМНЫМ ИОНОМ

Теоретически предсказаны аналитическая структура, абсолютные значения и угловая анизотропия четырехжды дифференциальных сечений нелокального и локального двойного тормозного излучения при рассеянии рентгеновского фотона многозарядным гелиоподобным атомным ионом.

A. N. HOPERSKY, A. M. NADOLINSKY, O. B. ANDREEVA, R. V. KONEEV  
 Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

## DOUBLE BREMSSTRAHLUNG IN THE SCATTERING OF AN X-RAY PHOTON BY A HELIUM-LIKE ATOMIC ION

The analytical structure, absolute values, and angular anisotropy of fourfold differential cross sections of nonlocal and local double bremsstrahlung upon scattering of an X-ray photon by a multiply charged helium-like atomic ion are theoretically predicted.

В рамках нерелятивистской квантовой теории возмущений проведено первое теоретическое исследование процесса двойного тормозного излучения  $\hbar\omega_n$  ( $n = 1, 2$ ) – фотонов, инициированного неупругим рассеянием рентгеновского  $\hbar\omega$  – фотона гелиоподобным атомным ионом. Рассмотрены процессы нелокального (*NDBrS*); излучение в разных пространственно–временных точках):

$$\hbar\omega + [0] \rightarrow 1sxp \rightarrow K_l \rightarrow W,$$

$$K_l = 1syl + \hbar\omega_n, \quad l = 0, 2;$$

$$W = 1sep + \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2,$$

$$x, y \in [0; \infty), \quad \varepsilon = \hbar(\omega - \omega_1 - \omega_2) - I_{1s},$$

и локального (*LDBrS*; излучение в одной пространственно–временной точке):

$$\hbar\omega + [0] \rightarrow 1sxp \rightarrow W,$$

двойного тормозного излучения. В качестве объекта исследования взят гелиоподобный ион атома неона ( $\text{Ne}^{8+}$ ; заряд ядра иона  $Z = 10$ ; конфигурация и терм основного состояния  $[0] = 1s^2[{}^1S_0]$ ; энергия порога ионизации  $1s^2$ -оболочки  $I_{1s} = 1.195$  keV). Результаты расчета, в частности, для  $\perp$ -схемы (векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния) предполагаемого эксперимента представлены на рис. 1. Установлены энергетические области доминирования, эффекты угловой анизотропии и эффект деструктивной квантовой интерференции *NDBrS* – и *LDBrS* – процессов. Полученные результаты вполне доступны экспериментальной проверке и широко востребованы, прежде всего, в физике горячей лабораторной [1] и астрофизической [2] плазмы.

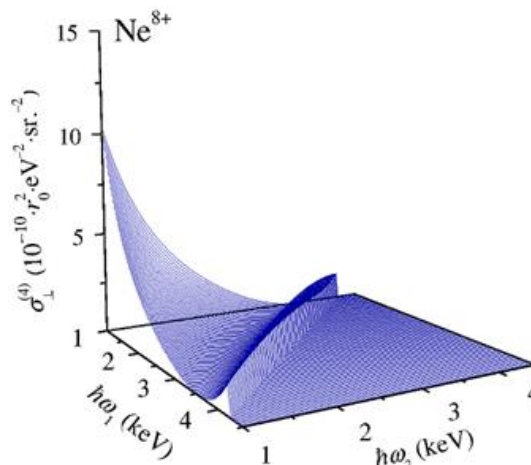


Рис. 1. Полное четырехжды дифференциальное сечение  $[\sigma_{\perp}^{(4)} \equiv d^4\sigma_{\perp}/d(\hbar\omega_1)d(\hbar\omega_2)d\Omega_1d\Omega_2, d\Omega_n$  – пространственный угол вылета рассеянного фотона] неупругого рассеяния фотона ионом  $\text{Ne}^{8+}$  с учётом квантовой интерференции амплитуд вероятности *NDBrS* – и *LDBrS* – процессов.  $r_0$  – классический радиус электрона. Угол рассеяния  $\theta = 90^\circ$ . Энергия падающего фотона  $\hbar\omega = 6.40$  keV ( $K_{\alpha}$ -Fe [3]).

### Список литературы

1. Indelicato P. // J. Phys. B. 2019. Vol. 52, P. 232001.
2. Tanaka Y. et al. // Astrophys. J. 2022. Vol. 933, P. 101.
3. Shimaguchi A. et al. // Publ. Astron. Soc. Japan. 2022. Vol. 74, P. 656.

Д. И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **КОЛЛЕКТИВНЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В АТОМАХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНАХ**

Рассмотрен канал коллективной ионизации двух электронов в атомах и ионах в поле сильного ультракороткого лазерного импульса. Для расчета вероятности ионизации использованы аналитическое приближение сильного поля и численное решение нестационарного уравнения Шредингера для двухэлектронной одномерной системы. Показано, что в поле циркулярно поляризованного излучения импульсные распределения ионов могут содержать особенности, позволяющие идентифицировать вклад коллективного процесса в ионизацию. Полная вероятность ионизации при этом оказывается менее чувствительной к соотношению между каналами последовательной и коллективной ионизации. Также показано, что относительный вклад коллективного процесса оказывается более значительным при двойной ионизации отрицательных ионов, чем при ионизации атомов, что делает такие ионы подходящими объектами для поиска коллективного туннельного эффекта.

D. I. TYURIN, S. V. POPRUZHENKO

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **COLLECTIVE TUNNELING IN ATOMS AND NEGATIVE IONS**

Collective tunnel ionization of two electrons in an atom or ion subject to a strong ultrashort laser pulse is studied theoretically using the analytic strong field approximation and numerical solution of the time-dependent Schrödinger equation for a two-electron one-dimensional system. We show that in the field of circularly polarized light the momentum distributions of doubly charged ions may contain clear indications of the collective process, while the total ionization probability appears less sensitive to the branching between the sequential and collective tunneling ionization channels. We also demonstrate that the relative weight of collective tunneling is much higher for negative ions than for neutral atoms, making the former a preferable object for the experimental search of this process.

Многokратная ионизация атомов в поле интенсивного лазерного излучения остается объектом активных экспериментальных и теоретических исследований с 70-х годов прошлого века [1]. Основной интерес к наблюдению этого процесса связан с возможностями, которые оно открывает для исследования корреляционных эффектов в присутствии внешних нестационарных интенсивных воздействий. Соответственно, наиболее интересным является изучение некаскадных каналов многократной ионизации, связанных с присутствием электрон-электронного взаимодействия. Один из таких каналов – перерасcеяние – подробно исследован и верифицирован экспериментально (см., например, обзор [2] и ссылки в нем). Другой – коллективное туннелирование двух или более электронов – был предсказан и теоретически проанализирован в [3,4], но до сих пор не наблюдался экспериментально.

В работе [5] было показано, что разделить каналы перерасcеяния и коллективного туннелирования можно, используя циркулярно поляризованное лазерное излучение, в котором перерасcеяние сильно подавлено. При этом в импульсных распределениях двукратно заряженных ионов вклады последовательного и коллективного каналов двойной ионизации оказываются значительно разнесенными друг от друга, так что наблюдение таких распределений потенциально могло бы быть использовано для поиска коллективного туннельного эффекта.

В данной работе мы приводим результаты численных расчетов импульсных распределений положительно заряженных ионов, возникших в результате двойной ионизации атомов благородных газов или отрицательных ионов брома. Расчеты основаны на приближении сильного поля, обобщенного в работе [3] для описания коллективной ионизации. Показано, что в случае ионов брома из-за большой разницы в значениях первого и второго потенциалов ионизации вклад коллективного туннельного эффекта может быть большим и он хорошо виден в импульсных распределениях, в то время как для атомов, в которых второй потенциал ионизации примерно вдвое больше первого, последовательная ионизация всегда доминирует.

Также представлены результаты численного решения нестационарного уравнения Шредингера для модельного одномерного двухэлектронного атома с несингулярным электрон-электронным взаимодействием. В одномерном случае описать взаимодействие с циркулярно поляризованным импульсом невозможно, поэтому единственным параметром, величина которого может зависеть от механизма ионизации здесь является отношение полных вероятностей двойной ионизации и однократной ионизации иона, у которого валентный электрон был удален заранее. Исследование зависимости этой величины от интенсивности лазерного излучения указывает на возможное присутствие корреляционного канала.

### *Список литературы*

1. Алексахин И.С., Запечный И.П., Суран В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 26. С. 14.
2. Becker W. et al. // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 1011.
3. Зон Б.А. // ЖЭТФ. 1999. Т. 116. С. 410.
4. Eichmann U. et al., // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 3550.
5. Попруженко С.В., Ломоносова Т.А. // Письма в ЖЭТФ. Т. 113. С. 320.

Ю. К. ГАГАРИН<sup>1</sup>, Ф. А. КОРНЕЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦЫ В ПРИСУТСТВИИ ПОСТОЯННОГО ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В работе рассмотрена возможность эффективного ускорения электрона лазерным импульсом в присутствии достаточно сильного внешнего магнитного поля. Возникновение резонанса между ларморовской частотой движения электрона в магнитном поле и частотой лазера приводит к заметному увеличению энергии, поглощаемой частицей. Численный расчёт, проведённый для параметров, достигаемых в современных экспериментах, показывает высокую эффективность процесса.

Y. K. GAGARIN<sup>1</sup>, Ph. A. KORNEEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## LASER DRIVEN PARTICLE ACCELERATION IN A STATIC LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD

This work considers the possibility to effective electron acceleration by the laser pulse in the presence of the applied magnetic field. The resonance between the electron cyclotron frequency and the laser frequency leads to a significant increase in the energy gain. Numerical simulation with parameters achievable in current experiments shows the high efficiency of the acceleration.

Современные достижения в области генерации сверхсильных магнитных полей [1] демонстрируют возможность создания квазистационарных структур, в которых магнитные поля достигают значений 10 кТ и выше при использовании современных мощных лазерных установок. В таких полях ларморовская частота движения электрона может сравняться с характерной частотой лазерного импульса, что приводит к возникновению резонанса и эффективному ускорению электрона.

Подробное исследование возможности значительного увеличения энергии частицы, поглощаемой из лазерной волны, проведено в работе [2]. Основной акцент сделан на возможности запуска электрона на более энергетическую траекторию за счёт начального ускорения частицы или создания слабого электрического поля в небольшой области пространства, однако случай магнитных полей рассмотрен недостаточно подробно.

В данной работе проведено моделирование движения электрона в плоской электромагнитной волне в присутствии постоянного продольного магнитного поля. Характерными величинами в расчёте являются: длина волны лазерного импульса  $\lambda=1.054$  мкм, интенсивность лазерного излучения  $I\sim 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> и величина внешнего магнитного поля  $B=4$  кТ (нерезонансный случай) и  $B=10$  кТ (резонансный случай).

Величина внешнего магнитного поля задаёт режим ускорения электрона: резонансный (эффективное ускорение) или нерезонансный. Характерные зависимости энергии и импульса частицы для обоих режимов наглядно демонстрируют существенное увеличение энергии, поглощаемой электроном из лазерной волны, в резонансном случае.

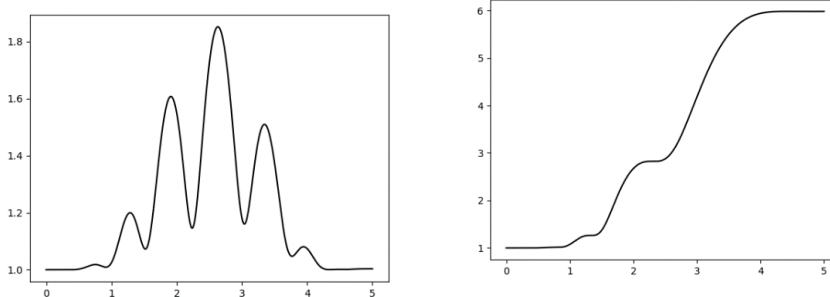


Рис. 1. Зависимость энергии электрона от времени. Слева приведён график для  $B=4$  кТ, справа – для  $B=10$  кТ. Энергия приведена в единицах  $mc^2$ , время расчёта – 5 периодов лазерного импульса ( $\sim 18$  фс)

Указанный механизм ускорения частиц представляется перспективным и может быть использован в схемах лазерного ускорения электронов, что требует дальнейших исследований, в частности, влияния неоднородности приложенного магнитного поля и коллективных эффектов.

### Список литературы

1. Korneev Ph., Tikhonchuk V. and d'Humières E. // New J. Phys. 2017. Vol. 19. P. 033023.
2. Arefiev A.V., Robinson A.P.L. and Khudik V.N. // J. Plasma Physics 2015. Vol. 81. Iss. 4. P. 475810404.

Е. Е. ПЕГАНОВ, С. В. ПОПРУЖЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО БИХРОМАТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ГАЗОВОЙ МИКРОМИШЕНЬЮ**

Теоретически исследован эффект генерации коротких импульсов терагерцового излучения, возникающего при ионизации газовых сред полем мощной бихроматической лазерной волны, состоящего из когерентной суперпозиции основной и второй гармоник инфракрасного диапазона частот. Показано, что для мишеней размером 10–100 мкм длительность излучаемого терагерцового импульса определяется эффектом радиационного трения. Исследованы динамические неизлучающие конфигурации токов, образующиеся в ионизационной плазме после излучения терагерцового импульса.

E. E. PEGANOV, S. V. POPRUZHENKO

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **EMISSION OF TERAHERTZ WAVES IN THE INTERACTION OF INTENSE BICHROMATIC LASER RADIATION WITH GAS MICROTARGETS**

The generation of short pulses of terahertz radiation was studied theoretically in the case when a gas target is ionized by intense dichromatic laser fields consisting of a coherent superposition of the fundamental component of infrared frequency and its second harmonic. It is shown that for 10-100 micron size targets the time duration of the emitted terahertz pulses is determined by the radiation friction effect. Dynamical non-radiating configurations of the electron current, which survive in the ionization-created plasma after the terahertz emission were also examined.

Излучение сильных волн терагерцового (ТГц) диапазона частот из газовых мишеней, облучаемых интенсивными лазерными импульсами, теоретически и экспериментально исследуется в течение двух последних десятилетий. Одна из наиболее эффективных схем генерации основана на использовании многофотонной или туннельной ионизации атомарных газов в поле двухцветного лазерного излучения, состоящей из когерентной суперпозиции интенсивного инфракрасного света и его второй гармоники с интенсивностью на уровне 5-10% фундаментальной [1]. Двухцветная схема подробно исследована для нескольких простых реализаций, включая терагерцовую генерацию в лазерных импульсах среднего ИК-диапазона и использование циркулярно поляризованного лазерного излучения [2-5]. Для эффективного преобразования энергии из инфракрасного диапазона в терагерцовый могут быть использованы также двухцветные поля с иным соотношением частот, включая полугармоники [6].

Большинство теоретических исследований процесса генерации терагерцовых волн при взаимодействии лазерного излучения с газами посвящены либо микроскопической стадии ионизации, либо макроскопической эволюции электронного тока. В данной работе мы представим более детальное рассмотрение процесса формирования макроскопического терагерцового сигнала с учетом ионизации. Используемый нами подход основан на численном моделировании образования, эволюции и излучения плазмы методом частиц в ячейке (PIC) с использованием PIC-кода SMILEI [7], в котором полевая ионизация атомов описывается в туннельном приближении при помощи формул Переломова–Попова–Терентьева [8]. Рассмотрено взаимодействие линейно поляризованных двухцветных фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью основной компоненты  $\sim 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> и сферической мишени из аргона с концентрацией  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Размер мишени  $\sim 10$ –100 мкм близок к длине волны плазмы, так что излучение ТГц волн происходит преимущественно в дипольной моде, хотя и с заметным вкладом высших моментов. Такие относительно небольшие мишени могут быть реализованы с помощью тонких атомных струй, пересекающих слабо сфокусированные лазерные импульсы. Основное внимание уделено зависимости длительности ТГц импульса от размера и плотности мишени. Показано, что для малых мишеней эффект радиационного трения значительно сокращает длительность импульса. Эта зависимость открывает дополнительный способ управления свойствами интенсивных ТГц импульсов длительностью в несколько циклов, генерируемых за счет туннельной ионизации. Также исследована нестационарная динамика плазмы в ионизированной мишени, развивающаяся на временных масштабах, значительно превышающих длительность излучаемого ТГц импульса. Идентифицированы динамические безызлучательные конфигурации плазменных токов, существующие в течение пикосекунд.

### *Список литературы*

1. Kim K-Y. et al. // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 4577.
2. Oh T.I. et al. // Apps. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 041103.
3. Meng C. et al. // Apps. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 131105.
4. Tulsy et al. // Phys. Rev. A. 2018. V. 98. P. 053415.
5. Koulouklidis A.D. et al. // Nature Physics. 2020. V. 11. P. 292.
6. Vvedenskii N.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 155104.
7. Derouillat J. et al. // Comp. Phys. Comm. 2018. V. 222. P. 351.
8. Popov V.S. // Phys-Usp. 2004. V. 47. P. 855.



О. Е. ВАЙС, М. Г. ЛОБОК, В. Ю. БЫЧЕНКОВ

*Физический институт академии наук им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия*

## УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА

В работе проведено исследование ускорения электронов из мишени с околоритической электронной плотностью при распространении лазерного импульса ультракороткой длительности (вплоть до 10 фс) в режиме релятивистского самозахвата. Проведен анализ влияния длительности лазерного импульса с заданной энергией на конверсию его энергии в энергию высокоэнергетичных электронов и, как следствие, анализ перспектив уменьшения длительности лазерного импульса с точки зрения их дальнейшего практического использования.

O. E. VAIS, M. G. LOBOK, V. YU. BYCHENKOV

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## ELECTRON ACCELERATION DURING ULTRASHORT LASER PULSE PROPAGATION IN RELATIVISTIC SELF-TRAPPING REGIME

We have studied the acceleration of electrons from a target with a near-critical electron density during the propagation of an ultrashort laser pulse (with duration down to 10 fs) in the relativistic self-trapping regime. An analysis is made of the influence of the duration of a laser pulse with a given energy on the conversion of its energy into the energy of high-energy electrons and, as a result, an analysis of the prospects for reducing the duration of a laser pulse from the point of view of their further practical use.

Лазерное кильватерное ускорение электронов позволяет получать электронные сгустки с наибольшими энергиями. Так ускорение электронов до мульти-ГэВных энергий было уже экспериментально показано в работах [1-3]. Вместе с тем имеется большое число значимых приложений, для которых требуются меньшие энергии ускоренных частиц, в пределах от сотни МэВ до порядка 1 ГэВ, но в значительно большем их количестве. Так в наших недавних работах было показано, что максимизация заряда ускоренных частиц происходит в случае другого режима распространения лазерного импульса, так называемого режима релятивистского самозахвата. В этом случае наблюдается устойчивое распространение в однородной плазме релятивистски-интенсивного лазерного импульса (т.е. со стандартной безразмерной амплитудой поля  $a_0 \gg 1$ ) на расстояния много больше рэлеевской длины, что оказывается возможным при определенном согласовании между поперечным размером распространяющейся световой пули, электронной плотностью плазмы и интенсивностью (мощностью) лазерного импульса (см., например, [4-7]). Впоследствии было доказано, что выявленное в численных экспериментах согласование лазерно-плазменных параметров с нелинейно-оптической точки зрения отвечает самозахватной моде в плазме с релятивистской нелинейностью [8,9]. Соотношение лазерно-плазменных параметров может быть записано в следующем виде:

$$R = \alpha \frac{c\sqrt{a_0}}{\omega_p} = \frac{\alpha c}{\omega_l} \sqrt{\frac{a_0 n_c}{n_e}}, \quad (1)$$

где  $\omega_p = 2\pi c/\lambda_p$  – плазменная частота электронов связывающего радиуса каверны.

Однако данное выражение не содержит условий на длительность лазерного импульса, хотя, как известно, при превышении длиной лазерного импульса длины плазменной волны в ходе лазерно-плазменного взаимодействия могут возникать неустойчивости, приводящие к потере энергии лазерного импульса. В данной работе мы рассматриваем зависимость характеристик пучка ускоренных электронов, а также конверсию энергии лазерного импульса от длительности лазерного импульса заданной энергии. Исследования проводятся для лазерных импульсов длительностью вплоть до 10 фс, что может обосновать необходимость сжатия лазерных импульсов с целью улучшения показателей ускоренного пучка электронов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00023. О.Е. Вайс выражает благодарность Фонду развития теоретической физики и математики («БАЗИС») за финансовую поддержку (грант #22-1-3-28-1).

### Список литературы

1. Gogolinskii K.V., Gubskii K.L., Kuznetsov A.P. and others // Meas. Tech. 2012. Vol. 55, № 4. P. 1–6.
2. Kim H. T., Pae, K. H., Cha, H. J., Kimet al., J. Phys. Rev. Lett., 111, 165002 (2013).
3. Leemans W. P., Gonsalves, A. J., Mao, H. S., Nakamura, K., Benedetti, C., Schroeder, C. B., Tóth Cs., Daniels J., Mittelberger D. E., Bulanov S. S., Vay J.-L. Geddes C. G. R., Esarey, E. Phys. Rev. Lett., 113, 245002 (2014).
4. Gonsalves, A. J., Nakamura, K., Daniels, J., Benedetti, C., Pieronek, C., de Raadt, T. C. H., Steinke, S., Bin, J. H., Bulanov, S. S., van Tilborg, J., Geddes, C. G. R., Schroeder, C. B., T'oth, Cs., Esarey, E., Swanson, K., Fan-Chiang, L., Bagdasarov, G., Bobrova, N., Gasilov, V., Korn, G., Sasorov, P., Leemans, W. P. Phys. Rev. Lett., 122 084801 (2019).
5. Lobok M. G., Brantov A. V., Gozhev D. A., Bychenkov V. Yu. Plasma Phys. Control. Fusion, 60, 084010 (2018).
6. Gordienko S., Pukhov A. Phys. Plasmas, 12, 043109 (2005).
- Lu W., Tzoufras M., Joshi C., Tsung F. S. et al. Phys. Rev. Accel. Beams, 10, 061301 (2007).
7. Masson-Laborde P. E., Mo M. Z., Ali A., Fourmaux S. et al, // Phys. Plasmas, 21, 123113 (2014).
8. Kovalev V. F., Bychenkov V. Yu. Phys. Rev. E. 99, 043201 (2019).
9. Ковалев В. Ф., Быченков В. Ю. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 63, 825 (2020) [Radiophysics and Quantum Electronics, 63, 742 (2021)].

Д. А. ГОЖЕВ, О. Е. ВАЙС, С. Г. БОЧКАРЕВ, М. Г. ЛОБОК, В. Ю. БЫЧЕНКОВ  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

## НЕКОГЕРЕНТНОЕ СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ БЛУЖДАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИКРОКЛАСТЕРНУЮ СРЕДУ

В данной работе с помощью 3D моделирования методом «частица-в-ячейке» (PIC) исследовано воздействие сверхкоротких (~15 фс) линейно поляризованных релятивистски-интенсивных лазерных импульсов (с интенсивностью свыше  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) на микро-кластерную среду из тяжелых атомов (например, нано-, микрочастиц золота). Получены спектрально-угловые характеристики некогерентного синхротронного излучения ансамбля электронов, совершающих стохастическую динамику в лазерном и кулоновских полях, в том числе рециркулирующих вблизи кластера с перескоками на соседний кластер.

D. A. GOZHEV, O. E. VAIS, S. G. BOCHKAREV, M. G. LOBOK and V. YU. BYCHENKOV  
*P.N. Lebedev Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

## INCOHERENT SYNCHROTRON EMISSION OF WALKING ELECTRONS UNDER IRRADIATION OF POWERFUL ULTRASHORT LASER PULSES ON A MICROCLUSTER TAGRET

In this paper, the interaction of ultrashort (~15 fs) linearly polarized relativistically intense (with an intensity of more than  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) laser pulses with a microcluster medium is studied using 3D PIC simulation. The spectral-angular characteristics of incoherent synchrotron radiation of an ensemble of electrons that perform stochastic dynamics in laser and Coulomb fields, including those recirculating near a cluster with hops to a neighboring cluster, are obtained.

В данной работе исследовано воздействие ультракоротких (~15 фс) релятивистски-интенсивных (с интенсивностью в диапазоне от  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>) лазерных импульсов линейно-поляризации с микро-кластерной средой. 3D PIC моделирование с применением кода VSIM выполнено с высоким пространственным разрешением ( $\lambda/200$ ,  $\lambda/100$ ,  $\lambda/100$ ) в небольшой расчетной области (относительно нагреваемого лазерном фокального объема) с типичными размерами  $12 \lambda \times 5 \lambda \times 5 \lambda$ . Здесь  $\lambda=1$  мкм - длина волны лазерного излучения. Так как для мощных лазерных систем ПВт уровня мощности острая фокусировка остается труднодостижимой, лазерное поле можно моделировать в плосковолновом приближении. В поперечном направлении применяются периодические граничные условия для частиц и полей, в то время как в продольном для полей условие впуска-выпуска, а для частиц – поглощения. В расчетах выбирались достаточно крупные кластеры со случайным распределением внутри расчетной области, но с фиксированной средней плотностью среды, с диаметром от  $0.05 \lambda$  до  $0.8 \lambda$  из тяжелых атомов (золото), которые не успевают разрушиться в течение воздействия лазерного импульса.

Ранее нами было найдено условие согласование параметров лазерного импульса и кластерной среды, при выполнении которого можно достигнуть оптимального нагрева кластерной мишени [1]. Для эффективного нагрева требуется достаточно высокая средняя плотность среды и возможность проникновения в неё интенсивного лазерного излучения [1]. В этом случае развивается стохастическая динамика электронов в сложном комбинированном поле лазерной волны и кулоновском поле кластера, что определяет формирование плато в энергетическом спектре электронов, содержащее значительное количество суперпандеромоторных частиц, и определяющее генерацию большого числа фотонов мягкого рентгеновского излучения.

Взаимодействия с такими мишенями интересно в том числе и для получения вторичного рентгеновского излучения [2,3]. В нашей работе спектрально-угловые характеристики некогерентного синхротронного излучения ансамбля блуждающих электронов вычислялись с помощью потенциалов Лианара-Вихерта. Для анализа спектральных характеристик случайным образом отбирались траектории из данных PIC расчета. Метод нацелен на выявление высокочастотной зависимости спектра излучаемой энергии. Анализ эволюции мощности излучения показывает, что существует два механизма, вносящих вклад в излучение: это синхротронное излучение электронов рециркулирующих электронов вблизи кластера с перескоками на соседний кластер, а также излучение частицы в совершающей динамику в комбинированном поле (для этой группы электронов наиболее эффективен обратный комптоновский механизм, когда эти частицы блуждая, в среднем движутся навстречу лазерной волне). Наиболее жесткое и широкое (по спектру) излучение генерируют блуждающие электроны именно при их движении навстречу лазерному импульсу. Ширина спектральной мощности излучения и частота, при которой достигается максимум спектральной функции, возрастает пропорционально интенсивности лазерного импульса, достигая значение 1 кэВ при интенсивности лазера  $\sim 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00023.

### *Список литературы*

1. Гожев Д.А., Бочкарев С.Г., Быченков В.Ю., Письма в ЖЭТФ, 114, вып. 4, 233 (2021).
2. Андреев А.А., Платонов К.Ю., Квантовая электроника, 52, № 2 (2021).
3. Chen, L., Yan, W., Li, D. et al. Sci Rep 3, 1912 (2013).



Е. О. ДМИТРИЕВ, Н. Д. БУХАРСКИЙ, Ф. А. КОРНЕЕВ  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДНЫХ ТОКОВ В КОЛЬЦЕВЫХ МИШЕНЯХ

При облучении лазером металлических проволок специальной формы возможна генерация ТГц импульсов. В такой конфигурации ТГц излучение генерируется разрядным импульсом, возбуждаемым в мишени. Для проволочных мишеней специальной формы, в рамках модели бесконечно короткого разрядного импульса, распространяющегося по проводу, оценена плотность момента импульса ТГц излучения.

Е. О. DMITRIEV, N. D. BUKHARSKII, Ph. A. KORNEEV  
*P. N. Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## TERAHERTZ RADIATION FEATURES OF DISCHARGE CURRENTS IN ANNULAR TARGETS

Generation of THz pulses is possible via irradiation of specially shaped metallic wires with a laser. In this configuration a discharge pulse, excited in the target, generates THz radiation. An infinitely short discharge pulse model for specially shaped wired targets is developed, and the orbital momentum density of the THz radiation is estimated.

Терагерцовые импульсы, частота которых обычно определяется в интервале между 100 ГГц и 30 ТГц, активно изучаются уже более 30 лет. Они нашли множество приложений в разных областях науки, в том числе в медицине и биологии. Одним из перспективных направлений развития ТГц импульсов может являться генерация излучения, обладающего особой пространственной структурой. В частности, формирование электромагнитных волн, обладающих определенным значением момента импульса.

Как было обнаружено в работах [1,2], при облучении коротким лазерным импульсом протяжённой мишени искривлённой формы может эффективно излучаться волна, свойства которой определяются геометрией мишени. Для теоретического описания излучения на больших расстояниях от источника обычно применяется приближение волновой зоны. В рамках этого подхода электромагнитное поле в небольших областях пространства представляется в виде плоской волны. Однако в силу того, что плоская волна не обладает моментом импульса, для описания переносимого излучением момента импульса необходимо выйти за пределы указанного приближения.

В работе представлена аналитическая модель излучения ТГц импульса, учитывающая возможность наличия у электромагнитной волны момента импульса. Для различных мишеней оценена плотность момента импульса излучения, генерируемого разрядным импульсом. С помощью численного моделирования показана возможность возбуждения такого импульса и сделаны оценки относительно эффективности данного процесса.

### *Список литературы*

1. N. Bukharskii, Iu. Kochetkov, and Ph. Korneev, Terahertz Annular Antenna Driven with a Short Intense Laser Pulse, Applied Physics Letters 120, 014102 (2022).
2. N. Bukharskii and Ph. Korneev, Intense Widely-Controlled Terahertz Radiation from Laser-Driven Wires, arXiv:2210.14166.

А. В. БЕРЕЗИН, А. М. ФЕДОТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ПО ДЕТЕКТИРОВАНИЮ ФОТОН-ФОТОННОГО РАССЕЙЯНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ФОКУСИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Получены аналитические формулы для распределений и полного числа излучаемых поляризованным вакуумом сигнальных фотонов в схеме столкновения лазерных импульсов произвольной конфигурации. Сформулированы рекомендации по оптимизации направления вылета сигнальных фотонов и их полного числа.

A. V. BEREZIN, A. M. FEDOTOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OPTIMIZATION OF SCHEMES FOR DETECTING PHOTON-PHOTON SCATTERING DURING THE COLLISION OF FOCUSED LASER PULSES

Analytical formulas for the distributions and the total number of signal photons emitted by polarized vacuum in the scheme of collision of laser pulses of arbitrary configuration are obtained. Recommendations for optimizing the direction of emission of signal photons and their total number are formulated.

Эффект поляризация вакуума является одним из важнейших предсказаний квантовой теории поля. С его учётом эффективный лагранжиан электромагнитного поля принимает вид [1]

$$L_{eff} = \frac{1}{4\pi} F + L_{1-loop}(F, G) + O(\alpha^2),$$
$$L_{1-loop} = \alpha \left\{ \frac{4F^2 + 7G^2}{360\pi^2 E_c^2} + \frac{F(8F^2 + 13G^2)}{630\pi^2 E_c^4} + \dots \right\}, \quad \omega_0 \ll m,$$

где  $F = (E^2 - H^2)/2$ ,  $G = \mathbf{E}\mathbf{H}$  - инварианты электромагнитного поля,  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры,  $E_c$  - критическое поле,  $\omega_0$  - характерная частота поля,  $m$  - масса электрона. Дополнительные по сравнению с классической теорией слагаемые в лагранжиане приводят к нелинейным поправкам в уравнениях Максвелла, которые можно интерпретировать как поляризацию и намагниченность вакуума. В связи с этим предсказывается ряд потенциально наблюдаемых квантовых эффектов, одним из которых является вынужденное рассеяние фотонов.

Первое слагаемое в  $L_{1-loop}$  отвечает четырёх-фотонному взаимодействию и в большинстве известных на данный момент схем по детектированию фотон-фотонного рассеяния сталкиваются три фокусированных лазерных импульса [2,3,4]. Однако ранее геометрия столкновения не оптимизировались по направлению вылета сигнальных фотонов. К тому же распределения для сигнальных фотонов, а также их полное число  $N_s$  вычислялись лишь численно и при частично или полностью заданной конфигурации схемы столкновения. Нами получена аналитическая формула для числа сигнальных фотонов в схеме произвольной конфигурации, включающая зависимость от геометрии столкновения, длительности, ширины фокусировки и поляризации каждого из импульсов:

$$N_s = \frac{(\nu_1 \nu_2 \nu_3)^2 \nu_s^3 |\mathbf{C}|^2}{\det M \sqrt{\det(M_B^T M^{-1} M_B)}} \times \frac{\omega_0^2 P_1 P_2 P_3}{\hbar c^6 E_c^4},$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -го импульса,  $\nu_i$  – номер гармоники  $i$ -го импульса,  $\nu_s = \nu_1 + \nu_2 - \nu_3$ , множитель  $|\mathbf{C}|^2$  содержит всю зависимость от поляризаций импульсов, а матрица  $M$  – всю зависимость от длительности и ширины фокусировки импульсов, матрица  $M_B$  зависит только от геометрии столкновения. Найденные выражения позволяют провести глобальную оптимизацию схемы по детектированию фотон-фотонного рассеяния в соответствии с возможностями и требованиями эксперимента.

### Список литературы

1. Heisenberg W., Euler H. // Zeitschrift für Physik. 1936. V. 98, № 11. P. 714.
2. Dewar R. L. // Physical Review A. 1974. T. 10, № 6. P. 2107.
3. Lundström E. et al. // Physical review letters. 2006. V. 96, № 8. P. 083602.
4. Gies H. et al. // Physical Review D. 2018. T. 97, № 7. P. 076002.

А. А. НИКОЛАЕВ, В. Н. АЗЯЗОВ

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

## КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ 1-АМИНОЭТАНОЛА С АЦЕТАЛЬДЕГИДОМ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрены механизмы химических реакций  $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{NH}_2 + \text{CH}_3\text{CHO}$  во льдах аммиака путем квантово-механических вычислений высокого уровня точности. Условия твердой фазы были созданы с помощью подхода SCRF/SMD. Построены диаграммы поверхности потенциальной энергии (ППЭ) химических реакций.

А. А. NIKOLAYEV, V. N. AZYAZOV

Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia  
Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia

## A QUANTUM-MECHANICAL STUDY OF MECHANISMS OF CHEMICAL REACTIONS OF 1-AMINOETHANOL WITH ACETALDEHYDE IN THE ICE PHASE UNDER SPACE CONDITIONS

The mechanisms of chemical reactions  $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{NH}_2 + \text{CH}_3\text{CHO}$  in ammonia ice are considered by means of quantum-mechanical calculations of a high level of accuracy. Ice-phase conditions were created using the SCRF/SMD approach. Diagrams of the potential energy surface (PES) of the chemical reactions are constructed.

Газофазные реакции действительно происходят в межзвездной среде, и, несмотря на то, что они приводят к образованию сложных органических молекул (СОМ), они не могут обеспечить скорости их образования во временных масштабах жизни молекулярных облаков из-за небольших плотностей газа. Химические реакции в твердой фазе, вызванные ионизирующим излучением на поверхности холодных межзвездных облаков, по-видимому, являются более эффективным способом образования сложных СОМ, а ледяные оболочки пылинок служат щитом для новообразованных молекул. Рост температуры за счет гравитационного сжатия молекулярных облаков сопровождается сублимацией образовавшихся СОМ в газовую фазу, где они могут быть обнаружены по излучению в радиочастотном спектре. Учитывая, что звездные системы со временем формируются из молекулярных облаков, предполагается, что некоторые химические соединения, образовавшиеся в этих средах, будут доставлены на поверхность планет, где потенциально могут сыграть ключевую роль в зарождении жизни [1].

На рис. 1 представлена диаграмма ППЭ одной из изученных реакций в твердой фазе. Можно утверждать, что явное внедрение молекул аммиака (от 1 до 3) в активированные комплексы способствовало значительному уменьшению величины энергетических барьеров по сравнению с реакциями без дополнительных молекул. Максимальный эффект наблюдался при 3 молекулах аммиака (рис. 1). Также нужно отметить, что эффект протонного туннелирования колоссально влияет на кинетику этих реакций, так как величина основных барьеров порядка 100 кДж/моль, что фактически препятствовало бы прохождению реакций в условиях сверхнизких температур без внешнего ионизирующего излучения. Величина констант скорости переноса Н при его туннелировании исследовалась в различных работах, и при барьере ~150 кДж/моль она уже была порядка  $10 \text{ c}^{-1}$  [2].

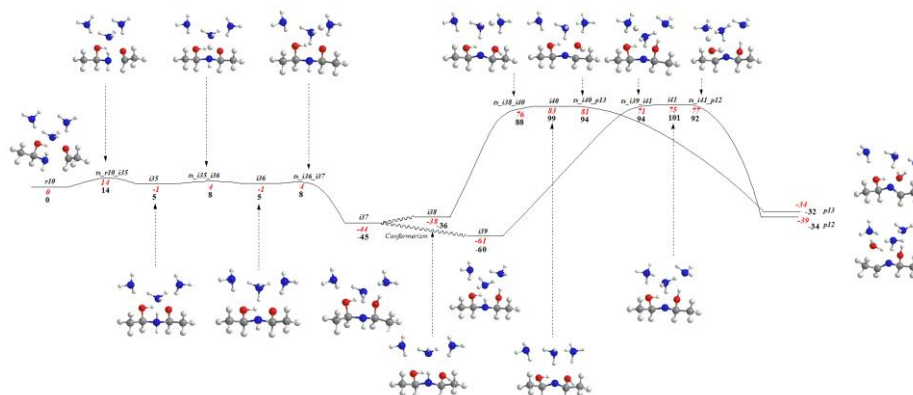


Рис. 1. Одна из диаграмм ППЭ реакции 1-аминоэтанола с ацетальдегидом во льдах аммиака: энергии в кДж/моль  
Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта № 075-15-2021-597 «Происхождение и эволюция органических молекул в нашей Галактике».

### Список литературы

1. Zhu C. et al. // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2022. Vol. 13, № 30. P. 6875–6882.
2. Trakhtenberg L.I. et al. // The Journal of Chemical Physics. 2005. Vol. 123, № 11. P. 114508.

**Секция**  
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ**  
**СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ**

Руководитель секции – д.ф.-м.н. Борисюк Петр Викторович

Секретари секции – к.ф.-м.н., ассистент каф. №78  
Курельчук Ульяна Николаевна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9914  
E-mail: UNKurelchuk@mephi.ru

Д.В. БОРТКО, В.А. ШИЛОВ, О.С. ВАСИЛЬЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОКЛАСТЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДА ТАНТАЛА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Созданы образцы тонких покрытий из нанокластеров оксида тантала методом магнетронного распыления танталовой мишени в присутствии кислорода. Проверен химический состав и поверхностная морфология полученных образцов методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и сканирующей туннельной микроскопии соответственно. Получены и проанализированы спектры излучения образцов при нагревании их до высоких температур.

D.V. BORTKO, V.A. SHILOV, O.S. VASILIEV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **INVESTIGATION OF HIGH TEMPERATURE EMISSION OF THE TANTALUM OXIDE NANOCLUSTER COATINGS**

Samples of the thin tantalum oxide nanocluster coatings are created using magnetron sputtering of the tantalum target in the presence of oxygen. Chemical composition and surface morphology of the samples obtained are examined with x-ray photoelectron spectroscopy and scanning tunnel microscopy methods, accordingly. High temperature emission spectra for each sample are obtained and analyzed.

Одна из важнейших проблем альтернативных источников электроэнергии, таких как радиоизотопные источники питания, солнечные элементы и т.д., которые работают на принципе преобразования энергии электромагнитного излучения сильно нагретых тел в электрическую энергию с помощью фотоэлементов, связана с ограниченным диапазоном энергий, который может быть эффективно использован [1,2]. Таким образом, возникает потребность в дополнительном преобразовании попадающего на фотоэлементы спектра. Для такой корректировки рассматриваются в том числе и возможности нанесения различных покрытий на источник теплового излучения, а затем исследуется их эффективность. При этом, наиболее популярными материалами для исследования в последнее время являются тугоплавкие металлы и их оксиды, а также системы на основе наноструктур [3,4,5].

В данной работе изучаются тонкие покрытия из нанокластеров оксида тантала, которые осаждаются на подложку из тугоплавкого металла тантала. Кластеры образуются после магнетронного распыления металлической мишени в присутствии кислорода и прохождения зоны агрегации, затем они фильтруются по массам таким образом, чтобы для заданного образца на подложку осаждались кластеры только одного размера. Каждый образец в полученном наборе характеризуется своим фиксированным размером кластеров, при этом диапазон исследуемых размеров составляет от 2 до 8 нм.

Морфология полученных плёнок проверяется с помощью метода сканирующей туннельной микроскопии, что позволяет, во-первых, удостовериться в кластерной структуре плёнок, а, во-вторых, верифицировать размер получаемых кластеров. Химический состав и количество кислорода в оксиде тантала проверяется методом рентгеновской электронной спектроскопии.

Основной целью работы является исследование эффектов наноструктуры плёнок, а также размерных эффектов, которые могут появляться при излучении во время разогрева образцов до высоких температур. Для этого разработана схема эксперимента по нагреванию образцов и фиксации спектров их излучения в диапазоне от 700 нм до 1700 нм. Полученные спектры затем анализируются, и делается вывод о перспективности дальнейшего рассмотрения нанокластерных покрытий из оксида тантала для применения в области альтернативной энергетики.

### *Список литературы*

1. Daneshvar H., Prinja R., Kherani N. P. Thermophotovoltaics: Fundamentals, challenges and prospects //Applied Energy. 2015. Vol. 159, P. 560–575
2. Wang Z. et al. Selective emitter materials and designs for high-temperature thermophotovoltaic applications //Solar Energy Materials and Solar Cells. 2022. Vol. 238, P. 111554.
3. Kondaiah P. et al. Tantalum carbide based spectrally selective coatings for solar thermal absorber applications //Solar Energy Materials and Solar Cells. 2019. Vol. 198, P. 26–34.
4. Bhatt R., Kravchenko I., Gupta M. High-efficiency solar thermophotovoltaic system using a nanostructure-based selective emitter //Solar Energy. 2020. Vol. 197, P. 538–545.
5. Burger T. et al. Thin-film architectures with high spectral selectivity for thermophotovoltaic cells //ACS Photonics. 2018. Vol. 5, №. 7. P. 2748–2754

Н.В. МОРОЗОВ<sup>1,2</sup>, К.Е. ЛАХМАНСКИЙ<sup>1,2,3</sup>, Л.А. АКОПЯН<sup>2,3</sup>, О.Ю. ЛАХМАНСКАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт МФТИ, Долгопрудный, Московская обл., Россия

## КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР НА ХОЛОДНЫХ ИОНАХ КАЛЬЦИЯ-40

Рассмотрены принципы работы квантового компьютера на ионной платформе. Рассмотрены оптические системы ионизации, охлаждения и детектирования ионов кальция-40. Продемонстрирован захват ионов в ловушку Пауля с последующей компенсацией микродвижений. Показана система стабилизации частоты TiSa лазера.

N. V. MOROZOV<sup>1,2</sup>, K. E. LAKHMANSKIY<sup>1,2,3</sup>, L. A. AKOPYAN<sup>2,3</sup>, O. Y. LAKHMANSKAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian Quantum Center, Skolkovo, 143025 Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnyi, Moscow region, 141701 Russia

## QUANTUM COMPUTER ON COLD CALCIUM-40 IONS

The principles of operation of a quantum computer on an ionic platform are considered. Optical systems for ionization, cooling, and detection of calcium-40 ions are considered. The capture of ions in a Paul trap with subsequent compensation of micromotions is demonstrated. The TiSa laser frequency stabilization system is shown.

Квантовые вычисления с захваченными ионами продемонстрировали значительный прогресс за последние пару десятилетий [1]. Основными преимуществами являются вентили квантовых вычислений с высочайшей точностью, длительное время когерентности, присущая однородность и возможность подключения «все ко всем» [2]. В настоящее время внимание сместилось от миниатюрных архитектур к более практичным реализациям, требующим увеличения производительности компьютера [3]. Ожидается, что квантовые компьютеры будут экспоненциально сокращать время решения ряда задач, обладающих высокой значимостью, таких как оптимизация, простая факторизация и поиск в базе данных. Возможные приложения также включают квантовую химию (открытие лекарств и новых материалов), квантовое машинное обучение. Однако, чтобы иметь практическую ценность, квантовые компьютеры должны увеличить количество логических кубитов на порядок. Среди основных платформ для этой задачи — квантовый компьютер с захваченными ионами, с самым высоким временем когерентности и точностью операций с одним и двумя кубитами. В данной работе рассматривается проект по созданию квантового компьютера на холодных ионах кальция-40. Рассмотрены оптические системы ионизации, охлаждения и детектирования ионов кальция-40. Продемонстрирован захват ионов в ловушку Пауля с последующей компенсацией микродвижений. Показана система стабилизации частоты TiSa лазера для выполнения кубитных операций.

### Список литературы

1. Bruzewicz C. D. et al. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges //Applied Physics Reviews. – 2019. – Т. 6. – №. 2. – С. 021314.
2. Cirac J. I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions //Physical review letters. – 1995. – Т. 74. – №. 20. – С. 4091.
3. Arute F. et al. Observation of separated dynamics of charge and spin in the fermi-hubbard model //arXiv preprint arXiv:2010.07965. – 2020.

А.В. БИБИКОВ,<sup>1</sup> А.В. НИКОЛАЕВ,<sup>1</sup> И.В. БОДРЕНКО,<sup>2</sup> П.В. БОРИСЮК<sup>3</sup> И Е.В. ТКАЛЯ<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>CNR/IOM - Cagliari, Cittadella Universitaria di Monserrato, SP Monserrato-Sestu, I-09042 Monserrato, Italy

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>4</sup>Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева (ФИАН), Москва, Россия

## РАЗЛИЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АТОМОВ БОРА В ЭКЗОЭДРАЛЬНОМ И ЭНДОЭДРАЛЬНОМ ФУЛЛЕРЕНЕ C<sub>60</sub>

С целью возможного применения фуллерепа C<sub>60</sub> в бор-нейтронозахватной терапии рака в данной теоретической работе изучаются связанные состояния одного и двух атомов бора как внутри, так и снаружи фуллерепа C<sub>60</sub> методами молекулярного моделирования из первых принципов. Обнаружено, что таких положений довольно много и их энергии отличаются незначительно. Кроме того, оптимальная конфигурация может меняться, когда, например, к одному атому бора добавляется второй атом бора. В целях идентификации полученных молекулярных комплексов были рассчитаны сдвиги энергии 1s состояний бора.

A.V. BIBIKOV,<sup>1</sup> A.V. NIKOLAEV,<sup>1</sup> I.V. BODRENKO,<sup>2</sup> P.V. BORISYUK,<sup>3</sup> AND E.V. TKALYA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>CNR/IOM - Cagliari, Cittadella Universitaria di Monserrato, SP Monserrato-Sestu, I-09042 Monserrato, Italy

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>4</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## MULTIPLE LOCATIONS OF BORON ATOMS IN THE EXOHEDRAL AND ENDOHEDRAL C<sub>60</sub> FULLERENE

With a view to the possible application of fullerene C<sub>60</sub> to the boron-neutron therapy of cancer, we study the bound states of one and two boron atoms both inside and outside of fullerene C<sub>60</sub> using *ab initio* molecular methods. It has been found that such positions are quite numerous and their energies lie close to each other. In addition, the optimal configuration can change when, for example, a second boron atom is added to one boron atom. In order to identify the resulting molecular complexes, energy shifts of 1s boron states are calculated.

В данной работе мы исследуем фуллереновые комплексы с бором, где бор может находиться в эндоэдральном положении: B@C<sub>60</sub>, B<sub>2</sub>@C<sub>60</sub>, или в экзоэдральном: BC<sub>60</sub> и B<sub>2</sub>C<sub>60</sub>. В дополнение к общему научному интересу, включающему такие проблемы как перенос заряда, возникновение спиновых состояний и появление магнитных свойств, эти молекулы могут быть использованы на практике, например, в онкологии. Ядро атома бора <sup>10</sup>B является перспективным для лечения рака методом нейтронно-захватной терапии. Инкапсуляция атомов бора в фулленере увеличивает количество специфических белков, используемых для доставки <sup>10</sup>B в пораженные ткани. Недавно, с развитием высокоточных ускорителей для компактных нейтронных источников, бор-нейтроно-захватная терапия (БНЗТ) получила новый практический интерес для клинической практики. Одной из главных проблем в БНЗТ является синтез новых соединений на основе бора, которые могут аккумулироваться в определенных тканях, обеспечивая достаточную концентрацию ядер <sup>10</sup>B. Использование внутренней области фуллеренов как контейнера для атомов бора в этой связи может быть перспективным для получения новых радиофармацевтических нуклидов для БНЗТ.

Мы исследовали оптимальные положения одного и двух атомов бора с фулленером C<sub>60</sub>, когда они расположены внутри и снаружи фуллеренового каркаса, используя методы квантовой химии из первых принципов [1,2,3]. Для одного атома бора глобальный энергетический минимум найден для его положения над средней точкой двойной связи фуллерепа в экзоэдральном положении или в центре фуллерепа в эндоэдральном положении. Другой локальный минимум эндфуллерепа B@C<sub>60</sub> найден когда бор находится внутри, на расстоянии 1,82 Å ниже атома углерода.

Также оказалось, что в эндофулленере B@C<sub>60</sub> добавление второго атома бора влияет на расположение первого [1]. Этот же эффект происходит и в экзоэдральном комплексе BC<sub>60</sub>, когда второй атом бора помещается внутрь фуллерепа. Изменение молекулярной геометрии сопровождается переменной характеристик электронного строения атомов бора. Для двух атомов бора – B<sub>2</sub>C<sub>60</sub> – самая низкая энергия часто достигается в состоянии высокого спина. В этих случаях два атома бора настолько близки, что образуют молекулу B<sub>2</sub>, которая имеет спин S = 2 в основном состоянии. В экзоэдральном комплексе фулленер влияет на молекулу B<sub>2</sub> таким образом, что становится предпочтительным триплетное спиновое состояние (S = 1) [1]. Различные расположения атомов бора в фулленере можно идентифицировать экспериментальным образом (в фотонной или электронной спектроскопии), измеряя энергию сдвига E<sub>1s</sub> электронного уровня 1s. Для этой цели были сделаны расчеты энергии E<sub>1s</sub> в разных комплексах.

### Список литературы

1. Bibikov A.V., Nikolaev A.V., Bodrenko I.V., Borisyuk P.V., and Tkalya E. V. Multiple locations of boron atoms in the exohedral and endohedral C<sub>60</sub> fullerene // Physical Review A. 2022. Vol. 105, 022813.
2. Xu J. and Hou G.-L. Comment on "Multiple locations of boron atoms in the exohedral and endohedral C<sub>60</sub> fullerene" // Physical Review A. 2022. Vol. 106, 056801.
3. Bibikov A.V., Nikolaev A.V., Bodrenko I.V., Borisyuk P.V., and Tkalya E. V. Reply to Comment on "Multiple locations of boron atoms in the exohedral and endohedral C<sub>60</sub> fullerene" by J. Xu and G.-L. Hou. // arXiv:2211.06105v1 [cond-mat.mtrl-sci]. 2022. <https://arxiv.org/abs/2211.06105v1>.



Д.О. ТРЕГУБОВ<sup>1,2</sup>, А.А. ГОЛОВИЗИН<sup>1</sup>, Д.А. МИШИН<sup>1</sup>, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО<sup>1,2</sup>,  
М.О. ЯУШЕВ<sup>1</sup>, К.Ю. ХАБАРОВА<sup>1</sup>, В.Н. СОРОКИН<sup>1</sup>, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПРЕИМУЩЕСТВА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОГО К ОКРУЖЕНИЮ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ЧАСАМИ НА АТОМАХ ТУЛИЯ

Часовой переход 1.14 мкм в атомах тулия обладает рядом преимуществ, которые сподвигли к созданию целого ряда экспериментов по его исследованию, включающих формирование синтетической частоты, малочувствительной к окружению, компактизация вакуумной камеры и сопутствующей оптической схемы магнито-оптической ловушки, усовершенствование процесса формирования пучка холодных атомов, возможность создания непрерывного оптического репера частоты, исследования перехода в твёрдом теле. Приводится описание текущих экспериментов и особенности одновременной работы с часовым переходом сразу в нескольких экспериментальных установках.

D.O. TREGUBOV<sup>1,2</sup>, A.A. GOLOVIZIN<sup>1</sup>, D.A. MISHIN<sup>1</sup>, D.I. PROVORCHENKO<sup>1,2</sup>,  
M.O. YAUSHEV<sup>1</sup>, K.YU. KHABAROVA<sup>1</sup>, V.N. SOROKIN<sup>1</sup>, N.N. KOLACHEVSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ADVANTAGES OF OPTICAL TRANSITION INSENSITIVE TO THE ENVIRONMENT IN EXPERIMENTS WITH THULIUM OPTICAL CLOCKS

Clock transition 1.14  $\mu\text{m}$  in thulium has several advantages that prompted a range of experiments on its research, including investigation of sensitivity of a synthetic frequency to the environment, reduction of the size of the vacuum chamber together with an optical scheme for magneto-optical trap, improvement of the cold atomic beam formation process, possibility of a continuously operating optical frequency reference, and the clock transition investigation in solids. We provide a description of these experiments and operation features of working with the clock transition in several experimental setups simultaneously.

Недавние эксперименты с атомами тулия показали, что часовой переход 1.14 мкм имеет низкую чувствительность к тепловому излучению и внешнему электрическому полю [1], а также к внешнему магнитному полю [2]. Эти результаты сподвигли к созданию нескольких новых экспериментов, которые учитывают и используют эти особенности.

В классическом эксперименте по исследованию оптических часов на атомах тулия открылась новое направление исследований – синтетическая частота перехода. Она формируется как полусумма частот двух часовых переходов в атоме тулия, которые обладают противоположной квадратичной чувствительностью частоты к магнитному полю. Это не только позволяет подавить влияние эффекта Зеемана, но и одновременно с работой часов наблюдать флуктуации магнитного поля по сигналу разности двух частот переходов.

Низкая чувствительность к тепловому излучению позволяют создать вакуумную камеру без зеемановского замедлителя, тем самым уменьшая её в размерах. Компактная версия вакуумной камеры была оптимизирована под эксперимент, и позволяет захватывать большее число частиц при аналогичных параметрах эксперимента. В данный момент идёт подготовка к эксперименту по сличению синтетических частот в двух различных установках.

Неожиданное применение использование синтетической частота нашлось в области непрерывного оптического репера частоты, где возбуждение двумя часовыми переходами с разных сторон позволяет на несколько порядков подавить эффект Доплера [3]. Для этого в лаборатории разрабатывается двумерная магнито-оптическая ловушка для формирования предварительно охлаждённого потока атомов, что в дальнейшем будет применяться для непрерывного стандарта.

Низкая чувствительность к окружению так же обещает узкие спектры перехода в случае атомов тулия в твёрдом теле – кристаллической решётке благородных газов. В лаборатории собрана вакуумная камера для формирования холодных кристаллов, напыления атомов тулия и их спектроскопии.

Всё множество экспериментов, которые сейчас проводятся в одной лаборатории, работают от одного часового лазера, благодаря чему влияние шумов лазера на разность частот двух установок уменьшается.

Работа поддержана Грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук № МК-2322.2022.1.2

### Список литературы

1. Golovizin, A. et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift. *Nat. Commun.* 10, 1–8 (2018).
2. Golovizin, A et al. Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts. *Nat. Commun.*, 12(1), 5171 (2021).
3. Mishin D. et al. Continuous operation of a bicolor thulium optical lattice clock. *Applied Physics Express* 14(11), 112006 (2021).
4. Трегубов Д. и др. Разработка схемы эксперимента по напылению атомов тулия в кристаллическую решётку благородных газов для спектроскопии. Сборник трудов ЛаПлаз-2022 (2022).

БОРИСЮК П.В., БУХАРСКИЙ Н.Д., ТЕЛЬНОВ Е.Ю.,  
ТРИЧЕВ К.К., ЧЕРЕПАНОВ П.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## УВЕЛИЧЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИОНОВ ПОПАДАЮЩИХ В АПЕРТУРУ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКИ ПАУЛИ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПО СРЕДСТВОМ ФОКУСИРОВАНИЯ АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В данном докладе представлены результаты работ по направлению решения задачи по коллимации пучка многозарядных ионов, формируемого на ранних стадиях разлета лазерной плазмы, нами предложена универсальная физическая система на основе магнитной катушки. Рассмотрена физическая модель разлета ионов лазерной плазмы в формируемом магнитном поле, предложена численная модель и разработана реальная конструкция источника многозарядных ионов с коллимацией пучка магнитным полем. Представлены результаты экспериментального исследования эффективности загрузки ионной ловушки методом лазерной абляции в условиях внешнего магнитного поля. Проведено сопоставление численной модели с экспериментальными результатами по получению и захвату ионов  $\text{Th}^{3+}$ .

BORISYUK P.V., BUKHARSKY N.D., TELNOV E.Yu.,  
TRICHEV K.K., CHEREPANOV P.A.

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## AN INCREASE IN THE NUMBER OF IONS ENTERING THE APERTURE OF THE QUADRUPOLE PAULI TRAP OF LINEAR CONFIGURATION BY FOCUSING THE ABLATIVE PLASMA WITH A MAGNETIC FIELD

This report presents the results of work in the direction of solving the problem of collimation of a beam of multicharged ions formed at the early stages of the expansion of laser plasma, we have proposed a universal physical system based on a magnetic coil. A physical model of the scattering of laser plasma ions in a formed magnetic field is considered, a numerical model is proposed and a real design of a source of multicharged ions with collimation of the beam by a magnetic field is developed. The results of an experimental study of the efficiency of loading an ion trap by laser ablation under conditions of an external magnetic field are presented. The numerical model is compared with experimental results on the production and capture of ions  $\text{Th}^{3+}$ .

Получение ионов осуществляется методом лазерной абляции твердотельной мишени исследуемого материала, разлет плазмы осуществляется в телесный угол превышающий входную апертуру ловушки, далее ионы захватываются и удерживаются внутри ловушки. Для увеличения ионов предложен метод коллимации плазмы во входную апертуру магнитным полем.

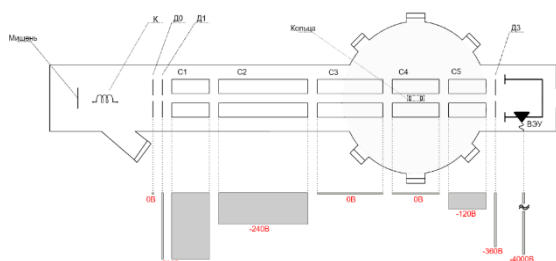


Рис.1 Схематичное изображение многосекционной квадрупольной ионной ловушки с возможностью создания произвольного потенциала на различных секциях. Д1-Д3 - диафрагмы; С1-С5 - секции ловушки; ВЭУ - вторично-электронный умножитель; К - зона установки соленоида.

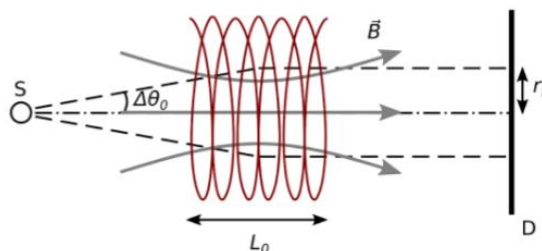


Рис. 2. Принципиальная схема магнитной линзы для коллимации потока частиц, создаваемых точечным источником S.

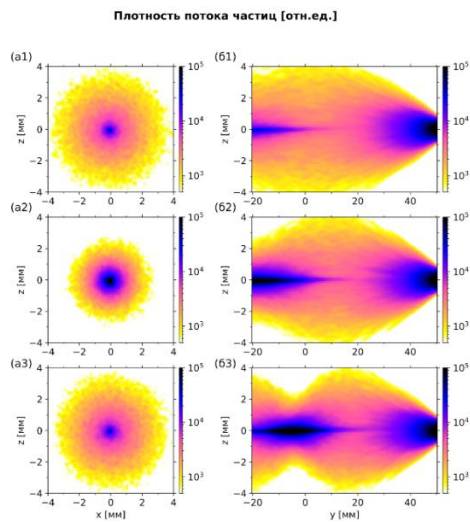


Рис. 3. (a1-a3) Результаты численного моделирования плотности потока ионов  $\text{Th}^{3+}$  в плоскости  $y=-20$  мм, перпендикулярной оси соленоида и соответствующей плоскости диафрагмы, для трех различных значений тока в обмотках соленоида - 16 А, 24 А и 40 А, соответственно. (b1-b3) Плотность потока ионов  $\text{Th}^{3+}$  в плоскости  $x=0$  мм, проходящей через ось соленоида, для тех же значений тока - 16 А, 24 А и 40 А.

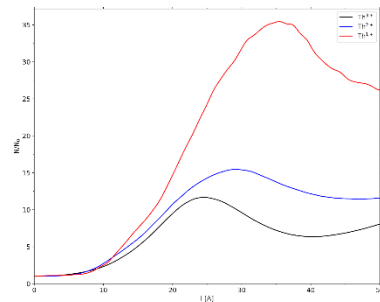


Рис.4(а) Теоретическая зависимость отношения числа частиц  $N$ , проходящих через диафрагму при токе в витке  $I$ , к числу частиц  $N_0$ , проходящих через диафрагму при отсутствии тока в обмотках соленоида ( $I=0$  А) для трех различных ионов тория.

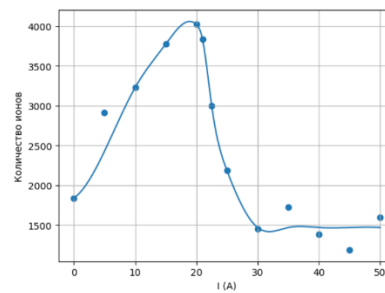


Рис.4(б) Экспериментальная зависимость числа уловленных ионов  $\text{Th}^{3+}$  от тока через соленоид.

Т. СОЛАРЕВИЧ<sup>1</sup>, П.В. БОРИСЮК<sup>1</sup>, Т. М. КОРМИЛИЦЫН<sup>2</sup>,  
1 - Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия  
2 - Частное Учреждение "ИТЭР-Центр", Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДМНП ИТЭР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ Д-Д И Д-Т НЕЙТРОНАМИ

Рассмотрены измерительные характеристики ионизационных камер деления (ИКД) входящих в состав Диверторного Монитора Нейтронного Потока ИТЭР. Проведен анализ физических процессов, происходящих в объеме детектора. Разработана модель планарной ИКД для расчета ее функции отклика в поле излучения быстрых нейтронов с помощью специализированного (G4HPNeutron) класса в ПО GEANT4. Рассчитана функция отклика планарной ИКД на быстрые D-D и D-T нейтроны. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования и амплитудных спектров, полученных в ходе прошедших экспериментальных кампаний с быстрыми нейтронами.

T. SOLAREVIC , P.V. BORISYUK, T.M. KORMILITSYN.  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## ANALYSIS OF THE MEASUREMENT CHARACTERISTICS OF FISSION CHAMBERS IN DNFM ITER IN DD AND DT NEUTRON EMISSION

We carried out the performance analysis of the fission chambers that are used in the ITER Divertor Neutron Flux Monitor diagnostic as a tool to measure local fast neutron flux. The calculations by Geant4 software, using the built-in high precision neutron (G4HPNeutron) class were carried out to determine the response function of the planar fission chamber and the modeled spectrum of fission fragments produced by DD and DT neutrons. We discuss the results of the forward modeling task in comparison with the detector pulse-height spectrum acquired during experimental campaigns on fast neutron generators. Results were compared to the fast neutron experimental data.

Для детектирования нейтронов, рожденных в D-D и D-T реакциях синтеза, может быть использован широкий ряд средств. Данное исследование сфокусировано на ионизационных камерах деления с электродами, покрытыми слоями урана-238. В поле быстрых нейтронов происходит вынужденное деление тяжелого ядра, осколки этой реакции при торможении создают ионизацию в газе детекторного объема. Средняя кинетическая энергия осколков реакции деления составляет 2,5 МэВ, что соответствует локальному максимуму амплитудного спектра детектора [1]. Продукты реакции деления ионизируют газ отдавая свою кинетическую энергию парам типа электрон-ион внутри камеры. Полученное системой сбора данных количество электрических импульсов интерпретируется в количество зарегистрированных детектором нейтронов, что в свою очередь позволяет говорить о величине потока быстрых нейтронов в месте расположения ИКД. Исходное количество нейтронов источника, определяемое штатными мониторами а также методом активационного анализа позволяет оценить эффективную чувствительность ИКД.

В работе представлена упрощенная модель работы ИКД с планарными электродами в изотропном источнике быстрых нейтронов энергией 14,1 МэВ, прохождение которых через чувствительный объем моделируется в ПО Geant4 [2] с использованием метода Монте-Карло. В качестве активной среды детектора использовалась смесь аргона, гелия и двухатомного азота. Для получения амплитудного спектра была осуществлена дискретизация шкалы энергии с шагом 0,25 кэВ. Для анализа характеристик регистрируемого излучения использовались виртуальные фильтры для отбора сохраняемых значений оставленной в чувствительном объеме детектора энергии по характеристикам частицы - ParticleFilter. Все характеристики элементарных частиц взяты из базы данных ENDF-B/VIII.0, адаптированной для ПО Geant4 [3], Результатом расчёта является распределение оставленной в детекторе энергии, в том числе парциальное энергетическое распределение в зависимости от типа теряющих ее частиц.

Сравнение результатов моделирования с амплитудным спектром ИКД, полученным в ходе эксперимента, позволяет анализировать корректность предложенной модели, а также говорить о потенциале ее использования для подтверждения заявленных производителем характеристик ИКД.

### Список литературы

1. N. Blanc de Lanaute , A. Lyoussi, F. Mellier // Simplified Modeling of "Fission Products /Converting Material & Filling Gas" Interaction in a Miniature Fission Chamber - Comparison with Experimental Data, 2011. Vol.4. P. 1–7.
2. Recent Developments in Geant4, J. Allison et al. Nucl. Instrum. Meth. A 835 (2016) 186-225.
3. E. Mendoza, D. Cano-Ott, Update of the Evaluated Neutron Cross Section Libraries for the GEANT4 Code, IAEA technical report **INDC(NDS)-0758**, Vienna, 2018.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА НА КРЕМНИИ

В данной работе были получены сверхтонкие плёнки нанокластеров тантала диаметром 1-16 нм на кремнии, морфология плёнок и электронные свойства нанокластеров были исследованы методами сканирующей туннельной микроскопии и сканирующей туннельной спектроскопии.

V.A. SHILOV<sup>1</sup>, D. V. BORTKO<sup>1</sup>, P.V. BORISUK<sup>1</sup>, O.S. VASILIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## STUDY OF THE ELECTRONIC PROPERTIES OF TANTALUM NANOCCLUSERS ON SILICON

In this work, ultrathin films of tantalum nanoclusters with a diameter of 1-16 nm on silicon were obtained. The electronic properties of tantalum nanoclusters were studied by the methods of scanning tunneling spectroscopy.

В настоящее время создание термо-фотовольтаических преобразователей вызывает повышенный интерес. Это в первую очередь связано с необходимостью увеличения эффективности солнечных преобразователей и радионуклидных источников питания, а так же эффективного использования тепловых потерь. Задачей данной работы является создание и исследование уникальной системы на основе нанокластеров металлов, потенциально позволяющей эффективно поглощать и преобразовывать широкий спектр оптического излучения, включая ближний ИК-диапазон, с целью последующего создания эффективного термо-фотовольтаического материала на основе наноструктурированной пленки. При помощи кластерного источника Nanogen-50 (Mantis Deposition Ltd.), установленного в сверхвысоковакуумном комплексе анализа поверхности Omicron, методом магнетронного распыления формировался поток нанокластеров тантала различных размеров, которые далее фильтровались при помощи квадрупольного масс-фильтра. Таким образом обеспечивалась возможность формирования потока монодисперсных наночастиц с отклонением по размерам не более 2% с последующим осаждением на поверхность подложки. Диаметр осаждаемых на кремний нанокластеров составлял от 1,5 нм до 15 нм. Данным методом были получены сверхтонкие кластерные плёнки нанокластеров тантала на кремнии диаметром от 1,5 до 15 нм, которые были исследованы методами сканирующей туннельной микроскопии (рис. 1) и сканирующей туннельной спектроскопии (СТС). Измеренные дифференциальные вольтамперные характеристики имеют немонотонный характер (рис. 2), а туннельная проводимость значительно меняется в зависимости от размера нанокластера, что может свидетельствовать об изменении плотности электронных состояний вблизи энергии Ферми.

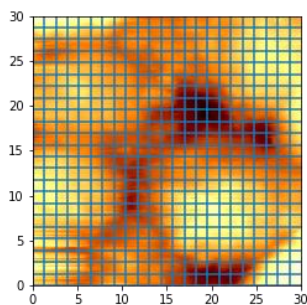


Рис. 1. Изображение нанокластеров тантала на кремнии, полученное при помощи сканирующей туннельной микроскопии (размер области сканирования 30нм X 30нм). Точки, в которых были сняты туннельные вольтамперные характеристики, показаны как пересечения сетки.

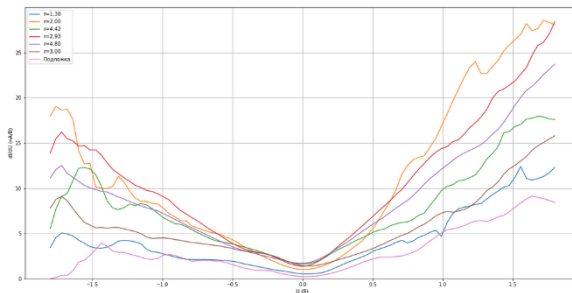


Рис.2. Дифференциальные вольтамперные характеристики нанокластеров тантала радиусами 1-5нм

А.П. ВЯЛЫХ<sup>1,2</sup>, А.В. СЕМЕНКО<sup>1</sup>, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ<sup>1</sup>, Д.В. СУТЫРИН<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево, Солнечногорский район, Московская область, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

## ПЕРВИЧНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АТОМОВ ИТТЕРБИЯ В МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

Дано краткое описание оптического спектроскопа для получения ультрахолодных атомов иттербия и системы управления экспериментами. Проведено исследование характеристик облака атомов, захваченных в первичную магнитооптическую ловушку – количества атомов, их температуры, времени накопления. Сделаны выводы о необходимых улучшениях экспериментальной установки.

A.P. VYALYKH<sup>1,2</sup>, A.V. SEMENKO<sup>1</sup>, G.S. BELOTELOV<sup>1</sup>, D.V. SUTYRIN<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>FSUE “All-Russian Research Institute of Physico-Technical and Radiotechnical Measurements”, Mendeleevo, Solnechnogorsky district, Moscow region, Russia  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FIRST STAGE LASER COOLING OF YTTERBIUM ATOMS IN A MAGNETO-OPTICAL TRAP

A brief description of an optical spectroscope for obtaining ultracold ytterbium atoms and an experiment control system is given. The characteristics of an atomic cloud trapped in a first-stage magneto-optical trap – the number of atoms, their temperature, and accumulation time - have been studied. Conclusions are drawn about the necessary improvements of the experimental setup.

С появлением оптических стандартов частоты (ОСЧ) человечеству открылась возможность проводить измерения частот с относительной неопределённостью  $10^{-18}$  [1]. Благодаря такой высокой точности измерений, достигнутой ОСЧ, им можно найти применение во таких сферах, как спутниковая навигация, гравиметрия, геодезия, фундаментальные научные исследования [2,3]. Однако, для этого ОСЧ должен быть достаточно компактным, чтобы его можно было перевозить.

В работе представлена конструкция вакуумного спектроскопа ФГУП «ВНИИФТРИ» и системы управления экспериментами, на которых сейчас ведется исследование первичного охлаждения атомов иттербия в МОЛ. В ходе исследований была выявлена необходимость создания системы управления экспериментами, обеспечивающей временную синхронизацию приборов на микросекундном уровне. Получены зависимости количества атомов  $^{174}\text{Yb}$  (рис. 1) и  $^{171}\text{Yb}$ , захваченных в МОЛ, от частоты охлаждающего излучения и от градиента магнитного поля катушек. Проведена оценка температур обоих исследуемых изотопов по скорости разлёта облака атомов.

Полученные наработки могут быть использованы для улучшения существующей экспериментальной установки и для создания компактного оптического спектроскопа на основе дифракционной решетки или атомного чипа [4,5].

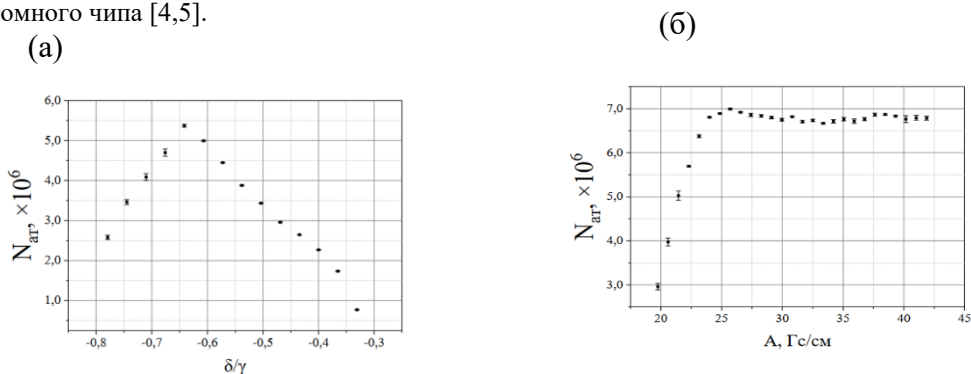


Рис. 1. Зависимость количества атомов  $^{174}\text{Yb}$ , захваченных в МОЛ, от частотной отстройки излучения МОЛ от резонанса охлаждающего перехода  $\delta$  по отношению к ширине линии этого перехода  $\gamma$  (а), и от градиента магнитного поля  $A$  (б).

Список литературы

- Bothwell T. et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of  $2.0 \times 10^{-18}$  // Metrologia. IOP Publishing, 2019. Vol. 56, № 6. P. 65004.
- Dai S.-Y. et al. Cold atom clocks and their applications in precision measurements // Chinese Phys. B. IOP Publishing. 2021. Vol. 30, № 1. P. 13701.
- Белотелов Г. С., Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н. На пути к мобильному оптическому стандарту частоты на нейтральных атомах иттербия // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6, № 1. – С. 24-31.
- McGehee W.R. et al. Magneto-optical trapping using planar optics // New J. Phys. IOP Publishing, 2021. Vol. 23, № 1. P. 13021.
- Jöllenebeck S. et al. Hexapole-compensated magneto-optical trap on a mesoscopic atom chip // Phys. Rev. A. APS, 2011. Vol. 83, № 4. P. 43406.

К.П. ГАЛСТЯН, И.В. ЗАЛИВАКО, А.С. БОРИСЕНКО, И.А. СЕМЕРИКОВ, Н.В. СЕМЕНИН,  
 М.Д. АКСЕНОВ, А.Е. КОРОЛЬКОВ, К.Ю. ХАБАРОВА, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ  
 Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия  
 Российский квантовый центр

## РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ НА ИОНАХ ИТТЕРБИЯ-171

Продемонстрированы квантовые алгоритмы на пятикубитном вычислителе на основе ионов иттербия. Для кодирования квантовой информации был использован квадрупольный оптический переход на длине волны 435 нм. Особенностью компьютера является возможность использования для кодирования кудитов – систем, с наличием более чем двух уровней в каждом ионе, что является перспективным подходом к масштабированию квантовых вычислителей. Созданный квантовый компьютер интегрирован с облачной платформой, при помощи которой квантовые алгоритмы могут запускать удаленные пользователи.

K.P. GALSTYAN, I.V. ZALIVAKO, A.S. BORISENKO, I.A. SEMERIKOV, N.V. SEMENIN, M.D.  
 AKSENOV, A.E. KOROLKOV, K.Yu. KHABAROVA, N.N. KOLACHEVSKY  
 Physical Institute. P.N.Lebedev RAS, Moscow, Russia  
 Russian Quantum Center

## IMPLEMENTATION OF QUANTUM ALGORITHMS ON YTTERBIUM-171 IONS

Quantum algorithms are demonstrated on a five-qubit computer based on ytterbium ions. A quadrupole optical transition at a wavelength of 435 nm was used to encode quantum information. A feature of the computer is the ability to use qudits for coding – systems with more than two levels in each ion, which is a promising approach to scaling quantum computers. The created quantum computer is integrated with a cloud platform through which quantum algorithms can be run by remote users.

В данной работе создан пятикубитный квантовый вычислитель на ионах иттербия, с поддержкой кудитных операций. Была продемонстрирована реализация алгоритмов Гровера и Бернштейна-Вазирани, а также бенчмаркинг-алгоритмов. Для характеристики достоверности однокубитной операции были проведены эксперименты по рандомизированному бенчмаркингу [1]. Для этого выполнялись цепочки, состоящие из случайных Клиффордовских гейтов в следующей транспиляции:  $R_z(\phi)R_x\left(-\frac{\pi}{2}\right)R_z(\theta)R_x\left(\frac{\pi}{2}\right)R_z(\lambda)$ . Достоверность однокубитной операции по результатам этого эксперимента составила 99.1%.

Также была проведена оценка достоверности двухкубитных операций путем оценки достоверности подготовки Белловского состояния, составившая более 80% и достоверности однокубитных операций по измерению контраста осцилляций Раби не менее 96%. На рис. 1 ниже представлена реализация двухкубитных операций типа Мельмера-Соренсона (МС).

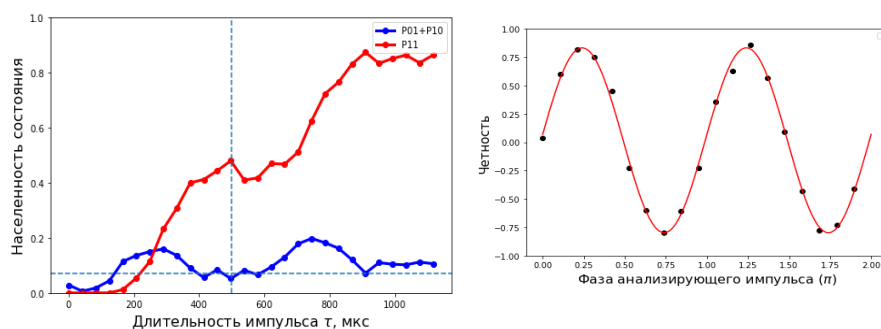


Рис. 1 - Эволюция населенности состояний ионов при проведении двухкубитной операции типа МС и зависимость четности состояний ионов от фазы анализирующего импульса

### Список литературы

1. Knill E. et al. Randomized benchmarking of quantum gates //Physical Review A. – 2008. – Т. 77. – №. 1. – С. 012307



П.М. ГУНИН, С.С. ДОНЧЕНКО

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»,  
город Менделеево*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МАКЕТА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО УГЛОМЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССОГЛАСОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ МЕЖСПУТНИКОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА КОСМИЧЕСКОЙ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ**

Рассмотрена проблема совмещения оптических осей межспутникового интерферометра для космической гравитационно-волновой антенны. Предложена схема угломерного устройства на основе дифференциального углового датчика для наведения оптических систем космических аппаратов с точностью  $0,1''$  в режиме реального времени. Разработан макет угломерного устройства. Предложены методы оценки его точностных характеристик. Приведены результаты экспериментальных исследований макет угломерного устройства, подтверждающая правильность выбранных технических решений.

P.M. GUNIN, S.S. DONCHENKO

*All-Russian Scientific Research Institute for Physical-Engineering and Radiotechnical Metrology, Mendeleevo, 2023*

## **RESULTS OF DEVELOPMENT OF INTERFEROMETRIC GONIOMETRIC DEVICE PROTOTYPE FOR MISALIGNMENT EVALUATION IN OPTICAL AXES OF INTERSATELLITE INTERFEROMETER OF SPACE GRAVITATIONAL WAVE ANTENNA.**

The problem of alignment of optical axes of intersatellite interferometer for space gravitational wave antenna is considered. The scheme of angular measuring device based on a differential angular sensor for optical systems of spacecrafts pointing with an accuracy of  $0.1''$  in real time is proposed. A prototype of angular measuring device is developed. Methods of its accuracy characteristics estimation are proposed. The results of experimental studies of the angular metering device prototype are presented, confirming the correctness of the selected technical solutions.

По всему миру в данный момент активно разрабатывается множество проектов гравитационно-волновых антенн, для детектирования и изучения гравитационных волн. Интерес к этим волнам вызван возможностью с их помощью получать информацию о сверхмассивных объектах нашей вселенной, процессах, связанных с такими объектами, или о процессах, протекавших в нашей вселенной в начале ее существования, посредством изучения реликтового излучения. На данный момент уже создано несколько наземных ГВА, они имеют названия LIGO, Virgo и GEO600. Наиболее перспективными проектами космических антенн являются LISA и TIANQIN. Проект разрабатываемой в России космической ГВА называется SOIGA (Space Optical Interferometric Gravitational wave Antenna). Он предполагает размещение нескольких космических аппаратов (КА) на орбитах ГЛОНАСС. В зависимости от конфигурации размещаются от 3 до 8 спутников, в этой работе будем предполагать использование квадратной схемы с использованием 4 спутников, расположенных в вершинах квадрата. При помощи этих КА в космосе формируется интерферометрическая система, способная измерять относительное перемещение бортовых пробных масс при прохождении через них гравитационной волны. Длина плеча интерферометра в такой системе составляет порядка 43 тыс. км.

В работе [1] была оценена проектная чувствительность, необходимая для детектирования различных волн, а также достижимые для различных конфигураций системы уровни чувствительности. Для системы, рассматриваемой в данной работе, можно сделать оценку необходимого уровня чувствительности к перемещению пробной массы, которая составляет 4 пм.

Для создания межспутниковой интерферометрической системы необходимо обеспечить совмещение оптических осей приемо-передающих систем, размещенных на КА. Для этого предлагается использовать систему наведения, которая состоит из 2-х систем наведения: грубой и точной. В качестве грубой системы углового наведения используется звездный трекер, который имеет точность  $2''$  угловые секунды. Звездный трекер служит для инициализации точной системы наведения. Точная система углового наведения должна выполнить совмещение оптических осей с ошибкой не более  $0,1''$  угловой секунды в режиме реального времени для достижения требуемой чувствительности межспутникового лазерного интерферометра.

На данный момент нет серийных коммерчески доступных устройств, удовлетворяющих заданным требованиям по точности углового наведения. Исходя из этого возникает необходимость разработки угломерного устройства для проекта ГВА SOIGA, удовлетворяющего поставленным перед такой системой требованиям.

Целью этой работы является определение облика угломерного устройства для системы наведения в проекте ГВА SOIGA, которая обеспечивает совмещение оптических осей межспутникового интерферометра с точностью  $0,1''$  в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести обзор устройства углового наведения, применяемого в миссиях GRACE-FO и LISAPathfinder; разработать функциональную схему угломерного устройства и реализовать её в виде макета; разработать метод определения и проверки чувствительности макета угломерного устройства и провести экспериментальные исследования макета угломерного устройства.

В работах [2, 3], посвящённых миссиям GRACE-FO и LISAPathfinder для решения задачи точного углового наведения используется устройство углового наведения на основе дифференциального волнового датчика. Описать принцип действия квадратурного дифференциального волнового датчика можно описать следующим образом. На площадку квадратурного фотоприёмного устройства падают два луча: опорный и измерительный, угол  $\alpha$  между которыми необходимо измерить. Из-за неколлинеарности этих лучей возникает разность фаз между сигналами на площадках фотодетектора (Рис.1).

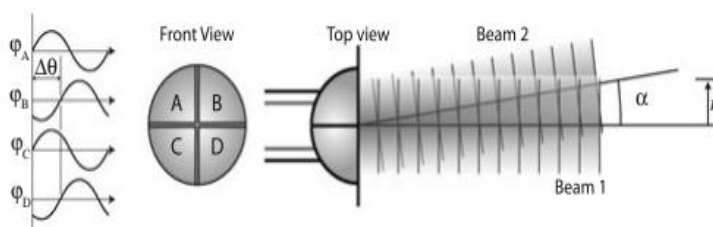


Рис.1 Фотодетектор

Найдем разность фаз между сигналами с фотоприемника в сагиттальном и меридиональном сечениях по формулам (1) и (2):

$$\Delta\theta_{гор} = \bar{\theta}_L - \bar{\theta}_R = \frac{\phi_A + \phi_C}{2} - \frac{\phi_B + \phi_D}{2} \quad (1)$$

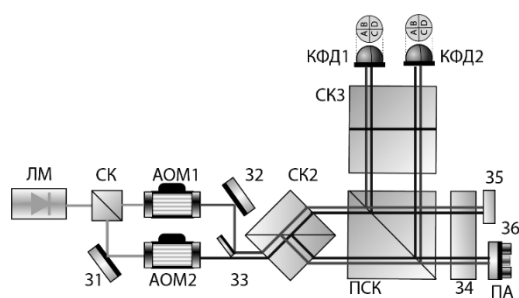
$$\Delta\theta_{верт} = \bar{\theta}_T - \bar{\theta}_B = \frac{\phi_A + \phi_B}{2} - \frac{\phi_C + \phi_D}{2} \quad (2)$$

Проекции искомого угла  $\alpha$  в двух сечениях найдем по формуле. (3):

$$\alpha = \frac{3\lambda}{16r} \Delta\theta \quad (3)$$

Основной недостаток реализаций квадратурного датчика [2, 4, 5] в миссиях LISAPathfinder и GRACE-FO, заключается в том, что измерительный и опорный лучи движутся по различным оптическим элементам, что может приводить к погрешности, связанной с тепловым расширением оптических элементов. Для уменьшения влияния теплового эффекта в миссии LISAPathfinder используются материалы с высокой температурной стабильностью (ULE стекла и Zerodur).

На рисунке 3 а) показан внешний вид макета, созданного в соответствии со схемой на рисунке 3 б):



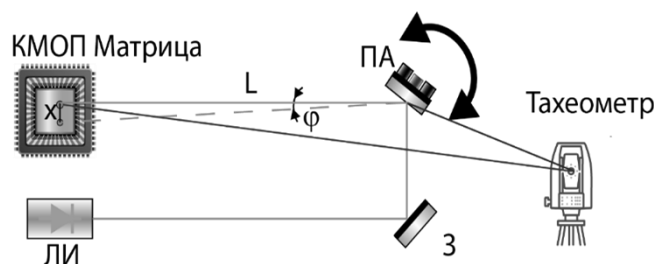
а)

б)

Значительным преимуществом предлагаемой схемы является сонаправленность измерительного и опорного лучей. Так как оптические лучи проходят через одни и те же оптические элементы, то уменьшается влияние температурных изменений в оптической системе на результаты измерений.

Для проверки правильности технических решений, использованных при создании макета угломерного интерферометрического устройства, исследовались спектральная плотность собственных шумов при неподвижных зеркалах, а также чувствительность макета с помощью углового сканирования с шагом  $0,1''$  с помощью одного из зеркал, закрепленных на угловом пьезопозиционере.

Для исследования чувствительности макета, нужно в первую очередь определить характеристики углового пьезопозиционера Thorlabs Polaris Kinematic Mirror Mount. Для исследования этих характеристик была использована схема, представленная на рисунке 4.



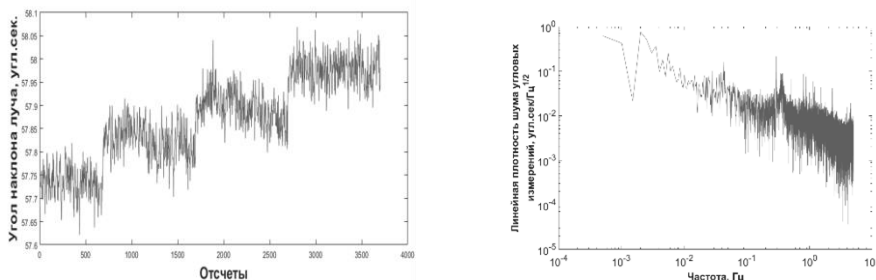
**Рис.4** Схема эксперимента по исследованию характеристик углового пьезопозиционера

Метод определения диапазона угловых перемещений ПА заключается в следующем: при помощи ПА и зеркала З лазерный луч отклоняется на удаленную КМОП-матрицу. КМОП-матрица регистрирует кадры с пятнами лазерного излучения в двух крайних положениях ПА. С помощью методов цифровой обработки изображений вычислялись координаты центра лазерного пятна  $x_1$  и  $x_2$ . При помощи тахеометра определяется расстояние  $L$  от отражающей поверхности пьезопозиционера до КМОП-матрицы. Величина диапазона угловых перемещений ПА  $\varphi$  вычисляется по формуле:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right) \quad (4)$$

и составляет  $257,7 \pm 0,2''$  угловых секунд. Аналогичным образом находится величина разрешения угловых перемещений пьезопозиционера, для этого напряжение изменяется ступенчато, с шагом в 1В. Оценка величина разрешения составила  $1,72 \pm 0,28''$  угловых секунд. Минимальный шаг перестройки ПА составляет 0,1 В, однако измерить угловое перемещение с таким шагом не позволяет точность используемого метода. Далее, будем считать что преобразования напряжения в угловое перемещение линейно и ПА отклоняет луч на  $0,17''$  при шаге перестройки напряжения в 0,1В.

Для определения собственных шумов макета угломерного интерферометра опорное и измерительное зеркала фиксировались и проводились измерения углов между опорным и измерительным пучком в состоянии покоя. Результат измерения в виде спектральной плотности шума представлен на рис.. Затем на вход ПА подавалось напряжение с шагом в 0,1В (что соответствует угловому перемещению  $\approx 0,17''$ ) и измерялось приращение угла с помощью макета угломерного интерферометра. Результаты измерений приведены на рис. б.



а)

б)

**Рис.5** Результаты экспериментальных исследований макета угломерного интерферометра

#### Заключение

В работе был определён и представлен облик угломерного интерферометрического устройства для проекта ГВА SOIGA. Была разработана функциональная схема угломерного интерферометрического устройства. Был разработан метод для оценки точности угломерного устройства на основе углового пьезопозиционера. Были оценены собственные шумы угломерного интерферометрического устройства: для частот в диапазоне от 10 мГц до 100 мГц они не превышают  $0,1''$  угловой секунды, для диапазона от 100 мГц до 1 Гц не превышают  $0,06''$  угловой секунды, а для диапазона от 1 Гц до 10 Гц не выше  $0,02''$  угловой секунды. Также с помощью углового пьезопозиционера, при помощи вносимых этим устройством сдвигов, была показана возможность измерения угловых сдвигов до  $0,1''$  с помощью предложенной схемы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022\19.

#### Список литературы

- [1] Донченко С.С., Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Харламов П.Г., Карауш Е.А., Гостев Ю.В., Соколов Д.А., Лавров Е.А., „Особенности высокоточной космической лазерной гравитационно-волновой антенны на основе спутников, движущихся по орбитам ГЛОНАСС”, УДК 52.08, 528.223
- [2] B.S.Sheard, G.Heinzel, K. Danzmann, D. A. Shaddock, W. M. Klipstein & W. M. Folkner, „Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission”, May 2012, Springer-Verlag 2012.
- [3] P. Bender A. Brillet I. Ciufolini A.M. Cruise C. Cutler K. Danzmann, e.t.c., “Laser Interferometer Space Antenna for the detection and observation of gravitational waves”, Pre-Phase A Report Second edition, July 1998
- [4] M.Chwalla, K.Danzmann, M.Dovale Alvarez, e.t.c., “Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer”, Phys. Rev. Applied 14, 014030 – Published 10 July 2020
- [5] F Gibert, M Nofriarías, N Kamesis, L Gesa, V Martín, I Mateos, e.t.c., “Thermo-elastic induced phase noise in the LISA Pathfinder spacecraft”, 2015 Class. Quantum Grav. 32 045014

**Секция  
СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Руководитель секции

- зам.зав. кафедры 70  
Менушенков Алексей Павлович

Секретари секции

- ассистент кафедры 70  
Чернышева Ольга Викторовна

Тел.: 8(495)788-56-99, доб.8194  
E-mail: [ovchernysheva@mephi.ru](mailto:ovchernysheva@mephi.ru)

П.В. КОНАРЕВ<sup>1,2</sup>, В.В ВОЛКОВ<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

## РАЗДЕЛЕНИЕ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ВКЛАДОВ В ИНТЕНСИВНОСТЬ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ДВУХ КОНФОРМАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ ФЕРМЕНТА 3-ИЗОПРОПИЛМАЛАТ ДЕГИДРОГЕНАЗЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЙ КОЛОНКИ

Проведено моделирование разделения молекул 3-изопропилмалат дегидрогеназы из *Thermus thermophilus*, находящихся в растворе в двух конформационных состояниях, на хроматографической колонке, присоединенной к измерительной кювете синхротронной станции малоуглового рентгеновского рассеяния. По модельным данным методом эволюционного факторного анализа восстановлены профили интенсивности рассеяния от открытой и закрытой форм молекул фермента.

P.V. KONAREV<sup>1,2</sup>, V.V. VOLKOV<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>FSRC “Crystallography and photonics”, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

## DECOMPOSITION OF THE INLINE CHROMATOGRAPHY SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING DATA FROM TWO PARTIALLY OVERLAPPING CONFORMATIONAL STATES OF 3-ISOPROPYLMALATE DEHYDROGENASE ENZYME

The simulation of the separation of two conformational states of 3-isopropylmalate dehydrogenase molecules from *Thermus thermophilus* in solution on a gel chromatographic column attached to a sample cell of a small-angle X-ray scattering synchrotron beamline is performed. The scattering intensity profiles from the open and closed forms of the enzyme molecules were restored by evolutionary factor analysis using the synthetic data set.

При исследовании многокомпонентных систем нередко требуется извлечение информации о строении наноразмерных частиц и макромолекул, свойства которых зависят от их пространственной организации на уровне разрешения 1-2 нанометра. Для неразрушающего исследования таких объектов в естественном состоянии хорошо подходит малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР).

Для разделения вкладов в рассеяние от компонентов белковой смеси и нахождения соответствующих концентраций можно использовать хроматографическую колонку, присоединенную к измерительной кювете (SEC-SAXS). Измеренные через малые интервалы времени интенсивности рассеяния от выходящих из колонки фракций объединяют в матрицу данных, анализ которой может быть проведен с помощью сингулярного разложения и эволюционного факторного анализа (ЭФА) [1]. На основе данного алгоритма авторами разработана программа EFAMIX [2]. В этой работе была проверена эффективность алгоритма в зависимости от количества компонентов, уровня шума в данных, степени асимметрии и соотношения амплитуд пиков концентрационных профилей компонентов для случая олигомерной белковой смеси (т.е. когда массы компонентов отличаются в два и более число раз).

В настоящей работе нами исследован случай белковой смеси с равными молекулярными массами компонентов на примере открытой (неактивной) и закрытой (активной) форм фермента 3-изопропилмалат дегидрогеназы (IPMDH) из *Thermus thermophilus* [3]. Теоретический набор данных SEC-SAXS был рассчитан с использованием значительно перекрытых концентрационных профилей и интенсивностей рассеяния от известных структур фермента. К данным рассеяния был добавлен пуассоновский шум на уровне 2-3%. С помощью программы EFAMIX удалось восстановить профили рассеяния для двух конформационных состояний фермента, что демонстрирует высокий потенциал метода ЭФА. Следует отметить, что в настоящее время использование хроматографических колонок, установленных непосредственно перед кюветой, входит в практику типичного оснащения синхротронных малоугловых станций. Разделение фракций с одинаковой молекулярной массой можно осуществлять за счет солевого градиента буферного раствора [2].

Программа EFAMIX входит в пакет ATSAS [4] и доступна на сайте <https://www.embl-hamburg.de/biosaxs/software.html>.

Исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы (соглашение No. 075-15-2021-1355 от 12 октября 2021 года).

### Список литературы

1. Keller H.R., Massart D.L. // Chem. Intellig. Lab Syst. 1991. V. 12, P. 209.
2. Konarev P.V., Graewert M.A., Jeffries C.Y., et al. // Protein Science 2022. V. 31, P. 269.
3. Graczer E., Konarev P.V., Szimler T., et al. // FEBS Letters 2011. V. 585, P. 3297.
4. Malonastas-Castos K., Konarev P.V., Hajizadeh N.R., et al. // J. Appl. Cryst. 2021. V. 54, P. 343.

С.В. АМАРАНТОВ

ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Москва, Россия

## ВЫБОР СТАРТОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ ДЛЯ ИХ РАСЧЕТА ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ

Предложены простые методы определения стартовых значений параметров моделей распределений частиц по размерам, рассчитываемых из кривых малоуглового рентгеновского рассеяния – среднего радиуса и его стандартного отклонения. Для систем с узкими распределениями для этих параметров предложены оценки сверху на основе полученного аналитического выражения для Гинье–области кривой рассеяния от полидисперсной системы с распределением Шульца. Нижние оценки для параметров, как и диапазон размеров, предложено проводить на основе полученного выражения для асимптотики Порода для полидисперсной системы. Предложен метод расчета обобщенного приближения Гинье-Порода в координатах Кратки, из которого также получают независимые оценки среднего размера и дисперсии. Эффективность разработанного подхода продемонстрирована на примере анализа интенсивности рассеяния от водных растворов наночастиц кремнезоль.

S.V. AMARANTOV

FNIC "Crystallography and Photonics" A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, Moscow, Russia

## SELECTION OF STARTING VALUES FOR PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS TO BE CALCULATED FROM SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING DATA

Simple methods are proposed to determine the starting values of parameters of models of particle size distributions calculated from small-angle X-ray scattering curves - the average radius and its standard deviation. For systems with narrow distributions we derive upper estimates for these parameters from the derived analytical expression for the Guinier region of the scattering curve from a polydisperse system with a Schulz distribution. The lower estimates for the parameters as well as for the size range are suggested to be based on the derived expression for the Rock asymptotics for the polydisperse system. A method for calculating the generalized Guinier-Pooda approximation in Kratki coordinates is proposed, from which independent estimates of the mean size and dispersion are also derived. The efficiency of the developed approach is demonstrated by the example of dispersion intensity analysis from aqueous solutions of silica nanoparticles.

В работе представлен метод выбора наиболее подходящих стартовых параметров для расчета распределений частиц по размерам в предположении, что частицы однородные, имеют сферическую форму, а сам образец можно отнести к системе так называемого "разбавленного раствора", т.е. частицы между собой не взаимодействуют. Выбор начального приближения необходим с тем, чтобы при запуске поиска распределения частиц по размерам (программы POLYMIX [1]) программа сразу уходила в область минимума целевой функции, и пользователю не приходилось заниматься многократным перебором стартовых значений. В качестве образцов были выбраны водные растворы коллоидных кремнезоль LUDOX® двух марок SM и TM50. Частицы коллоидных кремнезоль, имея сферическую форму, непористые и диспергированы в воде, имеют плотное ядро (диоксид кремния SiO<sub>2</sub>), а их поверхность покрыта силанольными группами (Si-OH). Наличие силанольных групп делает неподходящим моделирование частиц однородными сферическими частицами, однако, предполагая, что дисперсия радиусов частиц существенно больше, чем ошибка в определении радиуса частиц, вызванная наличием приповерхностного слоя, в этой работе мы будем использовать формфактор однородного шара. Выбор коллоидных кремнезоль обусловлен подходящим размером этих частиц. Такие образцы удобны для отработки методики обработки данных малоуглового эксперимента от полидисперсных систем с узким распределением частиц по размерам.

Актуальностью данной работы является то, что восстановление структурных параметров исследуемого вещества по данным малоуглового рассеяния оказывается плохо обусловленной обратной задачей, решение которой может быть неустойчивым. Основная идея работы заключается в том, что при построении кривой рассеяния в координатах Кратки, то есть  $I s^2(s)$ , здесь  $s$ -модуль вектора рассеяния,  $I$ -интенсивность рассеяния. Кривая рассеяния должна иметь четко выраженный максимум, положение которого будет однозначно определять средний радиус полидисперсной системы  $R_0$ :

$$I s^2 = I_0 s^2 \exp(-s^2 R_0^2 / 5), \quad s \leq s_0 \sqrt{5}_{max}$$

Кроме стартовой оценки для радиуса частиц  $R_0$  в работе также вычисляется его стандартное отклонение  $\sigma_0$ .

Список литературы

1. Svergun D.I., Konarev P.V., Volkov V.V. et al. // J. Chem. Phys. 2000. V.113. P. 1651.

В.И. АККУРАТОВ<sup>1,2</sup>, А.Г. КУЛИКОВ<sup>1,2</sup>, Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ<sup>1,2</sup>, А.Е. БЛАГОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Комбинация рентгеновской дифракции высокого разрешения и рентгеновской дифракционной топографии была использована для анализа и визуализации упругой деформации в монокристаллах сегнетоэлектрического триглицинсульфата (ТГС) при одноосном сжатии. По результатам наблюдалась значительная анизотропия деформационных процессов в зависимости от кристаллографического направления, что можно объяснить предложенным механизмом деформации с суперпозицией механического сжатия, пьезоэлектрической деформации и эволюции доменной структуры.

V.I. AKKURATOV<sup>1,2</sup>, A.G. KULIKO.<sup>1,2</sup>, YU.V. PISAREVSKY<sup>1,2</sup>, A.E. BLAGOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Scientific Research Centre 'Crystallography and Photonics' of Russian Academy of Sciences, Leninskii Prospekt 59, Moscow, 119333, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research Centre 'Kurchatov Institute', Akademika Kurchatova pl. 1, Moscow, 123098, Russian Federation

## IN SITU X-RAY DIFFRACTION STUDIES OF SINGLE CRYSTAL TRIGLYCINE SULPHATE DEFORMATION BEHAVIOR

A combination of high-resolution X-ray diffraction and X-ray diffraction topography was used for analysis and visualization of elastic strain in ferroelectric triglycine sulfate (TGS) single crystals under uniaxial compression. According to the results, a significant anisotropy of deformation processes depending on the crystallographic direction was observed, which can be explained by the proposed deformation mechanism with superposition of compression stress, the piezoelectric effect and ferroelectric domain evolution.

Кристаллические материалы играют важнейшую роль в развитии информационных технологий, микро- и оптоэлектронной промышленности. Особое значение представляют параметры условий эксплуатации материалов, таких как рабочий диапазон температур, вибрационная и механическая нагрузка, давление, радиационное воздействие и др. В настоящей работе предложена методика исследования деформационных характеристик и дефектной структуры монокристаллов в условиях одноосной механической нагрузки при помощи комбинации методов двухкristальной рентгеновской дифрактометрии и рентгеновской топографии на лабораторном источнике рентгеновского излучения [1].

Методика основана на регистрации картин дифракции рентгеновского излучения в геометрии «на просвет» с использованием двумерного детектора в процессе внешнего механического воздействия на исследуемый образец – управляемой одноосной механической нагрузки, создаваемой при помощи компактного гидравлического пресса. Рентгеновская топография относится к прямым методам исследования реальной структуры кристаллов и чувствительна к деформациям и дефектам, которые нарушают периодическое строение кристаллической решетки. Это позволяет изучать динамику решетки кристалла с локализацией по объему при различной величине одноосного сжатия. Использование двухкristальной рентгеновской дифрактометрии позволяет оценивать изменение совершенства кристаллической структуры под нагрузкой.

Для эксперимента в качестве образца был выбран высокосовершенный монокристалл триглицинсульфата (ТГС). ТГС состоит из легких химических элементов и соответственно обладает сравнительно малым поглощением рентгеновского излучения, что позволяет проводить исследования достаточно толстых образцов (толщиной до нескольких мм). В ходе экспериментов образец размером 7×6×3 мм подвергался последовательно увеличивающейся упругой одноосной нагрузке (до 3.5 МПа), одновременно с этим при помощи детектора с размером пикселя 55 мкм регистрировалась серия топограмм. Установлены особенности деформационного поведения кристаллов ТГС при механическом сжатии вдоль кристаллографических направлений [100] и [010]. Обнаружен эффект увеличения интенсивности дифракционных отражений 400 и 060, зависящий от давления. Кроме того, топограммы от взаимно перпендикулярных кристаллографических плоскостей при одинаковом направлении сжатия показывают принципиально разную картину распределения деформаций и обладают различной чувствительностью к макродефектам. Разработанный метод перспективен для оперативной и локальной диагностики дефектов в кристаллических материалах микроэлектронных и оптоэлектронных компонент.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-29-12037, и Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации, грант 075-15-2021-1362.

### Список литературы

1. V.I. Akkuratov, A.G. Kulikov, Yu.V. Pisarevsky and others. // Journal of Applied Crystallography. 2023. V. 56. №. 1.



Г.С. ПЕТЕРС, П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ, М.А. МАРЧЕНКОВА, К.Б. ИЛЬИНА,  
А.Е. СУХАНОВ, Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНЦИИ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ «БИОМУР» НА КУРЧАТОВСКОМ ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Модернизирована станция “БиоМУР” на источнике синхротронного излучения для проведения неразрушающих исследований широкого спектра объектов с неупорядоченной или частично упорядоченной структурой – растворов белков, полимеров и наночастиц, пленок, гелей, порошков и др. – в статике и динамике методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Представлена оптимизированная схема проведения экспериментов, а также показаны наиболее яркие результаты, полученные на станции.

G.S. PETERS, P.V. KONAREV, V.V. VOLKOV, M.A. MARCHENKOVA, K.B. IL'INA,  
A.E. SUKHANOV, Y.V. PISAREVSKY

*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

## **UPGRADE OF SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING BEAMLINE “BIOMUR” AT THE KURCHATOV SYNCHROTRON RADIATION SOURCE**

The new beamline at the synchrotron radiation source for non-destructive study of wide range of objects with disordered or partially disordered structure – protein solutions, polymers, nanoparticles, films, gels, powders etc. – using the small-angle X-ray scattering method has been upgraded. An optimized scheme for conducting experiments has been presented. The examples of practical applications are demonstrated.

Метод малоуглового рентгеновского рассеяния, или сокращенно МУРР, является на сегодняшний день одним из наиболее востребованных методов изучения строения вещества. Повышенный интерес к данному методу обусловлен несколькими факторами. В первую очередь, стоит отметить наличие целого класса фундаментальных и прикладных задач, связанных с исследованием неупорядоченных или слабоупорядоченных систем преимущественно биоорганического происхождения, количество которых, в силу их естественного многообразия, существенно превышает количество неорганических материалов. Также в востребованности метода МУРР играет важную роль его основное преимущество, заключающееся в возможности исследования биологических макромолекул в их нативном состоянии, то есть именно в том виде, в котором они существуют в естественной среде, к примеру, в организме человека или животного.

Станция «БиоМУР» расположена на Курчатовском источнике синхротронного излучения и находится в эксплуатации с 2018 года [1,2]. На станции используется треугольный монохроматор из монокристалла Si (111) и рентгеновское зеркало полного отражения с родиевым покрытием. Минимальный размер пучка на детекторе 480x260 мкм. Для регистрации сигнала используется двумерный пиксельный детектор Pilatus3 1M (DECTRIS, Швейцария) с 20-битным динамическим диапазоном и нулевым собственным шумом. В течение последних лет была проведена оптимизация схемы станции с целью расширения ее функционала и повышения качества проведения экспериментов. В частности, спроектированы и изготовлены новые держатели образцов, позволяющие одновременно размещать для эксперимента до 5 жидких образцов и до 20 порошковых образцов с возможностью точного позиционирования на пучке. Помимо стандартных капилляров имеется возможность использования ячейки с плоским окном, что важно не только в плане импортозамещения, но и дает преимущество по светосиле пучка. Держатель образца для жидких образцов может быть термостабилизирован в диапазоне температур от -30°C до +90°C. Для уменьшения фонового рассеяния были установлены нерассеивающие щели (JJ X-Ray, Дания), а вакуумные окна были заменены с 15-микронного майлара на 40-микронную слюду, в результате отношение сигнал/шум улучшилось в 3.5 раза. Изготовлена новая конструкция микрофлюидной ячейки, имеющая преимущество перед стандартными тонкостенными капиллярами по светопропусканию и позволяющая проводить эксперименты по исследованию динамики растворов в жидкостях.

Указанные преимущества, полученные в результате модернизации станции, подтверждены как на высокомолекулярных объектах (растворы лизоцима, аптамеры, и др.), так и при измерении кластеров прекурсоров в кристаллизационном растворе дигидрофосфата калия (KDP) [3]. В частности, показано, что образование кластеров-прекурсоров KDP способствует дальнейшему росту кристаллов.

### *Список литературы*

1. Peters, G. S., Zakharchenko, O. A., Konarev, P. V., and others //Nucl. Instr. and Meth. A. 2019. Vol. 945. P. 162616.
2. Peters G. S., Gaponov Yu. A., Konarev P. V. and others // Nucl. Instr. and Meth. A. 2022. Vol. 1025. P. 166170.
3. Sukhanov A. E., Iliina K. B., Konarev P. V., Peters G.S. and others //Crystals. 2023. Vol. 13. №. 1. P. 26.

Р.М. МЕНШАРАПОВ<sup>1</sup>, Н.А. ИВАНОВА<sup>1</sup>, Д.Д. СПАСОВ<sup>1,2</sup>, А.А. ЗАСЫПКИНА<sup>1</sup>, Е.А. СЕРЕГИНА<sup>1</sup>, М.В. СИНЯКОВ<sup>1,3</sup>, В.Н. ФАТЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

<sup>3</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАТИНОВЫХ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ МЕТОДОМ EXAFS-СПЕКТРОСКОПИИ

Получены EXAFS-спектры образцов платиновых электрокатализаторов на углеродном и модифицированном диоксидом кремния носителе. Исследовано влияние модификатора на атомное строение наночастиц электрокатализатора.

R.M. MENSCHARAPOV<sup>1</sup>, N.A. IVANOVA<sup>1</sup>, D.D. SPASOV<sup>1,2</sup>, A.A. ZASYPKINA<sup>1</sup>, E.A. SEREGINA<sup>1</sup>, M.V. SINYAKOV<sup>1,3</sup>, V.N. FATEEV<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

<sup>3</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

## STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE PLATNUM ELECTROCATALYSTS BY EXAFS SPECTROSCOPY

EXAFS spectra of samples of platinum electrocatalysts based on carbon and silicon dioxide-modified supports were obtained. The effect of the modifier on the atomic structure of electrocatalyst nanoparticles was studied.

Платиновые электрокатализаторы на углеродном носителе являются основным компонентом электродных слоев в топливных элементах с твердым полимерным электролитом (ТЭ с ТПЭ). Однако, данный тип электрокатализатора имеет низкую коррозионную устойчивость, а также при эксплуатации ТЭ с ТПЭ в условиях низкой влажности возможно пересыхание каталитического слоя [1]. Для улучшения характеристик платинового электрокатализатора применяют дополнительные модификаторы, обладающие необходимыми свойствами. С целью увеличения гидрофильных свойств и устойчивости электрокатализатора к коррозии применяют бинарные оксиды металлов, а также диоксид кремния [2]. Методом, позволяющим определить параметры атомной структуры композитных электрокатализаторов, а также форму и размер является частиц является метод EXAFS-спектроскопии [3].

В настоящей работе полиольным методом были синтезированы электрокатализаторы состава Pt<sup>20</sup>/C, Pt<sup>20</sup>/SiO<sub>2</sub><sup>3</sup>/C, Pt<sup>20</sup>/SiO<sub>2</sub><sup>7</sup>/C, где 20 – масс. % платины, 3 и 7 – масс. % диоксида кремния, C – аморфная сажа марки Vulcan XC-72. Для анализа атомной структуры полученных наноразмерных частиц образцов электрокатализаторов были измерены L<sub>3</sub>-спектры рентгеновского поглощения Pt в дальней области и рассчитаны модули Фурье-образов χ-функций EXAFS-спектров (рис. 1).

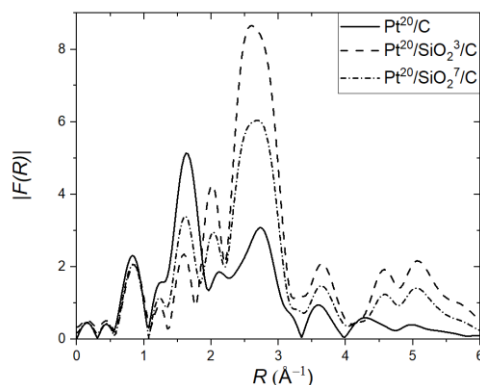


Рис. 1. Модули Фурье-образов  $|F(R)|$  экспериментальных  $\chi$ -функций Pt L<sub>3</sub> EXAFS-спектров стандартного платинового (Pt<sup>20</sup>/C) и модифицированных диоксидом кремния (Pt<sup>20</sup>/SiO<sub>2</sub><sup>3</sup>/C, Pt<sup>20</sup>/SiO<sub>2</sub><sup>7</sup>/C) электрокатализаторов.

*Благодарность.* Работы выполнены в НИЦ «Курчатовский институт» в рамках выполнения приказа №89 от 20.01.2023 по пункту 3п.2.5. «Разработка новых электрокаталитических материалов с улучшенными свойствами для электрохимических устройств с ТПЭ».

### Список литературы

1. Vengatesan S. et al. //International Journal of Hydrogen Energy. 2008. V. 33. №. 1. P. 171-178.
2. Spasov D.D. et al. //Nanotechnol Russia. 2022. V. 17, P. 320–327.
3. Beale A. M., Weckhuysen B. M. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2010. V. 12. №. 21. P. 5562-5574.

А.В. ГОРЯЧЕВСКИЙ<sup>1,2</sup>, Л.П. СУХАНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖАЙШЕЙ КООРДИНАЦИОННОЙ СФЕРЫ ЖЕЛЕЗНОГО ЦЕНТРА В МОЛЕКУЛЕ ОКСИГЕМОГЛОБИНА С ПОМОЩЬЮ XANES-СПЕКТРОСКОПИИ

Разработана расчётная методика для интерпретации XANES спектров молекулы оксигемоглобина. В дальнейшем результаты расчетов будут использованы для уточнения степени окисления и координационного числа Fe-центра оксигемоглобина по данным XANES спектров, а также расположения лигандов. Данное исследование полезно для развития аппаратно-методической базы XANES-спектроскопии.

A.V. GORYACHEVSKIY<sup>1,2</sup>, L.P. SUKHANOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

## MODELING OF THE COORDINATION SPHERE OF THE IRON CENTER IN AN OXYHEMOGLOBIN MOLECULE USING XANES SPECTROSCOPY

A computational technique has been developed for the interpretation of the XANES spectra of the oxyhemoglobin molecule. In the future, the results of calculations will be used to clarify the oxidation state and the coordination number of the Fe center of oxyhemoglobin according to XANES spectra, as well as the location of ligands. This study is useful for the development of the hardware and methodological base of XANES spectroscopy.

Выполненные в НИЦ «Курчатовский институт» экспериментальные исследования плёнок оксигемоглобина [1, 2] на поверхности жидкости делают актуальной интерпретацию XANES [3] спектров для моделирования процессов, происходящих в ближней координационной сфере Fe-центра оксигемоглобина. Новизной исследования является разработка расчётной методики для интерпретации XANES спектров молекулы оксигемоглобина.

С целью предварительного анализа природы химической связи методом B3LYP/6-31G\*\* [4] выполнен квантово-химический расчет молекулы гема – активного комплекса в молекуле гемоглобина. Расчеты молекулы гема проводились в синглетном состоянии при фиксированной геометрии для нейтрального и заряженных кластеров (заряд +2 и +4). Для нейтрального кластера построена высшая занятая молекулярная орбиталь (ВЗМО). Анализ формы ВЗМО молекулы гема, рассчитанной по теории функционала плотности [4] при пороговом значении плотности вероятности 0.02, показал, что заселенность валентных орбиталей определяется не только заселенностью орбиталей на атоме железа, но и преимущественно заселенностью на порфириновом комплексе. Анализ заселенностей по Малликену [4,5] показывает, что при зарядке кластера заряд Fe-центра меняется незначительно (в пределах 0.2 заряда электрона), и можно говорить о сохранении степени окисления атома железа при зарядке молекулы. Внешние функциональные группы молекулы гема слабо проявляются при зарядке кластера (на них отсутствует электронная плотность ВЗМО), и их можно заместить атомами водорода, замкнув валентности на краях кластера, что согласуется с результатами работы [6].

Методом B3LYP/6-31G [4] выполнен квантово-химический расчет кластера в синглетном состоянии (заряд +2), моделирующего ближнее окружение Fe-центра в комплексе оксигемоглобина. Расчеты кластера проводились с частичной оптимизацией в отсутствие и в присутствии молекул воды. Рассчитанные расстояния Fe-N в порфириновом кольце согласуются с измеренными [7] в пределах экспериментальных погрешностей. Показано, что молекулы воды образуют с кластером водородные связи с энергией ~10 ккал/моль в расчете на одну молекулу. Так как водородные связи с молекулой кислорода влияют на ее расположение в кластере [8], для установления характера изменений спектра при наличии и отсутствии молекул воды были построены XANES-спектры полученных оптимизированных конфигураций при помощи программного пакета FDMNES [3]. Молекулы воды слегка деформируют окружение Fe-центра, что возмущает XANES-спектр в области белой линии и вдали от края поглощения. Структура окружения Fe-центра белка в присутствии воды может отличаться от таковой в белковом кристалле [8], что указывает на важность XANES-исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90246.

### Список литературы

1. Novikova N.N. et al. // J. Phys. Chem. B. 2019. V. 123. P. 8370-8377.
2. Novikova N.N. et al. // Crystallography Reports. 2019. V. 64, № 6. P. 952-957.
3. Joly Y. // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2001. V. 63. P. 125120.
4. Frisch M.J. et al. Gaussian 09, Revision A.02. // Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.
5. Фудзинага С. Метод молекулярных орбиталей. Пер. с японск. – М.: Мир, 1983. – 461 с., ил.
6. Liao M.-S., Scheiner S. // J. Chem. Phys. 2002. V. 117. №1. P. 205-219.
7. Lima F.A. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. V. 16. P. 1617.
8. Wilson S.A. et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2013. V. 110. P. 16333–16338.

## ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СПЛАВОВ TiNiCu ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕДИ

Проведено исследование влияния процедуры «омоложения» сплава  $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$  на особенности локального окружения атомов меди и никеля в аморфном состоянии и в мартенситной фазе. Получены параметры локальной структуры сплава и проведен анализ их зависимости от типа предварительной термообработки.

A.A. SEREGIN, O.V. CHERNYSHEVA, A.V. SHELYAKOV, N.N. SITNIKOV, K.A. BORODAKO  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## LOCAL STRUCTURE OF TiNiCu SHAPE MEMORY ALLOYS MARTENSITIC PHASE

The effect of the “rejuvenation” treatment of  $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$  alloy on peculiarities of the local environment of nickel and copper atoms in amorphous and martensite phase was researched. The parameters of the local structure of the alloy are obtained and the analysis of their dependence on the type of the preliminary heat treatment is carried out.

Сплавы на основе TiNi – наиболее распространённые материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ). Структура сплавов, их свойства и наличие ЭПФ во многом зависят от содержания Cu и Ni [1-2]. Свойства мартенситного превращения, несомненно, связаны с перемещениями атомов при охлаждении и нагреве сплавов. При этом эффекты, сопровождающие мартенситный переход при охлаждении и нагреве сплавов, практически не изучены на локальном уровне. В настоящей работе исследованы особенности локального окружения Ni и Cu в трёхкомпонентных сплавах  $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$  с ЭПФ методом EXAFS-спектроскопии с использованием синхротронного излучения. Исследуемые образцы были получены методами спиннингования расплава и планарного литья при скорости охлаждения расплава около  $10^6$  K/c в исходном аморфном состоянии в виде тонких лент толщиной 30-50 мкм (образцы А). Затем некоторые образцы были подвержены процедуре «омоложения», которая заключается в структурном возбуждении аморфных тел за счёт охлаждения до низких температур. В настоящей работе эта обработка была оказана двумя способами. В первом из них аморфные ленты были подвергнуты воздействию 10 изотермических циклов, каждый из которых заключался в 120 секундном удержании образца при температуре 77 K в жидком азоте и 60 секундной выдержке при температуре 373 K в кипящей воде (образцы RJ1). Во втором способе аморфные ленты изотермически обрабатывались в печи в течении 10 минут при фиксированной температуре 623 K, а затем быстро охлаждались в жидком азоте до температуры 77 K (образцы RJ2). Затем некоторые образцы RJ1 и RJ2 были подвержены изотермическому отжигу при 500 K, в результате чего получились кристаллические образцы RJ1+ и RJ2+.

Из-за сильного разупорядочения атомов в аморфных образцах, для них в результате подгонки EXAFS-функций удалось получить только параметры первой координационной сферы. При подгонке EXAFS-функций кристаллических образцов, были получены параметры первых трёх координационных сфер.

Сравнение модулей фурье-преобразования (FT) EXAFS-функций на краях поглощения K-Ni и K-Cu аморфных образцов показало, что процедура омоложения не вносит значительных изменений в структуру первой координационной сферы аморфных сплавов. Подгонка EXAFS-функций показывает, что параметры первой координационной сферы всех аморфных образцов практически не отличаются.

Согласно результатам, полученных для кристаллических образцов, локальная структура образцов RJ2+ несколько более упорядоченная по сравнению со структурой образцов RJ1+, при этом координационные радиусы для этих образцов совпадают в пределах погрешности.

### Список литературы

1. N.N. Sitnikova, A.V. Shelyakov, I.A. Khabibullina, et. al. // *General Purpose Materials* 2018, pp. 279–285.
2. O.V. Chernysheva, A.V. Shelyakov, N.N. Sitnikov, A.A. Veligzhanin, K.A. Borodako, R.V. Sundeev // *Mater. Lett.* 2020, pp. 285.
3. A. Menushenkov, O. Grishina, A. Shelyakov et. al. // *Journal of Alloys and Compounds* 2014, vol. 585, pp. 428–433.

С.В. РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>, А.В. КЛАУЗ<sup>1,2</sup>, А.А. ХОМИЧ<sup>2,1</sup>, А.А. БОГАЧЁВ<sup>2,1</sup>, А.А. НИКИТИН<sup>2,1</sup>,  
А.А. ЛУКЪЯНЧУК<sup>2,1</sup>, О.А. РАЗНИЦЫН<sup>2,1</sup>, А.С. ШУТОВ<sup>2,1</sup>, Н.А. ИСКАНДАРОВ<sup>2,1</sup>, А.Г.  
ЗАЛУЖНЫЙ<sup>1,2</sup>, Ю.Е. ГОРШКОВА<sup>3</sup>, Г.Д. БОГУЧАВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ

Характеризация ка наноструктуры современных дисперсно-упрочненных оксидами сталей требует всестороннего анализа с использованием дополняющих методов. В этой работе методы малоуглового рентгеновского рассеяния, малоуглового рассеяния нейтронов, просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии были применены к нескольким сталям, упрочненным оксидной дисперсией. Сравнение полученных результатов позволяет наиболее корректно охарактеризовать типы включений и их количество в исследованных материалах.

S.V. ROGOZHNIKIN<sup>1,2</sup>, A.V. KLAUZ<sup>1,2</sup>, A.A. KHOMICH<sup>2,1</sup>, A.A. BOGACHEV<sup>2,1</sup>, A.A. NIKITIN<sup>2,1</sup>,  
A.A. LUKYANCHUK<sup>2,1</sup>, O.A. RAZNITSYN<sup>2,1</sup>, A.S. SHUTOV<sup>2,1</sup>, N.A. ISKANDAROV<sup>2,1</sup>,  
A.G. ZALUZHNYI<sup>1,2</sup>, Yu.E. GORSHKOVA<sup>3</sup>, G.D. BOGUCHAVA<sup>3</sup>

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

*Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

*<sup>3</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

## COMPREHENSIVE ANALYSIS OF NANOSTRUCTURE OF OXIDE DISPERSIONSTRENGTHENED STEELS BY ULTRAMICROSCOPY METHODS

The characterization of the nanostructure of modern oxide dispersion strengthened steels requires a comprehensive analysis using complementary techniques. In this work, the methods of small-angle X-ray scattering, small-angle neutron scattering, transmission electron microscopy and atom probe tomography have been applied to several oxide dispersion strengthened steels. Comparison of the obtained results allows the most correct characterization of inclusion types and their number in the studied materials.

В настоящее время идет разработка различных наноструктурированных материалов. Среди них особое место занимают дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) сплавы и стали, имеющие значительно более высокую жаропрочность по сравнению с традиционными материалами за счет значительного числа равномерно распределенных оксидов. Область применения этих материалов достаточно широка: от материалов газотурбинных установок до материалов активной зоны ядерных энергетических установок. В процессе разработки этих материалов идет совершенствование структурно фазового состояния: размера зерен, оптимизация содержащихся включений по размерам, составу и равномерности их распределения по объему материала. Характеризация наноструктуры перспективных ДУО сталей требует комплексного анализа с применения взаимодополняющих методик исследования.

Комбинация атомно-зондовой томографии (АЗТ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) позволяет исследовать структуру материала в широком диапазоне: от наноразмерных кластеров до микроструктуры. При этом оба метода являются локальными и не предоставляют информацию о большем объеме исследуемого материала. Для получения информации о средних характеристиках наноструктуры большого объема материала необходимы другие методы, например малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) или малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН). Целью настоящей работы является комплексный анализ наноструктуры дисперсно-упрочненных оксидами сталей методами просвечивающей электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии, малоуглового рентгеновского рассеяния и малоуглового рассеяния нейтронов. Для оценки величины вкладов наноструктурных элементов использована модель дисперсионного барьерного упрочнения (dispersed barrier hardening - DBH model).

Сравнение результатов ПЭМ, АЗТ, МУРР и МУРН анализа позволяет наиболее корректно определить какие типы включений и в каком количестве содержатся в исследуемых материалах. Показано что в большинстве сталей содержатся оксидные включения и кластеры, обогащенные по О и Y, а также по V, Ti, Al, Zr в зависимости от состава сталей. Исследования методами ПЭМ и АЗТ дают детальную информацию о типе включений, а методы МУРР позволяют наиболее точно определить средние плотности включений по большим объемам материала. Продемонстрирована важность правильного определения типа включения для расчетов упрочнения, проведено сравнение результатов таких расчетов с измерениями микротвердости. Расчётные значения упрочнений в исследованных сталях лежат в пределе 2.7-4.3 ГПа, что хорошо согласуется с измерениями микротвёрдости.

В.В. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, А.П. МЕНУШЕНКОВ<sup>1</sup>, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ<sup>1</sup>, Б.Р. ГАЙНАНОВ<sup>1</sup>, О.В. ЧЕРНЫШЁВА<sup>1</sup>, А.А. ИВАНОВ<sup>1</sup>, С.Г. РУДАКОВ<sup>1</sup>, М.М. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, Н.А. КОЛЫШКИН<sup>2</sup>, Е.В. ХРАМОВ<sup>2</sup>, Я.В. ЗУБАВИЧУС<sup>3</sup>, И.В. ЩЕТИНИН<sup>4</sup>, Н.А. ЦАРЕНКО<sup>5</sup>, Н.В. ОГНЕВСКАЯ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>3</sup>ЦКП «СКИФ», Институт катализа СО РАН им. Г.К. Борескова, Кольцово, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>5</sup>АО ВНИПИПромтехнологии, Москва, Россия

## ЗАВИСИМОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$ ОТ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА

Изучено влияние условий синтеза (вида РЗЭ, температуры отжига) на структуру порошков  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$ . Показано, что при температуре отжига 800°C порошки  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$  ( $0 \leq x \leq 0.75$ ) имеют структуру дефектного флюорита (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ). Увеличение температуры до 1100-1200°C приводит к фазовому переходу «флюорит → пирохлор» при  $0 \leq x \leq 0.5$ . В образце  $(Pr_{0.25}Yb_{0.75})_2Zr_2O_7$  до 1400°C сохраняется структура дефектного флюорита. В  $Yb_2Zr_2O_7$  наблюдается образование  $\delta$ -фазы, имеющей ромбоэдрическую структуру (пр. гр.  $R\bar{3}$ ).

V.V. POPOV<sup>1,2</sup>, A.P. MENUSHENKOV<sup>1</sup>, A.A. YASTREBTSEV<sup>1</sup>, B.R. GAYNANOV<sup>1</sup>, O.V. CHERNYSHEVA<sup>1</sup>, A.A. IVANOV<sup>1</sup>, R.G. RUDAKOV<sup>1</sup>, M.M. BERDNIKOVA<sup>1</sup>, A.A. PISAREV<sup>1</sup>, N.A. KOLYSHKIN<sup>2</sup>, E.V. KHRAMOV<sup>2</sup>, Y.V. ZUBAVICHUS<sup>3</sup>, I.V. SHCHETININ<sup>4</sup>, N.A. TSARENKO<sup>5</sup>, N.V. OGNEVSKAYA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>3</sup>Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Koltsovo, Russia

<sup>4</sup>National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

<sup>5</sup>JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

## DEPENDENCE OF CRYSTAL AND LOCAL STRUCTURE OF COMPLEX OXIDES $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$ ON SYNTHESIS CONDITIONS

The influence of synthesis conditions ( $Ln$  type, calcination temperature) on the structure of  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$  powders has been studied. It has been shown that at 800°C  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$  ( $0 \leq x \leq 0.75$ ) powders have the structure of defect fluorite (sp. gr.  $Fm\bar{3}m$ ). Increasing the temperature up to 1100-1200°C leads to the “fluorite → pyrochlore” phase transition at  $0 \leq x \leq 0.5$ . In the sample  $(Pr_{0.25}Yb_{0.75})_2Zr_2O_7$  up to 1400°C, the structure of defect fluorite is retained. In  $Yb_2Zr_2O_7$ , the formation of a  $\delta$ -phase with a rhombohedral structure (sp. gr.  $R\bar{3}$ ) is observed.

На протяжении последних нескольких десятилетий сложные оксиды РЗЭ  $Ln_2M_2O_7$  ( $Ln$  - РЗЭ;  $M$  - переходные  $d$ -элементы) привлекают постоянное внимание исследователей, поскольку обладают богатым полиморфизмом и являются перспективными материалами для создания новых теплозащитных покрытий, нейтронопоглощающих материалов, катализаторов и сорбентов, твердых электролитов, конструкционной керамики и т.д.

Целью данной работы было изучение влияния условий синтеза на параметры кристаллической и локальной структуры цирконатов РЗЭ с общей формулой  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) с использованием уникальной комбинации методов: рентгеновской дифракции (XRD), рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES и EXAFS), а также ИК- и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС), синхронного термического анализа (ДСК + ТГ), атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП).

Порошки  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$  были получены термообработкой прекурсоров, синтезированных методом соосаждения водных растворов нитратов  $Pr(NO_3)_3$  и  $Yb(NO_3)_3$  с  $ZrOCl_2$ . Все синтезированные прекурсоры были рентгеноаморфны и являлись гидратированными основными карбонатами с примерной формулой  $(Ln/Zr)(OH)_5(CO_3) \cdot nH_2O$  ( $1.5 < n < 2.5$ ). Их термообработка в интервале температур 800-1400°C приводила к протеканию процессов дегидратации, кристаллизации и полиморфных превращений. Показано, что одним из основных факторов (наряду с температурой), определяющих тип образующейся кристаллической структуры в  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$ , является отношение радиусов катионов  $\gamma = r_{Ln^{3+}}/r_{Zr^{4+}}$ . Установлено, что термообработка при 800°C приводит к кристаллизации прекурсоров с образованием  $(Pr_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$  ( $0 \leq x \leq 0.75$ ), имеющих структуру дефектного флюорита (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ) (при сохранении некоторого количества карбонат-ионов). Увеличение температуры до 1100-1200°C приводит к полному удалению карбонатов и фазовому переходу «флюорит → пирохлор» при  $0 \leq x \leq 0.5$ . В образце  $(Pr_{0.25}Yb_{0.75})_2Zr_2O_7$  до 1400°C сохраняется структура дефектного флюорита. В случае  $Yb_2Zr_2O_7$  отжиг при 800°C приводит к формированию сложного оксида с локальной структурой, отличной от кубического флюорита. Дальнейшее повышение температуры вызывает образование  $\delta$ -фазы, имеющей ромбоэдрическую структуру (пр. гр.  $R\bar{3}$ ).

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352).

В.В. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, А.П. МЕНУШЕНКОВ<sup>1</sup>, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ<sup>1</sup>, А.А. ИВАНОВ<sup>1</sup>, С.Г. РУДАКОВ<sup>1</sup>,  
М.М. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, Е.С. КУЛИКОВА<sup>2</sup>, И.В. ЩЕТИНИН<sup>3</sup>, М.К.  
ТАТМЫШЕВСКИЙ<sup>4</sup>, С.М. НОВИКОВ<sup>4</sup>, В.С. ВОЛКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ОКСИДОВ $Ln_2M_2O_7$ ( $Ln = La-Yb, Y; M = Ti, Zr, Ce$ )

Изучено влияние условий синтеза (вида катионов  $Ln^{3+}$  и  $M^{4+}$ , температуры отжига) на кристаллическую и локальную структуру высокоэнтропийных оксидов  $Ln_2M_2O_7$  ( $Ln = La-Yb, Y; M = Ti, Zr, Ce$ ). Сделан вывод, что одним из основных факторов (наряду с температурой), определяющих тип образующейся кристаллической структуры и закономерности протекания фазовых превращений в высокоэнтропийных сложных оксидах РЗЭ, является отношение радиусов катионов  $\gamma = r_{Ln^{3+}}/r_{M^{4+}}$ .

V.V. POPOV<sup>1,2</sup>, A.P. MENUSHENKOV<sup>1</sup>, A.A. YASTREBTSEV<sup>1</sup>, A.A. IVANOV<sup>1</sup>, R.G. RUDAKOV<sup>1</sup>,  
M.M. BERDNIKOVA<sup>1</sup>, A.A. PISAREV<sup>1</sup>, E.S. KULIKOVA<sup>2</sup>, I.V. SHCHETININ<sup>3</sup>,  
M.K. TATMYSHEVSKIY<sup>4</sup>, S.M. NOVIKOV<sup>4</sup>, V.S. VOLKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>3</sup>National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

## THE EFFECT OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE CRYSTAL AND LOCAL STRUCTURE OF HIGH-ENTROPY OXIDES $Ln_2M_2O_7$ ( $Ln = La-Yb, Y; M = Ti, Zr, Ce$ )

The effect of synthesis conditions (type of  $Ln^{3+}$  and  $M^{4+}$  cations, calcination temperature) on the crystal and local structure of high-entropy oxides  $Ln_2M_2O_7$  ( $Ln = La-Yb, Y; M = Ti, Zr, Ce$ ) has been studied. It is concluded that one of the main factors (along with temperature) that determines the type of crystal structure formed and the features of phase transformations in high-entropy complex rare-earth oxides is the ratio of the cation radii  $\gamma = r_{Ln^{3+}}/r_{M^{4+}}$ .

В последнее несколько лет большое внимание исследователей приковано к синтезу и изучению физико-химических свойств (включая различные эксплуатационные характеристики) высокоэнтропийных (ВЭ) материалов различного химического и фазового состава, являющихся перспективными материалами для создания новых теплозащитных покрытий, катализаторов, электродов, пьезоэлектриков и т.д.

Целью данной работы была разработка методов синтеза ВЭ сложных оксидов редкоземельных (РЗЭ) и переходных  $d$ -элементов с общей формулой  $Ln_2M_2O_7$  ( $Ln = La-Yb, Y; M = Ti, Zr, Ce$ ), содержащих пять и более видов РЗЭ, а также исследование их кристаллической и локальной структуры с помощью комбинации дифракционных и спектроскопических методов диагностики, дополненных сканирующей электронной микроскопией и синхронным термическим анализом.

Порошки  $Ln_2M_2O_7$  были получены термообработкой прекурсоров  $Ln-M(IV)$ , синтезированных методом соосаждения водных растворов нитратов РЗЭ  $Ln(NO_3)_3$  с  $ZrOCl_2$ ,  $Ti(OC_4H_9)_4$  или  $(NH_4)_2Ce(NO_3)_6$ . Все синтезированные ВЭ прекурсоры  $Ln-M(IV)$  были рентгеноаморфны. Их термообработка в интервале температур 800-1500°C приводила к протеканию процессов дегидратации, кристаллизации и полиморфных превращений. Показано, что одним из основных факторов (наряду с температурой), определяющих тип образующейся кристаллической структуры и закономерности протекания фазовых превращений в ВЭ сложных оксидах РЗЭ, является отношение радиусов катионов  $\gamma = r_{Ln^{3+}}/r_{M^{4+}}$ . Установлено, что термообработка при 800°C приводит к кристаллизации прекурсоров с образованием ВЭ цирконатов и цератов легких РЗЭ, имеющих структуру флюорита (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ). Дальнейшее повышение температуры в случае  $(La-Gd)_2Zr_2O_7$  ( $\gamma=1.53$ ) и  $(La-Gd)_2(Zr_{0.67}Ce_{0.33})_2O_7$  ( $\gamma=1.43$ ) приводит к появлению пироклорной структуры (пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ ). В случае церата  $(La-Gd)_2Ce_2O_7$  ( $\gamma=1.26$ ) наряду с основной фазой флюорита наблюдается появление дополнительной примесной фазы в виде нанодоменов кубической  $C$ -фазы (пр. гр.  $Ia\bar{3}$ ). Кристаллизация прекурсора титаната тяжелых РЗЭ приводит к образованию смеси соединений, одним из компонентов которой является ВЭ  $(Dy-Yb,Y)_2Ti_2O_7$  ( $\gamma=1.67$ ) со структурой пироклора. Дальнейшее повышение температуры до 1400°C приводит к образованию практически однофазного пироклора. Цирконат  $(Dy-Yb,Y)_2Zr_2O_7$  ( $\gamma=1.40$ ) имеет структуру флюорита во всем исследованном диапазоне температур. В случае кристаллизации пограничного  $(Dy-Yb,Y)_2(Zr_{0.7}Ti_{0.3})_2O_7$  ( $\gamma=1.47$ ) наблюдается образование соединений как со структурой пироклора, так и флюорита.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352).



В.В. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, А.П. МЕНУШЕНКОВ<sup>1</sup>, Ф.Э. ДУБЯГО<sup>1</sup>, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ<sup>1</sup>, Б.Р. ГАЙНАНОВ<sup>1</sup>, А.А. ИВАНОВ<sup>1</sup>, С.Г. РУДАКОВ<sup>1</sup>, М.М. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, Е.С. КУЛИКОВА<sup>2</sup>, Н.А. КОЛЫШКИН<sup>2</sup>, Е.В. ХРАМОВ<sup>2</sup>, Я.В. ЗУБАВИЧУС<sup>3</sup>, И.В. ЩЕТИНИН<sup>4</sup>, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ<sup>5</sup>, С.М. НОВИКОВ<sup>5</sup>, В.С. ВОЛКОВ<sup>5</sup>, Н.А. ЦАРЕНКО<sup>6</sup>, Н.В. ОГНЕВСКАЯ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>3</sup>ЦКП «СКИФ», Институт катализа СО РАН им. Г.К. Борескова, Кольцово, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>5</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>6</sup>АО ВНИИПромтехнологии, Москва, Россия

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ, ЛОКАЛЬНОЙ и электронной СТРУКТУРЫ ХРОМИТОВ $LnCrO_3$

Однофазные порошки индивидуальных и высокоэнтропийных хромитов  $P3Э LnCrO_3$  ( $Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$ ) были получены термообработкой прекурсоров  $Ln-Cr(III)$ , синтезированных методом соосаждения. Установлена взаимосвязь параметров кристаллической, локальной и электронной структуры полученных образцов с условиями синтеза.

V.V. POPOV<sup>1,2</sup>, A.P. MENUSHENKOV<sup>1</sup>, F.E. DUBYAGO<sup>1</sup>, A.A. YASTREBTSEV<sup>1</sup>, B.R. GAYNANOV<sup>1</sup>, A.A. IVANOV<sup>1</sup>, R.G. RUDAKOV<sup>1</sup>, M.M. BERDNIKOVA<sup>1</sup>, A.A. PISAREV<sup>1</sup>, E.S. KULIKOVA<sup>2</sup>, N.A. KOLYSHKIN<sup>2</sup>, E.V. KHRAMOV<sup>2</sup>, Y.V. ZUBAVICHUS<sup>3</sup>, I.V. SHCHETININ<sup>4</sup>, M.K. TATMYSHEVSKIY<sup>5</sup>,

S.M. NOVIKOV<sup>5</sup>, V.S. VOLKOV<sup>5</sup>, N.A. TSARENKO<sup>6</sup>, N.V. OGNEVSKAYA<sup>6</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>3</sup>Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Koltsovo, Russia

<sup>4</sup>National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

<sup>6</sup>JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

## SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF THE CRYSTAL, LOCAL AND ELECTRONIC STRUCTURE OF $LnCrO_3$ CHROMITES

Single-phase individual and high-entropy rare-earth element chromites  $LnCrO_3$  ( $Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$ ) were prepared by heat treatment of  $Ln-Cr(III)$  precursors synthesized by the coprecipitation method. The relationship between the parameters of the crystal, local and electronic structure of the obtained samples and the synthesis conditions has been established.

Хромиты редкоземельных элементов (РЗЭ) являются частью большого семейства перовскитов  $ABO_3$  (где А - РЗЭ, а В – переходный  $d$ -элемент), которые обладают интересными структурными и магнитными свойствами. Эти соединения, благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам (в основном из-за большого количества наблюдаемых основных состояний и свойств, таких как мультиферроичность, колоссальное магнитосопротивление и др.), являются перспективными для использования их в различных технологических приложениях.

Цель данной работы – изучение влияния условий синтеза на параметры кристаллической, локальной и электронной структуры индивидуальных и высокоэнтропийных (ИиВЭ) хромитов  $P3Э LnCrO_3$  с использованием уникальной комбинации локально-чувствительных методов рентгеновской дифракции ( $s$ -XRD) и рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES и EXAFS), а также ИК- и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС), синхронного термического анализа (ДСК + ТГ).

Порошки  $LnCrO_3$  были получены термообработкой прекурсоров  $Ln-Cr(III)$ , синтезированных методом соосаждения водных растворов нитратов  $P3Э Ln(NO_3)_3$  и  $Cr(NO_3)_3$ . Все синтезированные ИиВЭ прекурсоры  $Ln-Cr(III)$  ( $Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$ ) имели атомное отношение  $Ln : Cr \approx 1 : 1$ , были рентгеноаморфны и являлись гидратированными основными карбонатами с примерной формулой  $(Ln/Cr)(OH)_{6-x}(CO_3)_x \cdot nH_2O$ . Дальнейшая их термообработка при  $850^\circ C$  приводила к образованию однофазных порошков ИиВЭ хромитов  $P3Э LnCrO_3$ , имеющих орторомбическую структуру (пр. гр.  $Pbnm(62)$ ). Анализ полученных результатов рентгеновской дифракции (параметров ячейки, длин связей, валентных углов), а также данных колебательной спектроскопии (изменения формы ИК- и КР-спектров, положения мод/полос поглощения) позволил сделать вывод об увеличении степени искажения орторомбической кристаллической структуры хромитов с уменьшением катионного радиуса РЗЭ (при переходе от La к Yb) внутри гомологического ряда  $LnCrO_3$ . Анализ XANES-спектров на  $K-Cr$  и  $L_3-Ln$  крае показал наличие во всех синтезированных образцах степени окисления (+3) как катионов хрома, так и катионов РЗЭ.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352).

Д.Д. МИЩЕНКО<sup>1,2</sup>, М.В. АРАПОВА<sup>3</sup>, А.Н. ШМАКОВ<sup>1,2</sup>

1 – ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН, Кольцово, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

## СТРУКТУРА И ФАЗОВАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЛАНТАН-ЗАМЕЩЕННОГО НИКЕЛАТА ПРАЗЕОДИМА, СИНТЕЗИРОВАННОГО С МОДИФИКАЦИЯМИ СИНТЕЗА ПЕКИНИ

Несколько образцов состава  $\text{Pr}_{1.4}\text{La}_{0.6}\text{NiO}_{4+\delta}$  были синтезированы модифицированным методом Пекини. Методики синтеза различались стартовыми реагентами, схемами высокотемпературного отжига прекурсоров (количество, температуры, газовые среды). Процесс синтеза во время финального высокотемпературного отжига, а также фазовая однородность и структура синтезированных образцов были охарактеризованы *in situ* рентгеновской дифракцией с использованием синхротронного излучения.

D.D. MISHCHENKO<sup>1,2</sup>, M.V. ARAPOVA<sup>3</sup>, A.N. SHMAKOV<sup>1,2</sup>

1 – SRF SKIF BIC SB RAS, Koltsovo, Russia

2 – Novosibirsk state university, Novosibirsk, Russia

3 – BIC SB RAS, Novosibirsk, Russia

## STRUCTURE AND PHASE INHOMOGENEITY OF LANTHANUM-SUBSTITUTED PRASEODYMIUM NICKELATE SYNTHESISED VIA MODIFIED PECHINI TECHNIQUES

Several  $\text{Pr}_{1.4}\text{La}_{0.6}\text{NiO}_{4+\delta}$  samples were synthesised via a modified Pechini method. The synthesis procedures for each sample differed in starting reagents states and types of calcinations (number, temperature and gaseous atmosphere). The final high-temperature calcination, as well as phase homogeneity and structure of synthesised samples, were studied by synchrotron *in situ* XRD.

Никелат празеодима является перспективным материалом для катодов среднетемпературных твердооксидных топливных элементов (СТ-ТОТЭ). Данный материал показывает низкое поляризационное сопротивление в тестовых ячейках. Однако он термически нестабилен в рабочих условиях катода СТ-ТОТЭ (500-700 °С, воздушная и кислород-дефицитные атмосферы). Никелат лантана в свою очередь показывает худшие электрохимические характеристики в тестовых ячейках, однако он термически стабилен в рабочих условиях СТ-ТОТЭ [1]. Поэтому перспективным подходом может быть допирование никелата празеодима лантаном для улучшения термической стабильности с сохранением электрохимических характеристик.

На предыдущем этапе исследования (изучались составы  $\text{Pr}_{2-x}\text{La}_x\text{NiO}_{4+\delta}$  ( $x = 0, 0.5, 1$ )) было показано (данные в процессе публикации), что наилучший компромисс между стабильностью и электрохимическими характеристиками может показывать состав  $\text{Pr}_{1.4}\text{La}_{0.6}\text{NiO}_{4+\delta}$ . Однако все образцы, синтезированные модифицированным методом Пекини из нитратов соответствующих металлов с финальным отжигом при 1200 °С 10 часов на воздухе, оказались состоящими из как минимум двух фаз с одинаковой структурой целевого оксида, но с немного различающимися параметрами элементарной ячейки и температурами фазового перехода  $Fmmm - I4/mmm$ , а также содержащими 2-3 вес. % примеси NiO.

В данной работе мы предприняли попытки уменьшить фазовую неоднородность образцов, изменяя количество, температуру и газовую атмосферу высокотемпературных прокалок, а также состояние стартовых реагентов. Фазовая однородность, структура, а также процесс высокотемпературного синтеза изучался *in situ* рентгеновской дифракцией с использованием синхротронного излучения на станции «Прецизионная дифрактометрия – 2» в СЦСТИ ИЯФ СО РАН [2]. Эксперименты проводились в различных газовых средах при температурах до 900 °С при использовании высокотемпературной камеры-реактора XRK-900. Контроль состава газовой смеси осуществлялся с помощью квадрупольного масс-спектрометра UGA-100 (SRS, США).

Работа выполнена при поддержке Программы Приоритет-2030.

### Список литературы

1. Tarutin A.P., Lyagaeva J.G., Medvedev D.A. and others // Journal of Materials Chemistry A, 2021, Vol. 9, No. 1, P. 154-195.
2. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. and others // Physics Procedia, 2016, Vol. 84, P. 19-26.

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ РЫХЛОСТИ И РАЗРЫВНОСТИ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ СПИРАЛЕВИДНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ ПО МАЛОУГЛОВЫМ ДАННЫМ МОДИФИЦИРОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ «ИМИТАЦИИ ОТЖИГА»

Изучено восстановление по данным малоуглового рассеяния трёхмерной формы наночастицы в форме спирали при варьировании допустимой степени рыхлости и разрывности частицы. Восстановление формы проводилось с помощью алгоритма «имитации отжига», реализованного на базе программы поиска шариковых моделей частиц. Проведена оценка качества реконструкции с помощью параметра среднеквадратичного расстояния относительно эталонной.

V.A. GRIGOREV, P.V. KONAREV, V.V. VOLKOV  
FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

## INFLUENCE OF THE DEGREE OF LOOSENESS AND DISCONTINUITY ON THE SHAPE DETERMINATION OF THE SPIRAL NANOPARTICLE FROM SMALL-ANGLE SCATTERING DATA BY THE MODIFIED "SIMULATED ANNEALING" ALGORITHM

The reconstruction of the three-dimensional shape of a spiral nanoparticle from small-angle scattering data was studied by varying the permissible degree of looseness and discontinuity of the particle. The shape reconstruction was carried out using the "simulated annealing" algorithm realized in the program of searching of bead models. The quality of the reconstruction was evaluated using the RMS distance parameter relative to the reference one.

Алгоритм «имитации отжига» [1] представляет собой статистический метод поиска глобального минимума функций. Этот метод применен для поиска трёхмерной формы наночастицы в виде шариковых моделей по данным малоуглового рассеяния (МУР) при одновременном требовании физичности модели, в частности, неразрывности (связности) частицы и низкой рыхлости модели. Этот алгоритм реализован в программе DAMMIN [2]. Структура частицы представляет собой совокупность нескольких тысяч шариков малого размера, находящихся в узлах гексагональной упаковки. Вообще говоря, трёхмерная форма подобным образом не может быть определена однозначно по одномерным данным МУРП. В ряде случаев удастся достичь минимального набора возможных форм наночастицы, поскольку все решения должны иметь одинаковые размеры, объемы и радиусы инерции. В работе [3] сделана попытка автоматизации поиска возможных структур, однако влияние параметров алгоритма поиска на результат реконструкции еще мало изучено.

В настоящей работе выполнена серия реконструкций для спирали из трёх витков с параметрами: шаг 55 Å, внешний диаметр 100 Å, толщина витка 30 Å (рис. 1). Соотношение толщины и шага спирали такие, что спираль не восстанавливается обычным методом, реализованном в DAMMIN. Данная работа является продолжением работы [4], в которой уже были изучены некоторые параметры алгоритма (SMX - количество шенноновских каналов, WIS - параметр весовой функции, применяемой для сжатия динамического диапазона данных). Рассмотрено влияние веса штрафа за разрывность (WDS) и рыхлость (WLO) модели. На данный момент эмпирически оптимальные значения этих параметров равны 0.02 и 0.09 соответственно.

Качество реконструкции оценивали с помощью параметра схожести (NSD) реконструированных моделей с эталонной, изображённой на рис. 1 слева. При равных радиусах шариков в обеих моделях для идентичных частиц  $NSD = 0$ , для однозначно неидентичных  $NSD \geq 1$ . В нашем случае частицы идентичны при  $NSD \approx 0.45$ .

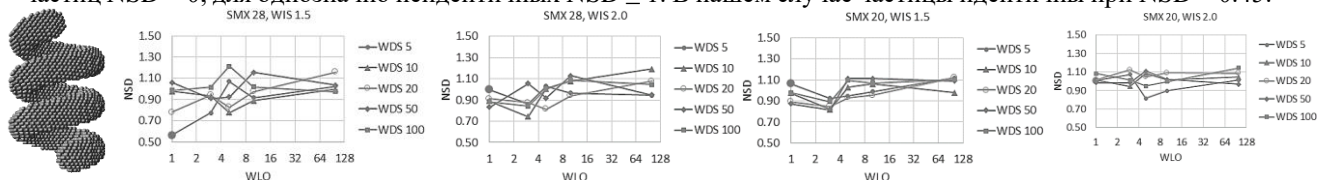


Рис. 1. Частица (слева) и значения NSD в зависимости от относительных величин WLO, WDS, а также SMX и WIS.

На графиках для WLO и WDS указано уменьшение значений относительно эмпирических (например, WLO 8 означает, что WLO было уменьшено в 8 раз). Из рисунка видно, что наиболее низкие значения NSD преобладают при меньших значениях рыхлости и разрывности (до 10), а при высоких значениях NSD приближается к единице. Это позволяет заключить, что при поиске формы данной спирали нет необходимости уменьшать вес штрафов за разрывность и рыхлость более, чем в 10 раз.

### Список литературы

1. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. // Science. 1983. V. 220. P. 671.
2. Svergun D. I. // Biophys J. 1999. P. 2879.
3. Волков В.В. // Кристаллография. 2021. Т. 66, № 5. С. 793.
3. Григорьев В.А., Конарев П.В., Волков В.В. // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36, № 7. С. 53.

Й. ШМАЙСНЕР<sup>a,b</sup>, А.Н. ТЮЛЮСОВ<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>b</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## РАСЧЕТ КРИВОЙ КАЧАНИЯ ДВУХКРИСТАЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИХ КРИСТАЛЛАХ InSb В ГЕОМЕТРИИ ЛАУЭ-ЛАУЭ

Построено выражение для кривой качания с учетом зависимости сечения поглощения от энергии падающих нейтронов и рассчитана модельная инструментальная линия (кривая качания) для спектрометрической схемы Лауэ-Лауэ на примере кристалла InSb в областях преимущественно потенциального и резонансного поглощения.

J. SCHMEISSNER<sup>a,b</sup>, A.N. TYULYUSOV<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>b</sup>National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

## MODELING OF THE ROCKING CURVE OF A DOUBLE-CRYSTAL NEUTRON SPECTROMETER FROM A HIGHLY ABSORBING InSb CRYSTALS IN THE LAUE-LAUE GEOMETRY

An expression for the rocking curve is constructed taking into account the dependency of the absorption cross section on the energy of the incident neutrons and a model instrumental line (rocking curve) for the Laue-Laue spectrometric scheme of an InSb crystal is calculated in the regions of predominantly potential and resonant absorption.

В экспериментах по дифракции нейтронов на схеме двухкристального спектрометра важное значение имеет снятие инструментальной кривой (кривой качания спектрометра без образца), содержащей информацию о начальной и конечной расходимости пучка и его спектральной ширины.

Аналитическое выражение, приведенное в монографии Комптона-Алиссона [1], для инструментальной линии при отражении нейтронных волн от пары совершенных кристаллов имеет приближение, связанное с симметричной линейной зависимостью отражательной способности кристалла от энергии и угловой расходимости падающих нейтронов. Но ситуация разительно меняется при приближении энергии нейтронов к резонансному урону ядра. Так для ядра In изменение длины волны от 1 до 2 ангстрем приводит к изменению сечения поглощения примерно в 2 раза, а от 0.25 до 0.3 ангстрем — в 90 раз (рис. 1). Для сравнения, обратные длины поглощения  $\mu$  для InSb и Ge будут:  $\mu_{InSb} = 1.95 \text{ см}^{-1}$ ;  $\mu_{Ge} = 0.06 \text{ см}^{-1}$ . Отсюда следует, что в таких условиях ранее применяемый подход становится неприменимым.

С помощью решения системы волновых уравнений из теории динамической дифракции нейтронов [2] было получено аналитическое выражение, не требующее ограничений на характер зависимости сечения поглощения нейтронов от их длины волны.

В работе представлены расчетные инструментальные линии для спектрометрической схемы двухкристального дифрактометра из кристаллов InSb в геометрии Лауэ-Лауэ для диапазонов длин волн нейтронов, соответствующих слабому потенциальному и сильному резонансному поглощению. Приведено сравнение вида и формы кривых, рассчитанных по расширенному выражению с учетом сечения поглощения и рассчитанных по классическому выражению Комптона-Алиссона.

Приведенная методика моделирования инструментальной линии поможет при планировании экспериментов на двухкристальных спектрометрах, когда материал кристаллов спектрографической схемы будет содержать ядра с резонансным уровнем вблизи используемой энергии нейтронов.

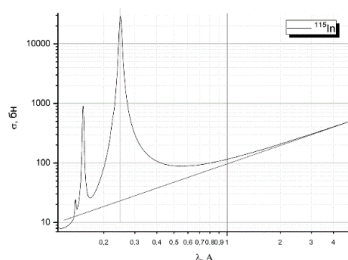


Рис. 1. Зависимость сечения поглощения от длины волны нейтронов для ядер  $^{115}\text{In}$ . Характерны три пика резонансного поглощения.

### Список литературы

1. Compton A., Allison S. / X-rays in theory and experiment. New York, D. Van Nostrand Company. Inc. 1935.
2. Абов Ю.Г., Елютин Н.О., Тюлюсов А.Н. / ЯФ. 2002. В. 65. С. 1989