

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ВМКТ – 2025



ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



ВСЕРОССИЙСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ,
ПЛАЗМЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ И
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ МЕДИЦИНЕ

г. Москва, г. Троицк
2025

**Всероссийская молодежная конференция по управляемому
термоядерному синтезу, плазменным технологиям
и высокотехнологичной медицине**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**г. Москва, г. Троицк
2025**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель программного комитета:

Голубев Александр Александрович – д.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Заместитель председателя программного комитета:

Романиков Александр Николаевич – д.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Ильгисонис Виктор Игоревич – д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, ГК «Росатом»

Зеленый Лев Матвеевич – д.ф.-м.н., академик РАН, ИКИ РАН

Петров Олег Федорович – д.ф.-м.н., академик РАН, ОИВТ РАН

Гаранин Сергей Григорьевич – д.ф.-м.н., академик РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ

Смирнов Валентин Пантелеймонович – д.ф.-м.н., академик РАН,

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Ковалишин Алексей Анатольевич – д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН,

НИЦ «Курчатовский институт»

Красильников Анатолий Витальевич – д.ф.-м.н., «Проектный центр ИТЭР»

Гаспарян Юрий Микаэлович – д.ф.-м.н., НИЯУ МИФИ

Будаев Вячеслав Петрович – д.ф.-м.н., НИУ «МЭИ»

Кузнецов Андрей Петрович – д.ф.-м.н., НИЯУ «МИФИ»

Канцырев Алексей Викторович – к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский Институт»

Пискарев Павел Юрьевич – начальник отделения НИИЭФА

Воронов Алексей Сергеевич – PhD, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Ежов Александр Александрович – к.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Климов Николай Сергеевич – к.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Высоцкий Дмитрий Владимирович – к.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Ловчикова Ирина Борисовна – АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель организационного комитета:

Карташева Александра Александровна – к.ф.-м.н., начальник лаборатории

Васина Яна Андреевна – к.ф.-м.н., научный сотрудник, секретарь конференции

Зверева Любовь Ивановна – руководитель направления

Донец Александра Евгеньевна – младший научный сотрудник

Рогожин Василий Ильич – младший научный сотрудник

Чернов Дмитрий Олегович – младший научный сотрудник

Панюшкин Всеволод Александрович – руководитель направления

Кравец Елена Григорьевна – главный специалист

Дмитриев Игорь Викторович – художник-конструктор

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ 14

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛИТИИЗАЦИИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА 15

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ FE
В РАЗРЯДАХ ТОКАМАКА ИЗ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА
ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ВИДИМОЙ И МЯГКОЙ
РЕНТГЕНОВСКОЙ ОБЛАСТИ 17

ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПОТЕНЦИАЛА И
ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ
ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ
T-15МД..... 19

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ
БЕЗНЕЙТРОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА 21

ИНЖЕКЦИЯ ПЛАЗМЫ ИЗ КОАКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО
УСКОРИТЕЛЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЛОВУШКУ ВДОЛЬ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ..... 23

АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЭНЕРГИИ
УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
НА ТОКАМАКЕ T-15МД..... 25

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ
ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0..... 27

КРОСС-ВЕРИФИКАЦИЯ КОДОВ MSU-FR И ODETTA-F
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОЙ
ЗАЩИТЫ УСТАНОВОК УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО
СИНТЕЗА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ИЗ БАЗЫ ДАННЫХ
SINBAD 29

КИНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА БЫСТРОГО ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В КОДЕ SOLPS-ITER ДЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА.....	31
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И КАНАЛОВ ДИАГНОСТИКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ТИН-1	33
СТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ В4С К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК	35
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ СЕГРЕГАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ	37
МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПР-8 ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ.....	39
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ УДАРОВ, ОЖИДАЕМЫХ В ХОДЕ ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ, НА ПОВЕРХНОСТЬ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ТИТАНА	41
СВОЙСТВА АЛЬФВЕНОВСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М.....	43
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЛИТИЯ В ЛИМИТЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА.....	45
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЮСТИРОВКИ КРИОМАГНИТОВ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД И КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИРОТРОННОГО ЗАЛА НА ВЫХОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА КОЛЛЕКТОРЕ ГИРОТРОНА	47
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА УСТАНОВКИ Т-15МД ПРИ РАБОТЕ НА ДЕЙТЕРИЕВОМ ТОПЛИВЕ	49

СИСТЕМА СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР	51
---	----

ПЛАЗМЕННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ54

РАЗРАБОТКА ЗОНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ ЭРД.....	55
ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ.....	57
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСА И РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КСПУ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА	59
ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КСПУ	61
ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ И ЭТИЛЕНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ	63
ИЗМЕРЕНИЕ ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ИОНОВ ПРИ ВЧ- НАГРЕВЕ В ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ ПЛМ-М	65
ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ.....	67
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ НАПЫЛЕНИЯ ТОНИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ.....	69
МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАКЛЕПА	71

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ INGAAS-ФОТОДИОДОВ	73
УДЕРЖАНИЕ МИКРОЧАСТИЦ ЛИНЕЙНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКОЙ С ПОТЕНЦИАЛОМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ ..	75
САМОСОГЛАСОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В НАПРАВЛЕННОМ ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ: ОТ МИКРОУРОВНЯ К КОЛЛЕКТИВНЫМ ЭФФЕКТАМ.....	77
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА В КСЕНОНЕ И В ИОДЕ	79
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СОЧЛЕНЕНИЯ СТЕКЛА И МЕТАЛЛА В ПЛАЗМЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА	81
ГЕЛИОН: ДОБЫЧА ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ НА ЛУНЕ	83
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ.....	85
ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАВЛЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ	87
ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ.....	89
ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА	91
ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ВОЛН В КОАКСИАЛЬНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ, ВОЗБУЖДАЕМОМ СИНУСОИДАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ	93
ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ПЛАЗМЕННОМ РЕЗОНАНСЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	95

ПЛАЗМЕННАЯ АКТИВАЦИЯ ДЕИОНИЗИРОВАННОЙ ВОДЫ АТМОСФЕРНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМОЙ СВЧ ФАКЕЛА: УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ	97
СВЧ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ФОРВАКУУМНОЙ ПЛАЗМЕ ..	99
АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ КАПЛЯМИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ПЛАЗМОЙ УСТАНОВКИ ПЛМ	101
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	103
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СЕЧЕНИЯ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ УВ:YAG КЕРАМИКИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ФЮХТБАУЭРА-ЛАДЕНБУРГА	105
ЛАЗЕРНОЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ CVD- АЛМАЗА: СТРУКТУРЫ И МОДЕЛИ	107
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КАРДИЭЛЕКТРОДА С ПОКРЫТИЕМ, НАНЕСЕННЫМ ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ, ОТ РЕЖИМА НАПЫЛЕНИЯ	109
ВЛИЯНИЕ СМЕСИ ГАЗОВ И ФОРМЫ СОПЛА НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОВОЛНОВОГО ФАКЕЛА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	111
«ПАМЯТЬ» ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР В КОАКСИАЛЬНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ, ВОЗБУЖДАЕМОМ ЦУГАМИ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	113
КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 40ХН2МА И ШХ15 В КАМЕРЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ.....	115
ИЗМЕНЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СПЛАВОВ ВТ6 И ЖС6У-ВИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ МОЩНОГО ИМПУЛЬСА	

ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ.....	117
ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ШИРОКОАПЕРТУРНОМ РАМАНОВСКОМ КРИСТАЛЛЕ BaWO ₄	119
МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО КОНВЕРТЕРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ	121
РАСЧЕТ ДИАПАЗОНОВ ТЕМПЕРАТУР РАЗДЕЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СОСТАВА ОЯТ ПРИ ИОННО- ТЕРМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ	123
ВЛИЯНИЕ АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ	125
ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ХРОНОГРАММ УДАРОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МИШЕНЯХ	127

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 130

О ПРИМЕНИМОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ ПЛАЗМЫ	131
РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	133
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ИМИТИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДЯЩУЮ ЖИДКОСТЬ	135

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МГД-СИСТЕМЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ БЫСТРО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	137
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ ДИАГНОСТИКИ	139
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ СТЕНДА ПЕРСТ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ СРЕДСТВ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ	141
МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАММА КАМЕРЫ ДЛЯ ОФЭКТНА ОСНОВЕ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ...	143
ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА СЧИТЫВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО ГАММА-ЗОНДА	145
ВОЗМОЖНЫЕ ЦИКЛЫ КВАЗИЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ	147
ВИРТУАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ В ВАРЬИРУЕМОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ДО 100 ТЭВ	149
МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕКОВ МЮОНОВ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЮОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ	151
УЧЕТ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ	153
КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОТОКА ИОНОВ ПЛАЗМЫ	155
РАСЧЕТ ЭКРАНИРОВКИ РАССЕЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТОКАМАКА Т-15МД В ИНЖЕКТОРЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОТКЛОНЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ИОНОВ	157

РАЗРАБОТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННОГО ВЧ ИСТОЧНИКА	159
ВРЕМЕННАЯ КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА	161
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ГАЗОВОГО СОСТАВА ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПО ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ.....	163

АСТРОФИЗИКА И ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ 166

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ, ФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОЛЬГИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТКИМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ.....	167
РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С $1\text{E}22\text{ Вт/см}^2$	169
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100 ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОЩНОСТИ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	171
КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	173
САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ СВЕРХТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С МАГНИТНЫМ ШИРОМ.....	175
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАНАДИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ.....	177
ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВОЙ ДИНАМИКИ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛ.....	179

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНАЯ МЕДИЦИНА..... 182

ПЛАЗМА + БИОМЕДИЦИНА = НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ
ДЛЯ ПЛАЗМЫ И БИОМЕДИЦИНЫ.....183

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ГАЗОВОЙ ПЛАЗМЫ В РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ.....185

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA И ЕГО
ПРИМЕНЕНИЯ.....187

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОСОВМЕСТИМОСТИ И
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОПОРИСТЫХ
ТИТАНОВЫХ СТРУКТУР, СОЗДАННЫХ МЕТОДОМ
ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ. В
ИМПЛАНТАХ И РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ189

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПЕДАНСНОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКЛИКА
КАРДИОЭЛЕКТРОДА НА ИМПУЛЬС СТИМУЛЯЦИИ.....191

ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА
НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ВОДЕ,
ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ АДЬЮВАНТА193

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЙОДИДА ЦЕЗИЯ
ГАРНИСАЖНЫМ МЕТОДОМ.....195

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОКЕРАМИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ
КРАНИОПЛАСТИКИ И ДРУГИХ НЕНАГРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ
КОСТНОЙ ТКАНИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УСИЛЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ197

ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНЕННОЙ/СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В
РАБОТЕ С ИНОРОДНЫМИ ТЕЛАМИ.....199

МЕТОДИКИ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ И
АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ
ИСТОЧНИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ
ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРА.....201

ДИСТОРСИОМЕТРИЯ – НОВЫЙ СПОСОБ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ	203
ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ.....	205
ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАКОВЫЕ КЛЕТОЧНЫЕ КУЛЬТУРЫ НАНОСЕКУНДНЫМ ИСКРОВЫМ РАЗРЯДОМ В ПРОТОКЕ АРГОНА.....	207
ОБРАЗОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И АЗОТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНЫМ СВЧ-РАЗРЯДОМ НА ЖИДКОСТИ	209
МЕХАНИЗМЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В БИОСЕНСОРЕ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	211
УПРАВЛЕНИЕ ТИПОМ И КОНЦЕНТРАЦИЕЙ СПИНОВЫХ ЦЕНТРОВ В НАНОРАЗМЕРНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ.....	213
ИММУНОТРОПНОЕ ДЕЙСТВИЕ РАСТВОРА ХЕНКСА, ОБРАБОТАННОГО ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ, ДЛЯ ЖЕНЩИН ДВУХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП	215
ЦИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАСТВОРА, ОБРАБОТАННОГО ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ, НА КЛЕТКИ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ	217

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛИТИИЗАЦИИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА

Васина Я.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, vasina@triniti.ru

Проблема взаимодействия плазмы со стенкой является одной из ключевых для обеспечения возможности работы термоядерного реактора, в частности, токамака в стационарном режиме. При взаимодействии с горячей плазмой поверхности внутрикамерных элементов из твердых материалов разрушаются, в результате чего частицы материала попадают в плазму. Поэтому для стационарной работы токамака необходимо предотвратить попадание тяжелых примесей в центральную область плазмы. В докладе приведен обзор методов, применяющихся на российских и зарубежных установках для уменьшения количества примесей в плазме.

Для защиты первой стенки от взаимодействия с плазмой применяют боронизацию и литиизацию. Но, как показано на многих установках, положительный эффект боронизации и литиизации уменьшается с течением времени и в конце концов пропадает.

Дополнительным методом является инжекция лития в плазму во время рабочих разрядов. Такой метод позволяет усилить действие кондиционирования стенок. В частности, на китайском токамаке EAST при использовании инжекции литиевого порошка получен разряд рекордной на сегодняшний момент длительности свыше 1000 с [1].

На токамаке T-11M проводятся испытания внутрикамерных элементов из жидкого лития на основе капиллярно-пористых систем (КПС). В 2021 г. был установлен разработанный в АО «НИКИЭТ» (ранее АО «Красная звезда») вертикальный литиевый лимитер с внешней подачей лития. При использовании его в течение длительного периода (2 года) было показано, что лимитер способен работать без дозаправки на протяжении не менее 500 рабочих разрядов (90 с).

Также на токамаке T-11M используется инжекция литиевых капель в плазму во время рабочих разрядов. Инжекция литиевых

капель является более чистым способом подачи лития в отличие от порошка, так как не вносит дополнительных примесей [2].

Литература

- [1]. Sun at al., The beneficial role of solid lithium injection in the achievement of record-duration high-performance plasmas in EAST, The 8th International Symposium on Liquid Metals Applications for Fusion, Hefei, China, 8-12 sept. 2024.
- [2]. А.В. Вертков и др., Ультразвуковой инжектор литиевых микрокапель и его первые испытания на токамаке Т-11М, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ FE В РАЗРЯДАХ ТОКАМАКА ИЗ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ВИДИМОЙ И МЯГКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Сунцов С.Д.¹, Крупин В.А.¹, Стрижов В.Ф.²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, stepansuntsoff@yandex.ru

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
РАН, Москва

Сильное влияние излучения примеси Fe на параметры разряда, определяющие устойчивость плазменного шнура, делает актуальным разработку методов определения величины и профиля концентрации Fe в плазме токамака.

Учитывая трудность определения концентрации Fe из линейчатого излучения предложен метод основанный на измерении тормозного и рекомбинационного континуума плазмы в т.н. “континуумных окнах” [1], присутствующих в видимой ($E_{phot}=2,37$ эВ) и мягкой рентгеновской ($E_{phot}= 2,65$ кэВ и 4,3 кэВ) областях спектра.

В обеих областях проводятся измерения интенсивности континуумов, которые приравняются расчетным значениям тормозного и рекомбинационного континуума ионов C и Fe, полученных в радиационно-столкновительной [2] и корональной моделях для плазмы Т-15МД.

В первой модели для каждого i -го иона примесей C, Fe используются уравнение его непрерывности в виде:

$$\frac{dn}{dt} + \text{div}[-D_i \nabla n_i + V_i n_i] = -\frac{n_i}{\tau_i^{ion}} - \frac{n_i}{\tau_i^{rec}} + \frac{n_{i+1}}{\tau_{i+1}^{rec}} + \frac{n_{i-1}}{\tau_{i-1}^{ion}}$$

где n_i, n_{i+1}, n_{i-1} – концентрации $i, i+1, i-1$ ионов, $\tau_i^{ion}, \tau_i^{rec}$ – времена ионизации и рекомбинации ионов, D_i – суммарный неоклассический и аномальный коэффициент диффузии иона, V_i – скорость его пинчевания. В корональной модели транспортный член $\text{div}[-D_i \nabla n_i + V_i n_i]$ принимается равным нулю. При температурах

$T_e=T_i=7\text{кэВ}$ распределения в плазменном шнуре концентрации ионов Fe в обоих моделях практически совпадают.

Из полученных двух уравнений с двумя неизвестными, в которых приравниваются расчетные и экспериментальные величины излучений определяются концентрации примесей Fe и C.

Литература

- [1]. Бугаря В.И. и др. Перенос многозарядных ионов в плазме токамака Т-10 // Физика плазмы – 1983 – Т. 9 – №.5 – с. 914–925.
- [2]. Днестровский Ю.Н., Стрижов В.Ф. Модель диффузии примесей в токамаках. – Препринт ИАЭ-3779/6. М.,1983. 31с

ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПОТЕНЦИАЛА И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ T-15МД

Виницкий Е.А.^{1,2}, Елисеев Л. Г.¹, Шелухин Д.А.¹,
Аммосов Я.М.^{1,3}, Мельников А.В.^{1,2,3}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²НИЯУ «МИФИ», Москва

³НИУ «Московский физико-технический институт», Москва

Одной из ключевых задач современной физики термоядерной плазмы остаётся изучение механизмов поперечного переноса частиц и энергии, связанного с мелкомасштабными флуктуациями плазмы (турбулентности). Диагностика зондирования пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ) позволяет регистрировать флуктуации потенциала и плотности с высоким пространственным и временным разрешением и активно внедряется на токамаке T-15МД [1].

В работе представлен численный анализ возможностей регистрации флуктуаций потенциала и плотности плазмы с помощью диагностики зондирования пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ) в условиях токамака T-15МД. Рассмотрены четыре типа флуктуаций, характерных для термоядерных установок в частотном диапазоне до 500 кГц: тиринг-мода (ТМ), геодезическая акустическая мода (ГАМ), квазикогерентная мода (ККМ), и альфеновские собственные моды (АМ). Предложен численный критерий измеримости флуктуации, основанный на анализе спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала с учётом шумов различного происхождения. Сигнал считается измеримым, если его СПМ выше СПМ шумового сигнала в частотном интервале существования сигнала, что позволяет надёжно выделять основные параметры флуктуаций — амплитуду, частоту и ширину спектра.

Выполнены расчёты пространственных областей регистрации для трех значений тороидального магнитного поля $B_t = 1,2; 1,5; 2,0$ Тл.

Показано, что высокочастотные колебания (ГАМ, ТМ, АМ) могут быть зарегистрированы до плотности $\bar{n}_e = 5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в широком радиальном диапазоне $\rho = 0,5-1,0$, а в периферийной области плазмы $\rho = 0,8-1,0$ до плотности $\bar{n}_e = 7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Для низкочастотных возмущений (ККМ) область измерений уже и ограничена радиально $\rho = 0,6-0,9$ при плотности $\bar{n}_e = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, при повышении плотности до $\bar{n}_e = 5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ измерения ККМ возможны в узкой области на границе плазмы $\rho = 0,8-1,0$.

Литература

- [1]. Drabinskiy M.A. et al. Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak // J. Instrum. 2019. Vol. 14, № 11.

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ БЕЗНЕЙТРОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Бикчурина М.И.^{1,2}, Быков Т.А.^{1,2}, Касатов Д.А.^{1,2},
Колесников Я.А.^{1,2}, Остринов Г.М.^{1,2}, Савинов С.С.^{1,2},
Соколова Е.О.^{1,2}, Шуклина А.А.^{1,2} и Таскаев С.Ю.^{1,2,3}

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, M.I.Bikchurina@inp.nsk.su*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

Ускорительный источник нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией (VITA) и литиевой мишени предложен и создан в Институте ядерной физики СО РАН в Новосибирске, Россия. Ускоритель генерирует стабильные пучки протонов/дейтронов постоянного тока с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Установка оснащена γ -, α -нейтронными спектрометрами и дозиметрами. VITA используется для разработки методики бор-нейтронозахватной терапии, радиационных испытаний перспективных материалов и многих других приложений. В последнее время VITA активно применяется для измерения сечений ядерных реакций.

Данное исследование посвящено изучению такой перспективной для термоядерного синтеза реакции как $^{11}\text{B} + \text{p}$. Измерено сечение ядерных реакций $^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha_1)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha_0)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha)\alpha\alpha$ в диапазоне энергий протонов от 75 кэВ до 2,2 МэВ. Проведено сравнение полученных данных с результатами, опубликованных другими группами исследователей и используемых при оценке перспективности реализации безнейтронной термоядерной энергетики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 19-72-30005).

ИНЖЕКЦИЯ ПЛАЗМЫ ИЗ КОАКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЛОВУШКУ ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Балдина Д.А.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, D.A.Baldina@inp.nsk.su*

На установке Газодинамическая Ловушка (ГДЛ) [1] в ИЯФ СО РАН проводятся исследования по нагреву и удержанию плотной субтермоядерной плазмы, частью которых является ряд экспериментов по поддержанию материального баланса плазмы с использованием коаксиального плазменного ускорителя (КПУ), также известного как пушка Маршала. ГДЛ представляет собой открытую ловушку с большим пробочным отношением. Главной ее частью является осесимметричный пробкотрон длиной 7 метров, с полем 0.3 Тл в центре и до 13 Тл в пробках, предназначенный для удержания двухкомпонентной плазмы. Одна из компонент – теплая «мишенная» плазма – имеет температуру электронов и ионов до 200 эВ и плотность $5 \cdot 10^{19}$ частиц в куб. м. Для этой компоненты характерен газодинамический режим удержания, то есть столкновительный режим, при котором мишенная плазма постоянно вытекает через магнитные пробки.

Другая компонента – это быстрые ионы со средней энергией ~ 10 кэВ и плотностью до $5 \cdot 10^{19}$ частиц в куб. м. Эти ионы образуются в результате перезарядки мощных пучков атомов, наклонно инжектируемых в мишенную плазму. Для второй (быстрой) компоненты характерен адиабатический режим удержания как в классическом пробкотроне.

Суммарные потери ее частиц через пробки могут быть оценены величиной ~ 500 А. [2] Дальнейшее развитие открытых ловушек на основе ГДЛ предполагает увеличение длительности рабочего импульса установки. Переход к большим временам удержания требует развития методов компенсации потерь мишенной плазмы и

поддержания ее материального баланса. В качестве такого метода предполагается использовать инъекцию струи плазмы параллельно силовым линиям магнитного поля.

КПУ позволяет создать струю плазмы с плотностью 10^{15} - 10^{16} см⁻³ и направленной скоростью порядка 100 км/с. Длительность разряда в КПУ меньше 100 мкс, характерный ток разряда 50-100 кА. Представлены результаты экспериментов по инъекции плазмы из коаксиального плазменного ускорителя (КПУ) в ГДЛ параллельно магнитному полю. Исследовано влияние параметров ускорителя на удержание плазмы в ГДЛ. Исследованы параметры плазмы в ГДЛ после инъекции из КПУ.

Литература

- [1]. А.А. Иванов, В.В. Приходько. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы. УФН, т. 187, № 5, 2017, с. 547-574
- [2]. Солдаткина Е.И., и др. Исследование продольного удержания плазмы в газодинамической ловушке. Тезисы докладов XLV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 2018, стр.69.

АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЭНЕРГИИ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Тепикин В.И.^{1,2}, Саврухин П.В.^{1,2}, Шестаков Е.А.¹,
Аристов А.И.^{1,2}, Храменков А.В.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, nrcki@nrcki.ru

²НИУ «Московский энергетический институт», Москва

Взаимодействие пучка ускоренных электронов с внутрикамерными элементами приводит к тепловым потокам в несколько ГВт/м², что на порядки превышает допустимые нагрузки на существующие материалы. Для определения безопасных операционных пределов токамаков-реакторов необходимо углубленное понимание процессов формирования и развития пучков ускоренных электронов.

Проведено моделирование эволюции максимальной энергии пучка ускоренных электронов в токамаке Т-15МДс использованием приближения пробной частицы [1]. В качестве входных параметров для моделирования используются экспериментальные значения плотности и электронной температуры. Электрическое поле определяется как $E_{\parallel} = V_l / 2\pi R_0$, где V_l – напряжение обхода, измеренное по датчикам потока на стационарной стадии разряда. На каждом временном шаге расчета учитывается: образование ускоренных электронов при энергии, большей критической энергии; их ускорение электрическим полем; торможение за счет кулоновских соударений, синхротронного излучения и взаимодействия с модами гофрировки тороидального магнитного поля.

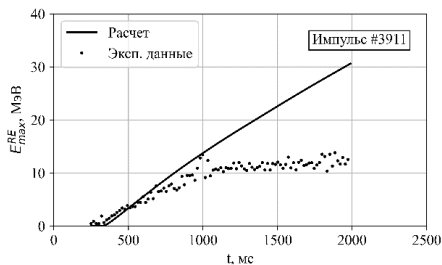


Рис. 1. Рассчитанная максимальная энергия ускоренных электронов и измеренная максимальная энергия жесткого рентгеновского излучения.

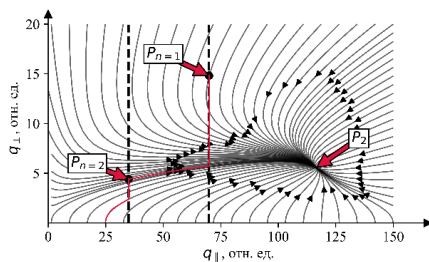


Рис. 2. Рассчитанная траектория электронов в фазовом пространстве нормированных импульсов ($q_{\parallel}$, $q_{\perp}$).

Получено хорошее совпадение рассчитанной и измеренной максимальной энергии ускоренных электронов до $10 \div 13$ МэВ (Рис. 1). Отличия при больших энергиях могут объясняться: 1) сниженной эффективностью регистрации тормозных гамма-квантов высоких энергий сцинтиллятором $LaBr_3(Ce)$; 2) нелинейными искажениями отклика детектора при повышенных потоках регистрируемого рентгеновского излучения; 3) достижением предела энергии по дрейфовым орбитам в случае образования пучка ускоренных электронов на периферии плазменного разряда.

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

Литература

[1]. Z. Popovic, et al. Physics of Plasmas. – 2016. – Т. 23, №12. – С. 1225

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0

Пашков И.И., Ефимов Н.Е., Пришвицын А.С.,
Подoliaко Ф.С., Крат С.А.

НИЯУ «МИФИ», Москва, paschckov.vania@yandex.ru

Токамак МИФИСТ-0 является небольшим сферическим токамаком с большим радиусом $R = 25$ см, малым радиусом $a = 10$ см. Магнитная система токамака состоит из непрерывного тороидального соленоида, центрального соленоида и 6 полоидальных катушек, расположенных симметрично относительно экваториальной плоскости. Электромагнитные диагностики включают в себя пояса роговского для измерения тока по катушкам и плазме, 15 петель измерения напряжения обхода, расположенных по периметру вакуумной камеры. Для облегчения пробоя на токамаке используется система СВЧ предыонизации на частоте 2,45 ГГц.

На данный момент токамак работает в омическом режиме и квазикруглой формой плазмы при тороидальном поле $B \approx 0,1$ Т л. Характерное значение тока плазмы разряда и длительности разряда составляют $I_p = 7$ кА, $t = 3-4$ мс.

Для расчета магнитных полей внутри проводящей вакуумной камеры токамака МИФИСТ-0 применяется метод разбиения вакуумной камеры на множество проводящих витков. В ходе разработки модели, для уточнения геометрической формы вакуумной камеры использовались результаты 3Д сканирования ее элементов. В расчете вакуумная камера описана при помощи 44 витков прямоугольного сечения. Ток по элементам вакуумной камеры, вызванный внешним электромагнитным воздействием со стороны катушек токамака рассчитывается из системы уравнений электрических контуров витков. Магнитный поток в произвольный момент рассчитывается по известным токам по катушкам токамака и распределению тока по элементам разбиения вакуумной камеры. Сопротивления элементов разбиения вакуумной камеры были подогнаны для обеспечения максимального соответствия расчетных и

экспериментально измеренных в ходе серии импульсов катушек токамака временных зависимостей полоидального потока на петлях напряжения.

В модели расчета магнитных полей ток по плазме описывается сеткой из филаментов (бесконечно тонких кольцевых токов), расположенных внутри пространства лимитера. Эволюция положения плазмы во времени описывается серией номеров узлов сетки по R и Z с шагом 100 мкс. При этом в промежуточные моменты времени ток плазмы динамически перераспределяется между двумя узлами сетки, для описания перемещения плазмы между ними. Для поиска эволюции положения плазмы от времени по данным эксперимента используются сигналы ряда петель напряжения на обходе, измеренные в эксперименте. Также используется сглаженная форма тока плазмы, измеренного в импульсе. Для поиска положения плазмы в следующий момент времени минимизируется сумма квадратов нормированного отклонения расчетного сигнала петли напряжения от экспериментально измеренного.

Для разрядов с током плазмы $I_p = 7$ кА была успешно рассчитана эволюция положения и границы плазмы, а также геометрические параметры конфигурации: большой и малый радиусы, вытянутость, треугольность. Результаты расчета хорошо коррелируют с данными скоростной съемки разряда.

КРОСС-ВЕРИФИКАЦИЯ КОДОВ MCU-FR И ODETTA-F ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ УСТАНОВОК УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ИЗ БАЗЫ ДАННЫХ SINBAD

Березнев В.П., Блохина Г.С., Игнатьев И.А.,
Колташев Д.С.

*Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, Москва*

Для обоснования радиационной безопасности установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) необходимо проведение расчетных оценок нейтронно-физических характеристик (НФХ) и дозовых нагрузок. Программы, используемые для данных расчетов, должны быть валидированы и верифицированы. На текущий момент в России нет аттестованных кодов для проведения подобных расчетов применительно к установкам УТС.

В настоящее время в ИБРАЭ РАН проводится верификация и валидация кода MCU-FR, разработанного на базе метода Монте-Карло в НИЦ «Курчатовский институт», а также разрабатывается код ODETTA-F, основанный на методе дискретных ординат и методе конечных элементов на неструктурированных тетраэдральных сетках. Данные коды предполагается использовать для моделирования переноса нейтронного и фотонного излучений в защитных композициях установок управляемого термоядерного синтеза и гибридных систем.

Проведено расчетное моделирование экспериментов из базы данных SINBAD (Fusion Neutronics Shielding):

– эксперимент ОКТАВИАН по определению спектров нейтронов и фотонов утечки из заполненных кремниевой засыпкой сфер диаметрами 40 см и 60 см при прохождении нейтронов с энергией 14 МэВ (NEA-1553/21);

– бенчмарк-эксперимент Физико-энергетического института (ФЭИ) по прохождению нейтронов с энергией 14 МэВ через железные сферы (NEA – 1517/75);

– бенчмарк-эксперимент FNS/JAERI с цилиндрической сборкой из вольфрама (NEA-1553/74).

Источником в экспериментах являлись титан-тритиевые пластины, бомбардируемые дейтронами и испускающие в результате реакции ${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$ нейтроны со средней энергией 14,1 МэВ. Измерялись энергетические спектры нейтронного и фотонного излучений, скорости реакций и мощность поглощенной дозы фотонного излучения.

Для прямого сравнения расчетных и экспериментальных энергетических спектров нейтронного и фотонного излучений сначала моделирование проводилось с помощью кода MCU-FR с энергетической структурой спектров источников и откликов из базы данных SINBAD. Затем проводились расчеты с помощью кода ODETТА-F в 299- и 127- групповых энергетических приближениях для нейтронного и фотонного излучений соответственно.

Рассчитанные с помощью кодов MCU-FR и ODETТА-F скорости реакции и мощность поглощенной дозы гамма-излучения согласуются с экспериментальными данными в пределах 30 %.

КИНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА БЫСТРОГО ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В КОДЕ SOLPS-ITER ДЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА

Колесов Ф.Р., Маренков Е.Д.

НИЯУ «МИФИ», Москва, fedorkolesov160294@gmail.com

При расчетах эрозии материалов дивертора и первой стенки токамака с небольшим первым потенциалом ионизации, таких как Li (5.39 эВ), важен учет явления быстрого переосаждения. Оно заключается в том, что нейтральный атом, распыленный (испаренный) с поверхности потоком плазмы, может сразу после ионизации вернуться обратно на поверхность под воздействием магнитного поля токамака и электрического поля пристеночного слоя Дебая-Чодуры. Эффективность быстрого переосаждения характеризуется коэффициентом R_p , определяемым как отношение переосажденного потока к потоку эродированных частиц. Обычно R_p считается методом Монте-Карло или по формуле, предложенной Фуссманном [1]. Однако вычисления методом Монте-Карло довольно длительны и потому не подходят для использования в кодах, моделирующих пристеночную плазму, а оценка по формуле Фуссмана не учитывает влияние электрического поля пристеночного слоя и применима только для распределения эродированных частиц по косинусу.

Нами было найдено аналитическое решение кинетического уравнения для быстро переосаждаемых ионов с учетом магнитного поля и электрического поля слоя [2-3]. Используя найденные решения, был разработан модуль для численного расчета R_p на языке Fortran. Разработанный модуль позволяет вычислять R_p для произвольного начального распределения эродированных частиц и формы потенциала слоя. Высокая скорость вычислений ($\lesssim 1$ с. / точка) при приемлемой точности (0.1%) позволяет использовать модуль для учета быстрого переосаждения при моделировании пристеночной плазмы в коде SOLPS-ITER.

Были проведены тестовые расчеты для токамака T-15МД с дивертором, покрытым жидким Li, для разряда с мощностью, приносимой из центральной плазмы, $P_{\text{sol}} = 10$ МВт, и различными плотностями на сепаратрисе, $n_{e,\text{sep}}$. Расчеты показали, что с учетом электрического поля значения R_p на пластинах дивертора вырастают в несколько раз в сравнении со значениями, оцененными по формуле Фуссмманна. Наибольшее значение R_p достигается в области максимальной нагрузки на мишень (strike-point) и составляет $\geq 95\%$.

Также было рассмотрено влияние формы потенциала слоя на R_p . Было показано, что при варьировании параметров потенциала экспоненциального типа, характерного для слоя Дебая-Чодуры, величина R_p изменяется на 3-5%, что служит оценкой точности предлагаемого подхода.

Литература

- [1]. Fussmann G. et al. 1995. Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Seville) (Vienna: IAEA) vol. 2, p. 143
- [2]. Marenkov E.D. 2024. Phys. Plasmas 31
- [3]. Marenkov E.D., Kolesov F.R. 2025. Phys. Plasmas 32 – принята к публикации

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И КАНАЛОВ ДИАГНОСТИКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ТИН-1

Фомин Д.А.¹, Жиркин А.В.^{1,2}

¹НИУ «Московский энергетический институт», Москва,
FominDA@mpei.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Zhirkin_AV@nrcki.ru

В процессе дейтериевой тритиевой реакции выделяется большое количество нейтронов, которые можно использовать для разных целей, например, таких как трансмутация долгоживущих радиоактивных отходов и наработка ядерного топлива. Установка, которая позволит достичь этих целей, получила название термоядерный источник нейтронов ТИН-1. ТИН-1 планируется создать на основе токамака Т-15МД [1]. В процессе подготовки к реализации установки, требуется провести ряд расчётных нейтронно-физических исследований.

Первой задачей на пути разработки полномасштабной модели реальной геометрии ТИН-1 для нейтронно-физических расчетов является создание трехмерной модели вакуумной камеры с диагностическими патрубками. Модель создавалась с использованием программы MCNP-5 [2], на основе чертежей токамака Т-15МД, путем имитации формы и размеров вакуумной камеры и патрубков в масштабе 1:1. Материалы вакуумной камеры определены в соответствии с составом материалов токамака Т-15МД.

В построенной модели по программе MCNP-5 методом Монте-Карло с библиотекой ядерных данных ENDF/D-VII [3] выполнен расчетный анализ энергетических распределений плотности потока нейтронов в детекторах-ячейках, расположенных на различных участках вакуумной камеры, флюэнсов, доз радиационных смещений и наработки газовых примесей от ядерных реакций в используемых материалах. В расчетах использовалась модель плазмы как объемного

тороидального источника термоядерных нейтронов с энергией 14 МэВ от реакции слияния ядер дейтерия и трития.

Полученные результаты планируется использовать для подготовки проведения экспериментов на ТИН-1 по исследованию изменения свойств материалов термоядерных установок под действием D-T источника нейтронного термоядерного излучения.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в НИЦ «Курчатовский институт» по комплексной теме 15П.

Литература

- [1]. П.П. Хвостенко, И.О. Анашкин, Э.Н. Бондарчук, Н.В. Инютин, В.А. Крылов, И.В. Левин, А.Б. Минеев, М.М. Соколов, Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15-38.
- [2]. J.F. Briesmeister, “MCNP—a General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C”, LA-13709-M Los. (2000); intro.toc (lbl.gov).
- [3]. “ACE formatted files for the ENDF/B-VII.1”, May (2008).

СТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ В4С К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Сергеечев А.А.¹, Позняк И.М.^{1,2}, Кутуков А.К.¹,
Барсук В.А.¹, Панин С.Е.¹, Алябьев И.А.^{1,2},
Бирюлин Е.З.^{1,2}, Цыбенко В.Ю.^{1,2}, Фомичева С.Ю.^{1,2},
Лушиков А.Ю.^{1,2}, Ульяницкий В.Ю.³, Батраев И.С.³,
Штерцер А.А.³, Путрик А.Б.⁴

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, sergeechev@triniti.ru

²НИУ «Московский физико-технический институт», Долгопрудный

³Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск

⁴ЧУ «ИТЭР-Центр», Москва

Покрытия на основе бора являются перспективными для использования в качестве защиты внутрикамерных компонентов будущих термоядерных реакторов (ТЯР) [1]. В качестве одного из возможных вариантов облицовки вакуумной камеры ТЯР выступают керамические покрытия из карбида бора (В4С). К основным преимуществам таких покрытий принято относить стойкость к высоким температурам, а также возможность нанесения покрытия прямо во время работы реактора. Стоит отметить, что компоненты стенки ТЯР будут подвергаться мощным импульсным плазменно-тепловым нагрузкам, возникающим при переходных процессах в плазме (ELМы, срывы). В связи с этим актуально исследование стойкости керамических защитных покрытий при интенсивном плазменном воздействии.

В работе представлены результаты исследования поверхности покрытия из В4С после воздействия импульсных потоков плазмы на установке «КСПУ-Б» [2]. Эксперименты выполнены с вольфрамовыми образцами в виде пластин 20×20×8 мм³. На их поверхность методом детонационного напыления [3, 4] наносилось покрытие из карбида бора толщиной от 50 до 1000 мкм. Условия облучения мишеней соответствовали неослабленным срывам ИТЭР [5]. Измеренная

плотность тепловой энергии, поглощаемой поверхностью образцов, составляла $1,3 \text{ МДж/м}^2$ при длительности воздействия 1 мс. В качестве плазмообразующего газа использовался дейтерий. Облучение образцов проводилось последовательно двумя сериями по 5 импульсов.

В ходе анализа фотографий поверхности, полученных методом конфокальной и сканирующей электронной микроскопии, обнаружены признаки плавления, а также многочисленные дефекты в виде трещин, кратеров и каверн, что указывало на интенсивную макроскопическую эрозию покрытий. Глубина участков схода покрытия находилась в интервале от 10 до 110 мкм. Массовый показатель схода покрытия за 10 импульсов составлял 7,6 – 10,8 %.

Литература

- [1]. Winter J. Plas. Phys. Cont. Fus. – 1996. – Т. 38. – №. 9. – С. 1503.
- [2]. Кутыков А.К. и др. Инж. физ. – 2023. – № 10. – С. 47-58.
- [3]. Ulianitsky V. Y. et al. Metals. – 2019. – Т. 9. – №. 12. – С. 1244.
- [4]. Batraev I.S. et.al. Mater. Lett. – 2024. – Т. 387. – С. 138264.
- [5]. Pitts R. A. et al. Nucl. Mater. Energy. – 2019. – № 20. – С. 100696.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ СЕГРЕГАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Марчий Г.В., Самсонов Д.С., Мухин Е.Е.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, georgiy.marchiy@mail.ioffe.ru*

Нанокристаллические материалы обладают уникальными функциональными свойствами, включая высокую прочность и радиационную стойкость. Однако их применение часто осложняется неустойчивостью к росту зерен. В последнее время активно исследуется механизм контролируемого подавления роста зерен с помощью зернограничной сегрегации примеси, позволяющий стабилизировать нанокристаллические материалы даже при повышенных температурах. С другой стороны, в нанокристаллических материалах, где объемная доля вещества, относящегося к границам зерен сопоставима с его количеством внутри зерен, зернограничная сегрегация примеси наравне с преципитацией и образованием раствора значительно влияет на функциональные свойства.

В значительной части экспериментальных работ в области материаловедения выбор подходящих примесей ведется эмпирически – без теоретического анализа эффектов, связанных с зернограничной сегрегацией. С развитием теоретических моделей и численных методов появилась возможность описывать сегрегацию и предсказывать её влияние на свойства материалов, не опираясь только на эмпирические данные. Современная спектральная модель сегрегации, используя в качестве входных данных результаты молекулярно-динамических и *ab initio* расчетов распределения энергий сегрегации, позволяет вычислить термодинамические потенциалы для нанокристаллической фазы, сегрегированной примесью. Таким образом, в большинстве случаев ключевым элементом для описания сегрегации является расчет энергий сегрегации. Для некоторых материалов такие расчеты могут

быть выполнены с помощью классических или нейросетевых потенциалов межатомного взаимодействия. Для остальных материалов необходимо использование более вычислительно сложных *ab initio* расчетов.

Пример применения теоретического подхода — стабилизация роста зёрен в оптических покрытиях вакуумных зеркал диагностик ИТЭР на основе тонких поликристаллических плёнок серебра. Такие зеркала деградируют из-за роста зёрен при термоциклировании. Нами был предложен способ подавления роста зёрен введением примеси никеля, а также методы численного и теоретического моделирования сегрегации. Сейчас мы развиваем подходы к моделированию преципитации и *ab initio* расчёту энергий сегрегации.

Мы считаем, что подход, основанный на разработанных теоретических и численных методах моделирования сегрегации и влияния её на свойства материалов, имеет многообещающий потенциал применения и в других задачах, возникающих при проектировании термоядерных реакторов, в частности в конструкционных материалах.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПР-8 ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Рогозин К.А., Белоусов С.В., Будаев В.П.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Rogozin_KA@nrcki.ru

Испытания обращенных к плазме материалов при критически высоких стационарных нагрузках, ожидаемых в термоядерном реакторе, показали возможность повышенной эрозии и модификации материалов (см. обзор [1]). В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается проект и будет сооружен универсальный материаловедческий исследовательский комплекс УНИМАТ-ТС для проведения плазменно-пучковых, тепловых и водородных испытаний перспективных конструкционных и функциональных материалов и конструкций, плазменно-физических технологий для применения в термоядерных реакторах, в т. ч., в термоядерном источнике нейтронов ТИН-1. Проводятся работы по подготовке к эксплуатации плазменной установки ПР-8 [2], которая будет использоваться как прототип модуля для стационарных плазменных испытаний материалов в исследовательском комплексе. Для обеспечения работы ПР-8 в стационарном (многочасовом) режиме система питания магнитов и других узлов будет дооснащена мощными источниками питания постоянного тока. Вакуумная система ПР-8 будет состоять из высоковакуумных турбомолекулярных и форвакуумных насосов для достижения давления в камере $\sim 10^{-7}$ торр. Плазмообразующие газы - гелий, водород, аргон и др. Нагрев плазмы будет обеспечиваться током между катодом и анодом. Проектируется модуль нагрева плазмы с использованием системы ИЦР нагрева. Для обеспечения стационарной (многочасовой) работы плазменной установки будет использоваться водяное охлаждение магнитных катушек. Проектируемые параметры плазмы в ПР-8 в экспериментах: магнитное поле на оси – до 0,2 Т, концентрация плазмы – до 10^{13} см⁻³ и более, температура электронов – до 20 эВ, диаметр плазменного столба – 8-10 см. Для измерения параметров плазмы будут

использоваться зондовые, оптические, микроволновые, магнитные диагностики, пирометры, калориметры, масспектрометр. В ПР-8 будут также проводиться исследования в обеспечение развития новых плазменных технологий [3] для синтеза новых материалов с запрограммированными свойствами для ядерных, химических, аэрокосмических технологий, для биотехнологий и биомедицинских применений.

Работа выполнена по комплексной теме 15П НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Будаев В.П. Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. 2015, 38, 4, 5
- [2]. Ю.В.Готт, М.С.Иоффе, Б.И.Канаев и др., Вопросы атомной науки и техники, серия «Термоядерный синтез», в.3, с.59, 1990.
- [3]. Budaev V.P., JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, 2017, 891, 012301.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ УДАРОВ, ОЖИДАЕМЫХ В ХОДЕ ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ, НА ПОВЕРХНОСТЬ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ТИТАНА

Рыжков Г.А.¹, Черепанов Д.Е.^{1,2}, Вячеславов Л.Н.¹,
Касатов А.А.^{1,3}, Попов В.А.^{1,3}

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, ryzhkov.george98@gmail.com*

²*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск*

³*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Одной из ключевых проблем создания термоядерного реактора является выбор оптимального защитного материала обращённых к плазме компонентов. Как известно, в реакторе с магнитным удержанием первая стенка рабочей камеры и плазмоприёмники в диверторе будут подвергаться термическим ударам, возникающими в результате протекания переходных процессов в плазме реактора. Такие термические удары могут приводить к эрозии защиты обращенных к плазме компонентов. В последнее время в качестве материала первой стенки привлекают внимание высокотемпературные керамические композиты, имеющие относительно невысокое среднее зарядовое число. Материалы с малым зарядовым числом имеют преимущества в том, что в случае попадания их в виде примесей в плазму не будет происходить значительного роста потерь энергии плазмы на излучение.

Одним из перспективных материалов является TiB_2 . Однако его применение ограничено плохой спекаемостью: получаемые образцы имеют высокую пористость, что ухудшает его теплофизические и механические свойства и, как следствие, снижает устойчивость к термическим ударам. Тем не менее, существуют методы решения данной проблемы. Один из таких методов состоит в добавлении

связующих веществ в состав керамик на стадии производства. Пример такой керамики со связующей добавкой является AlN-TiB₂.

В ИЯФ СО РАН для исследования воздействий термических ударов на различные материалы используется лазерный стенд экспериментального комплекса БЕТА [1, 2]. Термические удары на данном стенде моделируются с использованием иттербиевого волоконного лазера с возможностью модуляции интенсивности излучения.

В рамках данной работы было проведено испытание образцов из TiB₂ и AlN-TiB₂ в импульсно-периодическом режиме работы лазера. В ходе нагрева температура их поверхностей регистрировалась с помощью двухцветной пирометрии. Облучение образцов производилось сериями по несколько импульсов с одинаковыми мощностями и длительностями. Между сериями импульсов состояние поверхности контролировалось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

Литература

- [1]. Cherepanov D. et al. Erosion of boron carbide coating due to high pulse number transient heat loads // Plasma Science and Technology, 2025.
- [2]. Cherepanov D. E. et al. In situ study of thermal shock damage to high-temperature ceramics // Nuclear Materials and Energy, 2023, т. 36, с. 101495.

СВОЙСТВА АЛЬФВЕНОВСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А.,
Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В.,
Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Смирнов А.И.,
Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Abdullina@mail.ioffe.ru*

В плазме термоядерных установок могут развиваться неустойчивости на быстрых частицах (ионах и электронах). Одним из наиболее распространенных видов неустойчивостей, вызываемых как ионами, так и электронами, являются альфвеновские колебания (АК) [1, 2]. На токамаке ТУМАН-3М АК регистрируются в омическом режиме в разрядах с высоким уровнем жесткого рентгеновского излучения [3, 4]. В настоящее время мы придерживаемся предположения, что фракция убегающих электронов плазмы является драйвером раскачки АК [5, 6].

К другому типу неустойчивостей, вызываемых быстрыми ионами, относится неустойчивость, приводящая к генерации излучения на частоте ионно-циклотронного резонанса ионов плазмы. На токамаке ТУМАН-3М быстрые ионы, вызывающие ионно-циклотронное излучение (ИЦИ, англ. NBI ICE), генерируются при инжекционном нагреве [7].

Доклад содержит в себе информацию об экспериментальном исследовании этих двух типов неустойчивостей при помощи магнитных зондов: АК и ИЦИ при инжекционном нагреве. Для АК были определены: пространственная локализация, пространственно-временная и модовая структура, поляризация колебаний. Кроме того, проведены эксперименты в двухкомпонентной плазме с целью использования АК в качестве диагностического инструмента – для определения изотопного соотношения. Для ИЦИ при инжекционном

нагреве проведен анализ его тонкой структуры линий, а также построено дисперсионное соотношение.

На токамаке ТУМАН-3М ИЦИ регистрируется также в омическом режиме, в этом случае его характеристики отличаются от излучения, возникающего при инжекционном нагреве [8].

Литература

- [1]. Heidbrink W.W. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 055501.
- [2]. N.Chu, Y. Sun , S. Gu et al. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58 P. 104004.
- [3]. Askinazi L.G., Afanasyev V.I., Altukhov A.B. et al. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 104013.
- [4]. Lebedev S.V., Askinazi L.G., Balachenkov I.A. et al. // 43rd EPS Conf. on Plasma Physics. 2016. P5.036.
- [5]. Тукачинский А.С., Аскинази Л.Г., Балаченков И.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 24.
- [6]. Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, В. 4, С.36-40.
- [7]. L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, D.B. Gin et al. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. P. 082003.
- [8]. S.V. Lebedev, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov et al. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149, 03010

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЛИТИЯ В ЛИМИТЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

Андрианова Р.Р.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, rrandrianova@triniti.ru

Существующие материалы для внутрикамерных элементов токамака, например, вольфрам и бериллий имеют высокое зарядовое число. Уникальные свойства лития, являются основой возможности его использования как элемента, контактирующего с плазмой токамака [1].

Вопрос о поведении примесей вблизи первой стенки вакуумной камеры и их воздействие на неё является актуальным в области управляемого термоядерного синтеза. Процессы в краевой плазме в целом и взаимодействие плазмы со стенкой в частности играют решающую роль в достижении устойчивого состояния термоядерной плазмы в токамаке [2]. Однако, примеси влияют не только на удержание плазмы, но и на внутреннюю поверхность вакуумной камеры токамака и элементы первой стенки. Примеси распыляются за счёт потока ионов, контактирующих с горячей плазмой, после чего достигают сепаратрисы и проникают в центральную часть плазменного шнура. Это ведёт к потерям энергии из-за излучения примесей внутри плазмы. Также существует влияние процессов в периферийной плазме на глобальные свойства удержания. Исследовать процесс переноса примесей и его влияние на параметры плазмы является целью работы.

Для решения представленной задачи разработана модель переноса частиц в области периферийной плазмы, которая позволяет проводить расчёты поведения примесей в плазме токамаков лимитерной конфигурации с учётом заданной границы плазменного шнура [3]. Моделирование влияния примеси на основные параметры плазмы позволяет установить и оценить изменение плотности плазмы, профиля радиационных потерь, напряжения на обходе, длительности плазменного разряда. Для тестирования разработанной модели переноса примесей выполнен численный эксперимент для ИТЭР-подобного токамака, в

рамках которого проверялись балансы потоков входящих в плазму нейтралов и выходящих из неё заряженных частиц. Также производилось сравнение полученного энергетического времени с временем, рассчитанным по нео-алкаторному скейлингу, а также величины вложенной мощности по сравнению с мощностью потерь энергии вследствие теплопроводности и излучения.

Литература

- [1]. М.Ю. Жарков, А.В. Вертков, И.Е. Люблинский – Вертикальный литиевый лимитер для экспериментов на токамаке T11-M, "Труды Межвузовской научной школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике электронике, экологии и медицине", 2012, с. 18-22
- [2]. Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Safronov V.M. et al. J. of Nuclear Materials, 1995, 220-222, 1066
- [3]. R.R. Khayrutdinov and V.E. Lukash. Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-Variable Technique. – J. Comput. Physics, 109 (1993) 193-201

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЮСТИРОВКИ КРИОМАГНИТОВ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД И КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИРОТРОННОГО ЗАЛА НА ВЫХОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА КОЛЛЕКТОРЕ ГИРОТРОНА

Губанова А.И., Борщеговский А.А., Ахмедов Э.Р.,
Пименов И.С., Рой И.Н., Новиков В.Н.,

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Gubanova_AI@nrcki.ru

На установке токамак Т-15МД планируется размещение восьми гиротронов суммарной мощностью 8 МВт. Каждый гиротрон размещен в сверхпроводящем криомагните, создающим определенную конфигурацию магнитного поля. Параметры рабочего режима и условия эксплуатации гиротронов определяются производителем гиротронов, компанией ЗАО НПП «ГИКОМ» [1]. При отклонении распределения магнитного поля от рекомендованного производителем под воздействием электронного пучка гиротрона могут формироваться локальные области повышенной плотности мощности на внутренней поверхности коллектора гиротрона, что может привести к выходу прибора из строя.

Источником нарушения конфигурации магнитного поля могут являться три фактора или их суммарное действие:

- 1) магнитное поле, созданное полоидальными и тороидальными катушками, центральным соленоидом (ЦС) и током плазменного разряда на установке токамак Т-15МД;
- 2) магнитные поля, создаваемые криомагнитами соседних гиротронов;
- 3) ферромагнитные конструкции, расположенные в гиротронном зале Т-15МД.

Кроме того, качество юстировки криомагнита, заключающееся в совмещении геометрической оси гиротрона и магнитной оси соленоида, влияет как на КПД прибора, так и на выход пучка на коллекторе.

Юстировка контролируется специальным прибором, снабженным датчиками Холла, размещенным в «теплом» отверстии криомагнита.

В текущем исследовании были поставлены эксперименты с использованием устройства, полностью имитирующего прохождение электронного пучка вдоль линий индукции магнитного поля в гиротроне. На внутреннюю поверхность коллектора устройства нанесены люминофоровые кольца для определения выхода пучка через окно, установленное на торце коллектора. Измерения проводились в местах расположения пяти криостатов гиротронного комплекса установки Т-15МД. В результате проведенных экспериментов выявлены местоположения, в которых влияние ферромагнитных материалов может оказаться наиболее критичным для нормального состояния коллектора работающего гиротрона.

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

Литература

- [1]. Г.Г. Денисов, В.И. Малыгин, А.И. Цветков и др., Известия вузов. Радиофизика, том LXIII, №5-6, стр. 369

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА УСТАНОВКИ Т-15МД ПРИ РАБОТЕ НА ДЕЙТЕРИЕВОМ ТОПЛИВЕ

Кизуб П.А.¹, Ефремов Р.О.¹, Халиков Р.С.¹,
Кирнева Н.А.², Хвостенко А.П.²

*¹Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, Москва*

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Установка Т-15МД – крупнейший в России токамак, размещенный на площадке НИЦ «Курчатовский институт» и введенный в эксплуатацию в 2021 году. В 2023 году выполнен энергетический пуск токамака на водородном топливе, а в 2024 году опубликованы первые экспериментальные результаты, демонстрирующие получение плазменных разрядов с током до 250 кА, длительностью до 2 с и электронной температурой плазмы до 3 кэВ. После выполнения задач установки в водородной плазме [1] один из возможных путей развития токамака Т-15МД – проведение экспериментальных кампаний на дейтериевом топливе.

В работе [2] показано, что при дейтериевом импульсе токамака Т-15МД нейтронное и вторичное гамма-излучения обуславливают высокие дозовые поля вблизи установки, особенно в области крыши здания, в виду недостаточности физических барьеров. В связи с чем, для обеспечения радиационной безопасности персонала установки необходимо принятие дополнительных мер радиационной защиты: использование системы физических барьеров (биологическая защита), защита расстоянием (контролируемая зона доступа) и временем (нормирование времен пребывания). Вышеперечисленные меры защиты должны обеспечивать не превышение допустимых радиационных уровней для персонала и населения, установленных в нормативных документах [3-4].

В работе выполнены нейтронно-физические исследования, демонстрирующие возможность обеспечения радиационной

безопасности персонала установки Т-15МД при работе на дейтериевом топливе. Для этого проведены вариантыные расчеты дозовых полей вблизи токамака во время и после дейтериевых импульсов, а также после 32 импульсов с применением программ для ЭВМ TDMCC и TRACT-F. При этом использовалась трехмерная модель токамака и части здания, в которой он располагается, разработанная, в том числе, на основании данных, полученных в результате лазерного сканирования экспериментального зала. Анализ результатов вариантыных расчетов позволил определить меры радиационной защиты, обеспечивающие радиационную безопасность персонала при работе токамака на дейтериевом топливе. Полученные оценки дозовых воздействий на персонал могут быть использованы при обосновании безопасности дейтериевого режима работы токамака Т-15МД.

Литература

- [1]. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Анашкин И.О. и др., Программа Физических исследований на токамаке Т-15МД // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2024. – Т. 47. – №. 4. – С. 9.
- [2]. Хрипунов В. И. Оценка источников и полей излучения на установке Т-15МД // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2020. – Т. 43. – №. 1. – С. 9.
- [3]. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09.
- [4]. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10.

СИСТЕМА СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

Кунгурцев Н.А., Терещенко И.Б., Коваль А.Н.,
Николаенко К.О., Богачев Д.Л., Толстяков С.Ю.,
Мухин Е.Е.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, n.a.kungurtsev@mail.ioffe.ru*

В докладе представлено состояние дел по разработке оптической системы сбора диагностики томсоновского рассеяния (ТР) в диверторе токамака ИТЭР. Диагностика ТР в диверторе играет ключевую роль в измерении электронной температуры и концентрации в окрестности strike-point наружной ноги дивертора ИТЭР [1]. Эти данные необходимы для реализации обратной связи при управлении режимом работы дивертора и поддержания режима отрыва плазмы от диверторных пластин. Однако размещение системы диагностики ТР в диверторе представляет собой сложную техническую задачу из-за экстремальных условий эксплуатации, включая высокие тепловые и радиационные нагрузки, сложную геометрию и ограниченное пространство.

В данном докладе рассматривается конструкция системы сбора излучения диагностики ТР в диверторе ИТЭР, а также анализ её оптического пропускания и устойчивости к экстремальным нагрузкам. Особое внимание уделяется ключевым ограничениям, таким как радиационные потоки (нейтроны) и загрязнение оптики продуктами эрозии первой стенки. Для преодоления этих ограничений требуется использование материалов с высокой устойчивостью к радиации и разработка систем чистки зеркал, находящихся в прямой видимости термоядерной плазмы [2,3].

Оптические требования к системе включают высокую пропускную способность в диапазоне длин волн 900-1064 нм, устойчивость к вибрациям, тепловым деформациям и аварийному прорыву пара. Кроме того, рассматриваются допуски на оптические требования и факторы, влияющие на них, включая абберационный анализ

и геометрические факторы [4,5]. Конструкция системы сбора излучения предусматривает интеграцию с портом дивертора и закрепление зеркал на диагностических модулях, с разделением на внутривакуумные и вневакуумные элементы.

Анализ системы включает оценку коэффициента пропускания всей системы, расчёт потерь на зеркалах в зависимости от покрытия и шероховатости поверхности, а также оценку влияния условий эксплуатации на оптические покрытия.

Литература

- [1]. Е. Е. Мухин и др. “Диагностический комплекс томсоновского рассеяния для мониторинга электронного компонента плазмы в диверторной зоне токамака ИТЭР,” ВАНТ, vol. 2, p. 59-68, 2010.
- [2]. I. Orlovskiy, E. Andreenko, K. Vukolov, T. Mukhammedzyanov, and A. Tobengauz, “Broadband dielectric mirrors for optical diagnostics in ITER,” Fusion Eng. Des., vol. 88, no. 6-8, pp. 1284–1287, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.fusengdes.2013.01.072.
- [3]. I. I. Orlovskiy and K. Yu. Vukolov, “Thermal and neutron tests of multilayered dielectric mirrors,” Fusion Eng. Des., vol. 74, no. 1–4, pp. 865–869, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.fusengdes.2005.06.154.
- [4]. И. Б. Терещенко и др. “Высокоотражающее серебряное зеркало в условиях отжига и гидротермальной коррозии,” Письма В ЖТФ, vol. 51, no. 5, pp. 25–28, 2025, doi: 10.61011/PJTF.2025.05.59899.20136.
- [5]. D. Samsonov et al Large-scale collecting mirrors for ITER optical diagnostic 2022 Nucl. Fusion 62 086014 doi: 10.1088/1741-4326/ac544d

ПЛАЗМЕННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

РАЗРАБОТКА ЗОНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ ЭРД

Майстренко Д.А.^{1,2}

¹АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва

²НИУ «Московский физико-технический институт»,
Долгопрудный, maystrenko.da@phystech.edu

В настоящее время область применения электроракетных двигателей растет, и задачи, связанные с диагностикой таких двигателей, приобретают всё большую популярность. Одной из таких задач является исследование зарядового спектра ионов в струе плазмы ЭРД. Чаще всего для этого используется так называемый ЕхВ зонд или фильтр Вина¹, в котором используются скрещенные магнитное и электрическое поля для разделения ионов по заряду. В струе плазмы ЭРД ионы, имеющие разную величину заряда, имеют разную скорость вследствие того, что они ускорялись одинаковым потенциалом. В зонде используются ортогональные электрическое и магнитное поля, перпендикулярные потоку влетающих в зонд частиц. Изменение траектории частиц происходит под действием силы Лоренца, при этом осуществляется разделение ионов разных скоростей и, соответственно, разных зарядов.

Основной недостаток такой конструкции — это крайне слабый сигнал на коллекторе ионов (порядка 1 нА) и при попытке улучшения сигнала критически падает спектральное разрешение зонда, внося дополнительную погрешность в определении долей многозарядных ионов в плазме ЭРД. Еще одним недостатком являются крайне высокие требования к юстировке зонда, что создает существенные сложности при работе, особенно учитывая то, что юстировка должна проводиться относительно оси струи плазмы двигателя, которая не совпадает с осью двигателя.

В данной работе приводятся результаты моделирования работы ЕхВ зонда в струе ионного двигателя с энергией ионов в диапазоне от 500 до 2000эВ и плотностью ионного тока до 10 А/м². Моделирование проведено для пучков с энергоспектром струи ненулевой ширины, при

различных углах падения ионов, с учетом влияния пространственного заряда и неоднородности магнитного и электрического полей. Результаты расчетов верифицируются экспериментально на примере зонда стандартной конструкции^{1,2} и делается вывод о применимости модели для расчета работы ЕхВ зонда в реальных условиях. Предложены идеи для решения указанных проблем с помощью фокусировки ионного пучка и с помощью расчетного поиска наиболее оптимальной геометрии зонда. В результате показано, что ионно-оптическая система позволяет собирать ионы с большей площади при тех же размерах входной апертуры зонда и компенсирует расхождение ионного пучка во входном коллиматоре из-за пространственного заряда. Более того, с помощью ионно-оптической системы происходит фокусировка пучка, тем самым снижая требования к юстировке зонда. В работе делается вывод о преимуществах ЕхВ зонда с ионно-оптической системой и о возможности решения указанных проблем предложенным способом.

Литература

- [1]. S. Kim, “Experimental investigations of plasma parameters and species-dependent ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a hall thruster”, (1999)
- [2]. В.В. Кожевников, “Автоматизированная система диагностики параметров выходного пучка радиочастотного ионного двигателя”, (2014)

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Козлов А.А., Завалова В.Е., Козлов А.В.,
Карпушин Ю.В., Полищук В.П.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,
alexk5577@yandex.ru*

При опытах с импульсным плазменным ускорителем (ИПУ) необходимы данные о динамике роста давления рабочего газа (водорода) в ИПУ. В данной работе предложен и апробирован метод определения давления газа в разрядной камере ИПУ, основанный на измерении напряжения пробоя V_b заданного промежутка. Измеренные значения V_b сопоставлялись с результатами расчёта, которые были выполнены в рамках критерия пробоя Пашена [1] с использованием зависимости подвижности электронов и константы ионизации от параметра Таунсенда E/N [1], где E – напряженность электрического поля, N – концентрация молекул газа.

Использовалась экспериментальная установка, описанная в работе [2]; напуск газа в разрядную камеру ИПУ производился электродинамическими клапанами (ЭК). Измерялось напряжение V_b между медными электродами с зазором между ними – 6 мм. Измерения проводились по следующей схеме: к электродам прикладывалось напряжение ($\sim 1 \div 8$ кВ), после чего открывались ЭК. Осциллограф фиксировал резкое падение напряжения на промежутке в момент пробоя. На рисунке приведены три осциллограммы напряжения на зонде, а также U_{kl3} – сигнал управления открытием ЭК. Из осциллограмм, приведенных на рисунке, следует, что время наступления пробоя уменьшалось с увеличением приложенного напряжения. Это означает, что напряжение пробоя описывается левой веткой кривой Пашена [1]. Сопоставление измеренных и рассчитанных значений V_b показало, что характерное значение концентрации молекул водорода к моменту включения ИПУ составляло $\sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

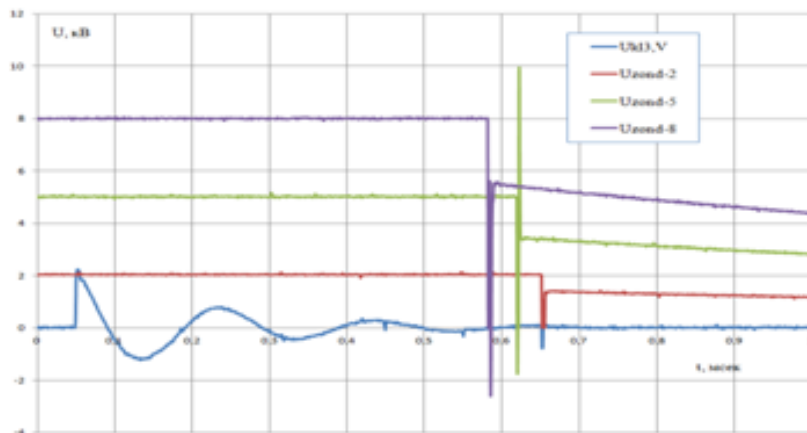


Рисунок. Осциллограммы пробоя; Uzond-2 – пробой при напряжении 2 кВ, Uzond-5 – 5 кВ, Uzond-8 – 8 кВ; Ukl3 – сигнал запуска клапана напуска.

Литература

- [1]. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: «Наука». 1992 г.
- [2]. Завалова В.Е., Козлов А.А., Козлов А.В., Карпушин Ю.В., Полищук В.П., Гусев А.Н., Шурупов М.А. //ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2025. Т. 51. № 1. с. 104–114. doi: 10.1134/S0016794019030039.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСА И РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КСПУ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Сомов К.Р., Карташева А.А., Подковыров В.Л.,
Кириллова Е.А., Климов Н.С.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

Квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ) используется для решения прикладных задач, связанных с испытаниями обращенных к плазме материалов термоядерного реактора на основе токамака [1]. Еще одним перспективным направлением применения является разработка электрореактивного двигателя (ЭРД) с повышенными значениями импульса и тяги. Исследование динамических характеристик, импульса и реактивной силы потока плазмы, генерируемого КСПУ, необходимо для оптимизации геометрии и режимов работы плазменного ускорителя с целью формирования более однородных плазменных потоков и обеспечения устойчивой работы.

Экспериментальные исследования были проведены на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе, генерирующем сверхсигнальный поток водородной плазмы с концентрацией электронов 10^{15} - 10^{16} см⁻³ и длительностью 1 мс.

В работе предложен метод измерения динамических характеристик плазменного потока на основе баллистического маятника. Метод основан на регистрации временной зависимости смещения маятника, обусловленного его взаимодействием с плазменным потоком. В качестве маятника был использован медный конус, регистрация смещения которого проводилась двумя независимыми способами: триангуляционным датчиком и высокоскоростной видеокамерой. В указанных экспериментах были проведены измерения скорости плазменного потока на основе времяпролетного метода [1] и определен спектральный состав плазменного потока.

Из полученных экспериментальных данных следует, что при среднем расходе рабочего газа $m_1 = 9,6$ мг и значениях энергии, вложенной в разряд, лежащих в диапазоне от 16.0 кДж до 49.2 кДж, значения импульса маятника изменялись от 0.33 Н*с до 0.96 Н*с, а значения реактивной силы — от 359.6 Н до 919.2 Н.

При среднем расходе $m_2 = 5,9$ мг и значениях энергии от 17.1 кДж до 56.9 кДж значения импульса маятника изменялись от 0.5 Н*с до 1.3 Н*с, а реактивная сила от 350 Н до 1250 Н. В этих условиях значения импульса, полученные на основе измерения скорости потока, находятся в диапазоне от 0.5 Н*с до 1.1 Н*с. В диапазоне энергий 17.1-33.2 кДж значения импульса маятника и значения импульса потока совпадают в пределах погрешности. При больших значениях энерговклада экспериментальные значения импульса маятника превышают значения импульса потока, полученные из измерения скорости. Этот факт может быть обусловлен вкладом продуктов эрозии электродов, движущихся в плазменном потоке, в импульс, переданный маятнику.

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 19.04.23 № Н.4к.241.09.23.1062 и Государственного контракта от 19.05.25 № Н.4к.241.09.25.1064

Литература

- [1]. Климов Н. С. и др. Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – №. 3. – С. 52-63.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КСПУ

Чернышев В.С., Гуторов К.М., Подковыров В.Л.,
Мамонов А.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, vschernyshev@triniti.ru

В АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» в рамках реализации федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» ФП-3 комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» [1] проведены работы по созданию прототипа плазменного ракетного двигателя на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ). Реализована концепция двухступенчатого КСПУ с разделением процессов предварительной ионизации рабочего тела и окончательного формирования высокоскоростного потока, что должно способствовать повышению эффективности ускорителя и увеличению ресурса электродов. В качестве первой ступени применена входная ионизационная камера (ВИК), необходимая для полной ионизации инжектируемого газа и регулирования параметров плазмы на входе ускорительной ступени.

Данная работа посвящена исследованию режимов работы входной ионизационной камеры двухступенчатого КСПУ при использовании водорода и гелия в качестве рабочего газа с целью выявить условия полной ионизации рабочего тела, определить эффективность энерговклада в разряд и его верхнюю границу, обуславливаемую эрозией электродной системы.

Анализ поведения эффективного сопротивления разряда в зависимости от удельного энерговклада позволяет выявить характерные области перехода от состояния с преобладанием омической составляющей напряжения ($\mathbf{j}/\sigma$) к состоянию с преобладанием лоренцевской составляющей ($1/c[\mathbf{u} \times \mathbf{B}]$). Оценка температуры плазмы в области минимума сопротивления для водорода на уровне 0.8 эВ

согласуется с измеренной скоростью плазменного потока 16 ± 3 км/с. Результаты позволяют рекомендовать работу ВИК с энерговкладом в диапазоне значений 2.2–2.6 кДж/мг для H_2 и 1.2–1.6 кДж/мг для He. Данные калориметрии дают значение коэффициента преобразования вложенной электрической энергии в энергию плазменного потока 65% во всем исследованном диапазоне. Полученные результаты позволяют прогнозировать электроразрядные характеристики, потребности в охлаждении и скорость эрозии для первой ступени плазменного ракетного двигателя на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1062 от 19.04.2023.

Литература

- [1]. Ильгисонис В. И. [и др.] О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 963–969.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ И ЭТИЛЕНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Трошкин Р.С., Фирсов А.А.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,
troshkinrs@gmail.com*

Ранее были проведены исследования свойств продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха [1], а также исследование возможности применения данного разряда для интенсификации горения в топливно-воздушной смеси (ТВС) [2]. Данные исследования были проведены для межэлектродного расстояния 30 мм. Было сделано предположение, что одним из ключевых факторов, влияющих на воспламенение, является длина разряда. Настоящая работа посвящена исследованию характеристик разряда, находящегося в сверхзвуковой этилено-воздушной струе, и возможности его применения для интенсификации горения.

В тестовой секции на верхней стенке устанавливается профилированный пилон для обеспечения сверхзвуковой подачи воздушно-топливной смеси в ядро сверхзвукового потока. Ниже по потоку соосно с выходным отверстием пилона устанавливается электродная конфигурация, аналогичная работе [1], но при различном межэлектродном расстоянии: 30 и 80 мм.

Проведена серия экспериментов с межэлектродным расстоянием 30 мм. Массовый расход этилена и ток разряда варьировались в диапазоне 1 – 3 г/с и 4 – 7.8 А, соответственно. Получена вольтамперная характеристика разряда. Показано, что с увеличением концентрации этилена падение напряжение на разряде увеличивается, что связано с уменьшением проводимости. Процесс воспламенения регистрировался с помощью датчиков статического давления. Показано, что наибольший прирост давления в тестовой секции достигается при расходе этилена 2 г/с и равен 200 Торр – это свидетельствует о частичном окислении топлива.

Затем была проведена серия экспериментов по воспламенению ТВС разрядом с межэлектродным расстоянием 80 мм. Ток задавался в диапазоне от 0.8 до 2 А. Эксперименты показали, что при увеличении длины разряда более чем в 2.5 раза, давление на стенке существенно растет относительно случая с отсутствием топлива. Статическое давление растет во всех точках в области струи ТВС, в которых проводились измерения. Прирост давления в отдельных точках при расходе этилена порядка 2 г/с составил 320 Торр.

Таким образом, проведено исследование свойств разряда постоянного тока в ТВС в ядре сверхзвукового потока воздуха и возможность его применения для интенсификации горения. Получено, что с увеличением концентрации этилена в смеси уменьшается проводимость плазмы. Показана возможность воспламенять сверхзвуковую ТВС в холодном сверхзвуковом потоке при низком энерговкладе. Установлено соотношение расходов воздуха и этилена в смеси, при котором отмечен максимальный рост статического давления на стенке тестовой секции.

Литература

- [1]. Troshkin R.S., Firsov A.A. // Plasma Physics Reports. 2023. V. 49. № 5. P. 640–648. DOI: 10.1134/S1063780X22601870.
- [2]. Трошкин Р С., Волков Л С., Фирсов А А. // Прикладная механика и техническая физика. 2025. № 3 (in press). DOI: 10.15372/PMTF202415541

ИЗМЕРЕНИЕ ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ИОНОВ ПРИ ВЧ- НАГРЕВЕ В ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Чан К.В., Лебединский Л.В., Григоров Н.А., Фадин Д.В.,
Федорович С.Д.

*НИИУ «Московский энергетический институт», Москва,
ChanKV@mpei.ru*

Высокочастотный разряд геликонного типа рассматривается как одно из наиболее эффективных решений для реализации безэлектродных плазменных двигателей. В отличие от традиционных методов, геликонный разряд обеспечивает высокую степень ионизации без необходимости использования электродов, что исключает их износ и увеличивает ресурс двигателя. Кроме того, такая система обладает широким диапазоном регулирования тяги и высокой энергоэффективностью, что делает её особенно перспективной для применения в долгосрочных космических миссиях, включая межпланетные зонды и спутниковые группировки [1]. На базе установки ПЛМ-М [2] была разработана система генерации высокочастотного разряда геликонного типа, 3D-модель которой представлена на рисунке 1. Магнитное поле для удержания и генерации геликонного разряда создаётся с использованием многополюсной конфигурации на основе постоянных неодимовых магнитов в сочетании с катушками соленоидов, питаемых постоянным током.

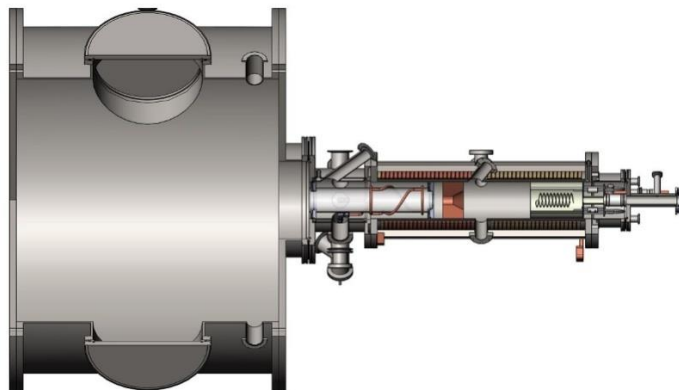


Рисунок 1. Система генерации высокочастотного разряда геликонного типа на установке ПЛМ-М

В данной работе будут представлены результаты измерения дрейфовой скорости ионов. Скорость ионов была определена с помощью зонда Маха в области истечения плазменного потока из магнитного сопла плазменной установки ПЛМ-М.

Работа выполнена при поддержке Госзадания FSWF-2025-0001.

Литература

- [1]. Andreescu, A.-M.T. et al. Development and Testing of a Helicon Plasma Thruster Based on a Magnetically Enhanced Inductively Coupled Plasma Reactor Operating in a Multi-Mode Regime. Appl. Sci. 2024, 14, 8308.
- [2]. Будаев, В. П., Федорович, С. Д., Дедов и др. Испытания вольфрамовой облицовки дивертора в плазменной установке ПЛМ [Текст] / В. П. Будаев, С. Д. Федорович, А. В. Дедов и др.// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2024. — № Том 47, выпуск 2. — С. 49-57.

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Иванова А.А.

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,
militcina.aa18@physics.msu.ru*

В работе представлены экспериментальные результаты исследования взаимодействия дифрагированной ударной волны с плазмой наносекундного комбинированного объемного разряда в воздухе при начальных давлениях 10–30 торр и числах Маха ударных волн 2.2–4.4. Особое внимание уделено анализу релаксационных процессов, происходящих в плазме после прекращения электрического тока.

Эксперименты проводились на ударной трубе с прямоугольным сечением канала 24×48 мм². Комбинированный объемный разрядс плазменными электродами, расположенными на верхней и нижней стенках канала, инициировался при импульсном напряжении 25 кВ. Длительность тока разряда не превышала 500 нс. Ионизация и протекание тока происходили непосредственно перед фронтом ударной волны. Для свечения плазмы регистрировалось электронно-оптической камерой K011 в девятикадровом режиме с временным разрешением до 100 нс, с регулируемой задержкой между кадрами. Одновременно регистрировался ток разряда.

Зафиксирована длительность объемной фазы разряда до 500–700 нс, а послесвечения поверхностных разрядов до 1.5 мкс, что превышает длительность тока и свидетельствует о протекании релаксационных процессов с послесвечением. Результаты демонстрируют необходимость учёта релаксационных процессов в микросекундном масштабе времен при анализе взаимодействия плазмы с газодинамическими возмущениями.

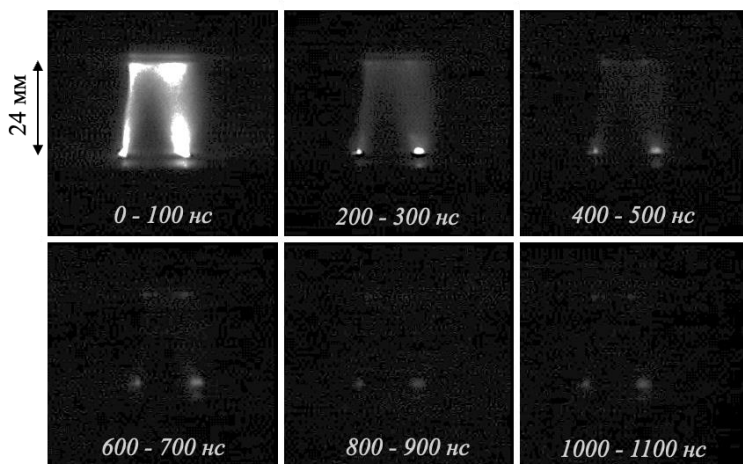


Рис. 1. Последовательность электронно-оптических изображений разряда в канале с дифрагированной ударной волной. ($M = 4.1$, $p_0 = 10$ торр).

Литература

- [1]. A. Ivanova, I. Mursenkova, I. Kryukov, I. Ivanov, I. Znamenskaya; Diffracted shock wave propagation in a pulsed volume discharge plasma. *Physics of Fluids* 1 March 2025; 37 (3): 036136. <https://doi.org/10.1063/5.0258844>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Барсук В.А., Гвоздев С.В., Михайлов А.Д., Павлов С.П.,
Саркаров Н.Э., Щедров А.С., Чернов Д.О.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

В работе исследован процесс лазерного напыления покрытий из тугоплавких металлов на предметные стёкла и стальные подложки. Тонкие покрытия из тугоплавких материалов имеют высокую температуру плавления и достаточно низкое удельное сопротивление. Они стабильны с точки зрения диффузионных процессов, протекающих на границе раздела при больших температурах [1]. Вследствие устойчивости к коррозии, покрытия из тугоплавких материалов находят применение в реакторах, работающих в особо агрессивных условиях. Также такие покрытия используются в микроэлектронике при формировании контактов, в качестве проводящих, термостабильных и барьерных слоев в системах металлизации.

В данной работе особое внимание направлено на оперативный контроль толщины пленки в процессе осаждения. Традиционные методы контроля толщины покрытий включают разрушающие техники, такие как микроскопия и механическое срезание пленки, а также неразрушающие методы — рентгеновскую и лазерную рефлектометрию [2]. Последние позволяют измерять толщину без повреждения образцов, однако требуют дорогостоящего и сложного оборудования, а также высокой квалификации обслуживающего персонала.

В этой связи актуальность представленной работы заключается в возможности оперативно определять скорость роста и структуру напыляемых покрытий в зависимости от интенсивности лазерного излучения без разрушения пленки. Используемая оптическая регистрация фототока позволяет в реальном времени контролировать

толщину покрытия непосредственно во время процесса напыления, что значительно упрощает процедуру контроля и снижает затраты на оборудование.

Экспериментально установлена линейная зависимость толщины пленки от интенсивности излучения при давлении от 10^{-3} до 0,1 Торр. Определено оптимальное расстояние между мишенью и подложкой (~29 мм), при котором достигается максимальная однородность покрытия. Результаты контроля толщины согласуются с данными оптической сдвиговой интерферометрии (интерферометр МИИ-4) и рентгеноспектрального анализа.

Предложенный подход обеспечивает повышение точности и эффективности лазерного напыления тугоплавких металлов при снижении требований к оборудованию и квалификации персонала, что важно для широкого применения в микроэлектронике и материаловедении.

Литература

- [1]. Зуев Д.А., Лотин А.А., Новодворский О.А. и др. / Импульсное лазерное осаждение тонких пленок ИТО и их характеристики // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Том 46. Вып. 3 – С. 425 – 429.
- [2]. Shen J., Gai Z., Kirschner J. Growth and magnetism of metallic thin films and multilayers by pulsed-laser deposition // Surface Science Reports – 2004. – V. 52.

МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАКЛЕПА

Карпов Н.И., Кутуков А.К., Смирнов Р.В., Пеганов Е.А.,
Панин С.Е.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, Kutukov@triniti.ru

Анализ повреждений промышленных изделий, работающих под действием нагрузок (динамических, статических и циклических) при высокой температуре в среде сгорания в процессе эксплуатации показал, что их разрушение преимущественно имеет усталостный характер. Трещины зарождаются на поверхности и при дальнейшей нагрузке развиваются вглубь, разрушая материал.

Для увеличения усталостной прочности материалов широко применяют методы поверхностно пластического деформирования (ППД). Основные характеристики распространенных и перспективных к применению методов ППД представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики методов ППД

Метод ударной обработки	Глубина воздействия	Остаточные напряжения	Точность обработки	Экологичность метода
Дробеструйная	До 0,5 мм	–100...–600 МПа	Средняя (дробь)	Пыль
Ультразвуковая	До 0,6 мм	–320...– 410 МПа	Высокая (частота)	Нет отходов
Гидроабразивная	До 1 мм	До – 1500 МПа	Высокая (струя)	Жидкость и абразив
Лазерная	До 2 мм	–200...–800 МПа	Высокая (лазер)	Нет отходов

Метод лазерной ударной обработки (ЛУО) среди рассмотренных методов наименее изучен и практически не представлен в России в промышленности по причине отсутствия материально технической базы. В работе представлен созданный технологический комплекс для ЛУО, в основе которого находится лазерная система с активными элементами из фосфатного стекла, легированного неодимом. В данном лазере применен четырехпроходный усилитель с обращением волнового фронта. Помимо этого, комплекс оснащен средствами диагностики параметров лазерного излучения в реальном времени и системой позиционирования образцов. В итоге, из лазерной системы выходит излучение диаметром 40 мм, определённом на уровне $1/e^2$ с длиной волны 1054 нм, энергией в пределах 10-50 Дж, длительностью импульса 10-20 нс и равномерным пространственным распределением интенсивности. В дальнейшем, при обработке изделий лазерный пучок фокусируется до размеров порядка 5-12 мм, что позволяет достигать плотности мощности в пучке 1-10 ГВт/см².

Работа выполнена в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии»: государственный контракт № Н.4к.241.09.23.1058 от 17.04.2023.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ INGAAS-ФОТОДИОДОВ

Белик К.Д., Короннов А.А.

РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва, tumanov-aa@rudn.ru

В подавляющем большинстве дальномерных систем применяются лавинные или р-і-п фотодиоды на основе материалов Si, Ge, InGaAs. На сегодняшний день хорошо изучены механизмы деградации лавинных фотодиодов [1], и в меньшей степени – р-і-п фотодиодов, хотя в последние годы прослеживается тенденция к росту их применения в таких системах. В частности, одним из типов таких фотодиодов является $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ обратный р-і-п фотодиод, для которого в настоящей работе теоретически определено значение пороговой плотности мощности засветки на длине волны 1,535 мкм.

Теоретическое определение порогового уровня интенсивности, превышение которого приводит к нагреву материала до температуры плавления, было проведено на основании решения уравнения теплопроводности. Уравнение теплопроводности для случая лазерного нагрева материала запишется следующим образом:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho * c(T)} * \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho * c(T)} * \frac{P(t)}{S} * (1 - R) * \alpha * \exp(-\alpha * z),$$

Температурные зависимости удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности λ были получены на основании данных, представленных в [2, 3], и аппроксимированы выражениями:

$$c(T) = c_{p\text{InAs}}(T) * 0,53 + c_{p\text{GaAs}}(T) * 0,47$$

$$\lambda(T) = 4,8 * \left(\frac{T}{300} \right)^{-1,17}$$

Решение уравнения теплопроводности искалось численным методом для случая отсутствия теплообмена кристалла с окружающей средой.

В результате было получено, что воздействие с плотностью мощности $18,21 \times 10^6$ Вт/см², обеспечиваемое колоколообразным оптическим импульсом длительностью 8,6 нс, радиусом пучка 56,46 мкм по уровню 1/е и пиковой мощностью $P = 1824$ Вт, приводит к нагреву поверхности чувствительной площадки р-і-п фотодиода до температуры 1373,19 К. Начиная с этого значения плотности мощности, становится возможным процесс плавления $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Опираясь на результаты исследований деградации фотодиодов [1], достижение материалом температуры плавления по окончании засветки приводит к рекристаллизации его активного слоя и росту неоднородностей в его объеме.

Литература

- [1]. Короннов А.А., Зверев Г.М., Землянов М.М. // Прикладная физика. – 2015. – № 4. – С. 54–58.
- [2]. Passler R. // AIP ADVANCES. – 2013. – № 3. – С. 1–34.
- [3]. Хорунжий И.А., Доманевский Д.С., Малышев С.А. // Труды БГТУ. – 2013. – №6. – С. 72–75.

УДЕРЖАНИЕ МИКРОЧАСТИЦ ЛИНЕЙНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКОЙ С ПОТЕНЦИАЛОМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Доброклонская М.С., Василяк Л.М., Печеркин В. Я.,
Владимиров В.И.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,
m.dobro42@gmail.ru*

Линейные квадрупольные электродинамические ловушки с гармонической формой удерживающего потенциала получили широкое применение для захвата и удержания заряженных микрочастиц как в вакууме, так и при атмосферном давлении воздуха. Мы впервые применили прямоугольный потенциал для удержания заряженных микрочастиц в воздухе при атмосферном давлении, провели сравнение удержания заряженных диэлектрических частиц микронного размера в ловушке при гармоническом и знакопеременном импульсно-периодическом напряжении прямоугольной формы и обнаружили, что частицы лучше удерживаются при прямоугольном потенциале. Для гармонического напряжения для воздействия на удерживаемые частицы можно изменять только амплитуду и частоту, а в случае импульсов напряжения прямоугольной формы дополнительными изменяемыми параметрами являются: разные длительности положительного и отрицательного импульса при сохранении общей длительности периода постоянной, а также разные амплитуды импульсов положительной и отрицательной полярности. Экспериментально исследованы и рассчитаны траектории заряженных частиц для различных значений коэффициента заполнения положительной полярности импульса напряжения прямоугольной формы. Получены диаграммы устойчивости заряженных микрочастиц для прямоугольного сигнала с разными коэффициентами.

Обнаружена возможность диагностики знака заряда микронных частиц, удерживаемых в линейной электродинамической квадрупольной ловушке с удерживающим потенциалом в виде

знакопеременных прямоугольных импульсов при разном коэффициенте заполнения, по траектории их движения в воздухе при атмосферном давлении. При уменьшении коэффициента заполнения менее 50% или при его увеличении более 50% меняется диагональ наклона траектории микрочастиц с фиксированным знаком заряда. При изменении знака заряда частицы – диагональ, вдоль которой колеблется частица, меняется на перпендикулярную. Вид и изменение направления траекторий, полученные в расчетах, согласуются с результатами экспериментов.

САМОСОГЛАСОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В НАПРАВЛЕННОМ ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ: ОТ МИКРОУРОВНЯ К КОЛЛЕКТИВНЫМ ЭФФЕКТАМ

Колотинский Д.А.^{1,2}, Тимофеев А.В.^{1,2,3}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*НИУ «Московский физико-технический институт», Москва*

³*НИУ «Высшая школа экономики», Москва*

Пылевая плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий микроскопические частицы конденсированного состояния, которые, попадая в плазму заряжаются. Эти системы характеризуются сложными структурными и динамическими свойствами: пылевые частицы способны самоорганизовываться в упорядоченные структуры, претерпевать переходы, сопровождающиеся неустойчивостями, а распределение их средних кинетических энергий может существенно отклоняться от равномерного. В наземных газоразрядных экспериментах ключевую роль играет направленный поток плазмы, который существенно влияет на условия зарядки и межчастичного взаимодействия. В таких условиях аналитические методы становятся недостаточными, особенно при наличии кластеров частиц, что требует новых численных подходов.

В настоящей работе разработана самосогласованная численная модель, учитывающая влияния плазмы на характер взаимодействия пылевых частиц и их зарядку [1]. Модель реализована в виде высокопроизводительного кода OpenDust, ускоренного на графических процессорах [2]. Это позволило впервые провести многомасштабное моделирование кластеров пылевых частиц с учётом отклика окружающей плазмы.

Созданный инструмент даёт возможность исследовать свойства упорядоченных структур в неравновесной плазме, в частности — поведение частиц, смещающихся под действием флуктуаций относительно положений равновесия. В работе выполнена

систематическая классификация наблюдаемых эффектов в таких структурах — неравномерного распределения кинетических температур, их локализации появления обратных потоков энергии — с использованием формализма неэрмитовой физики. Показано, что они могут быть естественно интерпретированы через свойства неэрмитовой матрицы переноса, описывающей отклик колебательной системы в контакте с ланжевеновским термостатом. Полученные результаты демонстрируют применимость концепций открытых неэрмитовых систем для описания поведения пылевых структур в направленном потоке плазмы.

Литература

- [1]. Kolotinskii D., Timofeev A //Computer Physics Communications. – 2023. – Т. 288. – С. 108746.
- [2]. Kolotinskii D. A., Timofeev A. V. //Russian Supercomputing Days. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – С. 276-289.
- [3]. Kolotinskii D. A., Timofeev A. V. //Physical Review E. – 2025. – Т. 111. – №. 1. – С. 014132.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА В КСЕНОНЕ И В ИОДЕ

Елисеев С. И.

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, step.eliseev@yandex.ru*

В последние годы низкотемпературная плазма иода рассматривается как перспективная альтернатива ксенону для электрореактивных двигателей спутников. Иод дешевле, проще в хранении и не требует баллонов высокого давления, что особенно актуально на фоне роста спроса и ограниченности запасов ксенона [1]. Однако высокая химическая активность иода вызывает коррозию материалов катодов-нейтрализаторов, что остаётся серьёзной технической проблемой, особенно для мощных двигателей. Ведутся активные поиски устойчивых материалов (например, углерод, LaB₆, C12A7), но достижение их долговременной работоспособность в иодной среде требует дальнейших исследований [2].

Хотя иод и ксенон схожи по атомной массе, потенциалу ионизации и сечениям столкновений, их плазменные свойства существенно различаются из-за электроотрицательности и молекулярной природы паров иода. Однако влияние ключевых особенностей иода - его электроотрицательности и молекулярной природы - сложно предсказать без строгого анализа и численного моделирования.

В работе представлены результаты численного исследования положительного столба разряда постоянного тока в ксеноне и иоде при условиях, близких к условиям работы газоразрядных нейтрализаторов в плазменных двигателях. Использована одномерная самосогласованная численная модель на основе гидродинамического подхода с дрейф-диффузионным приближением для потоков заряженных частиц. Сравнительный анализ выявил существенные различия в свойствах разряда между ксеноном и йодом, связанные с высокой электроотрицательностью плазмы иода. Предложен метод снижения

электроотрицательности с помощью лазерного фотоотлипания, проанализировано его влияние на свойства иодной плазмы.

Литература

- [1]. P. Dietz, W. Gärtner, Q. Koch, P. E. Köhler, Y. Teng, P. R. Schreiner, K. Holste, and P. J. Klar, “Molecular propellants for ion thrusters,” *Plasma Sources Sci. Technol.* 28, 084001 (2019).
- [2]. P. S. Becke, N. G. Kottke, M. Vaupel, N. Kutufa, M. Tajmar, and F. G. Hey, “Review on the current state of iodine compatible neutralizers,” *J. Electr. Propul.* 3, 1 (2024).

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СОЧЛЕНЕНИЯ СТЕКЛА И МЕТАЛЛА В ПЛАЗМЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Гуркова Т.В., Сясько А.В., Голубовский Ю.Б.

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, tatyana.gurkova@list.ru*

В настоящее время исследование свойств газоразрядной плазмы имеет большое значение для развития различных плазменных технологий в области лазерной физики, энергетики, медицины и промышленности. Широко применяемые подходы к изучению физических процессов в плазме, основанные на гидродинамическом или кинетическом приближениях, сталкиваются с существенными затруднениями при анализе сложных геометрий, особенно в областях сочленения плазмы, стеклянной изоляции и металла.

В данной работе демонстрируется возможность применения модели проводящей жидкости для описания тлеющего разряда в гелии и аргоне с целью исследования картины протекания тока в стеклянной газоразрядной трубке с металлическими сегментами. Подобные конструкции применяются в лазерной физике.

В среде программного пакета Comsol Multiphysics было проведено моделирование подобной конфигурации стеклянной трубки с дополнительной металлической вставкой. Определение распределений электрических полей и скачков потенциала на границах металл-стекло в рамках одножидкостной модели контролировалось заданием проводимости вещества, как функции зависящей от радиуса трубки и константы проводимости на оси, определённой для приведённого давления $pR = 1$ Торр * см и тока $i = 100$ мА. В рамках модели представляется возможным описать не только формирование радиальных распределений потенциала, электрического поля и плотности разрядного тока, но и слоёв объёмного заряда. Включение в модель модуля, содержащего уравнение теплопроводности, позволило получить картину полей температур, устанавливающихся в результате протекания тока.

Проведение анализа теплового баланса подобных конфигураций разрядных трубок представляется чрезвычайно полезным в поиске решения проблемы эффективного охлаждения лазерных установок. Результаты моделирования сопоставлены с ранее полученными результатами, представленными в работах [1, 2].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, грант РНФ №22-72-10004.

Литература

- [1]. Siasko A. V., Balabas M. V. & Golubovskii Yu. B. About the current flow in a discharge tube with a metal section. I-model of a conductive liquid. *Physica Scripta* (2022). 98.
- [2]. Siasko A. V., Gurkova T. V., Balabas M. V. & Golubovskii Yu. B. About the Current Flow in a Discharge Tube with a Metal Section. Analysis of the Thermal Balance. *Plasma Physics Reports* (2024). 50.

ГЕЛИОН: ДОБЫЧА ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ НА ЛУНЕ

Мочалов Г.А.^{1,2}, Барышников М.Е.¹, Каравасилиади А.А.¹

¹*МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, goshatt@list.ru*

²*ООО "Экопирилиз", Тверь*

Гелий – второй элемент таблицы Менделеева, а также самый легкий инертный газ. Его изотопы имеют широкое применение в различных областях науки и техники: ускорители, термоядерные реакторы, криогенно-вакуумная техника, очистка и сепарация веществ, медицина и многое другое [1]. В целом гелий – это вещество нынешних и перспективных технологий, однако его производство не поспевает за растущим спросом. Для решения данной проблемы мы предлагаем рассмотреть вариант добычи изотопов гелия из лунного реголита.

Прежде чем организовывать работы по получению гелия из грунта Луны, необходимо провести широкие геологоразведывательные работы для определения его распространенности и концентрации на нашем естественном спутнике [3], а также проверить на практике способы извлечения гелия из поверхности. В данной работе мы представляем оригинальный вариант аппарата для анализа и добычи гелия. В основе метода получения гелия – нагрев реголита с использованием СВЧ-установки [4]. Рассматривается два варианта СВЧ установки: 1) с использованием магнетрона; 2) СВЧ-плазмотрон.

Предлагаемые в данной работе исследовательская установка и аппарат для добычи применимы для извлечения газообразных веществ из поверхности Луны, что делает актуальным разработку и создание этих устройств «в железе» уже в ближайшее время.

Литература

- [1]. Гелий и основные способы его получения: учебное пособие / Н.А. Лавров, А.М. Балан. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022.
- [2]. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. — Москва: Академия наук СССР, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 1975.
- [3]. Богачева, М.Н. Оценка эффективности развития глобальной энергетики на базе использования луны ресурсов «Гелий-3». // Труды МАИ. — 2020. — Выпуск № 38. [Электронный ресурс]. — URL: <https://eandc.ru/news/detail.php?ID=23606>.
- [4]. Устройства СВЧ: учебное пособие / под ред. Сазонов, Д.М. — М.: Высшая школа, 1981.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ

Булава А.С., Фролов А.М., Шейндлин М.А.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Сверхтугоплавкие керамики представляют собой класс соединений с характерными температурами плавления свыше 3000К. Данные материалы имеют высокий потенциал для применения в аэрокосмической [1] и ядерной [2] отраслях, что обусловлено их высокой устойчивостью к воздействиям высоких плотностей энергии. Особый интерес могут вызывать высокоэнтروпийные карбидные системы, которые обладают не только рекордными температурами плавления, но и выдающимися механическими свойствами. Однако на практике применение указанных систем невозможно из-за дефицита экспериментальных данных об их теплофизических свойствах, в частности – о температуре плавления. Получение этих данных представляет фундаментальную важность для достоверного моделирования поведения материала.

Экспериментальное исследование параметров плавления и оптических свойств свертугоплавких керамик обычно осуществляется при помощи комбинации лазерного нагрева и различных методов оптической диагностики [3]. Многоканальную пирометрию можно считать единственным методом определения истинной температуры и излучательной способности поверхности материалов в экспериментах с лазерным нагревом.

Однако ключевой проблемой при проведении экспериментов с быстрым лазерным нагревом остаётся фиксация момента перехода точки солидуса, что требует реализации дополнительных оптических методов. В рамках настоящей работы предлагается метод анализа видеоизображения поверхности материала с целью обнаружения подвижных областей, которые можно считать индикаторами начала плавления.

Применение этих методов позволило впервые изучить параметры плавления двух свертугоплавких высокоэнтропийных карбидов (Ta-Zr-Hf-Nb-C и Ta-Hf-Zr-Nb-Ti-C), а также получить их оптические характеристики.

Литература

- [1]. Harrington T., Gild J. [et al.]. Phase stability and mechanical properties of novel high entropy transition metal carbides // Acta Mater. 2019. V.166, P. 271-280.
- [2]. Katoh Y., Vasudevamurthy G. [et al.]. Properties of zirconium carbide for nuclear fuel applications // J. Nucl. Mater. 2013. V.441(1). P.718-742
- [3]. Bgasheva T., Sheindlin M., Vervikishko P. [et al.]. Laser-pulse melting of calcium oxide and some peculiarities of its high-temperature behavior // J. Am. Ceram. Soc. 2021. V.104(7). P.3461-3477

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАВЛЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ

Павловский Н.С.^{1,2}, Кунцевич А.Ю.²

¹НИУ «Московский энергетический институт», Москва,
PavlovskyNS@mpei.ru, nekoternum@gmail.com

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва,
alexkun@lebedev.ru

Для создания микроструктур на основе слоистых двумерных материалов требуется травление. Поскольку жидкое травление в слоистых материалах анизотропно, основу технологии составляет сухое травление. Плазмохимическое травление (ПХТ) включает в себя многочисленные химические реакции энергетических частиц плазмы с материалом на его поверхности. Диссоциация молекул в плазме обеспечивает образование химически активных радикалов. При соответствующем выборе исходных веществ на поверхности обрабатываемого материала образуются летучие соединения, удаляемые при откачке [1].

Плазменные процессы широко используются в технологии микро- и нанoeлектроники. Большой интерес в этой области представляет ПХТ в плазме с высокой химической активностью частиц – фторсодержащей, как SF_6 . К достоинствам ПХТ можно отнести высокие скорости травления, селективность [2]. Как правило, установки для плазмохимического травления дороги, поскольку ориентированы на промышленные требования. В данной работе разрабатывается травление в самодельной установке с компактной камерой, которое подходит для лабораторных образцов подложек малого размера.

Для исследования режимов травления в SF_6 разных диэлектриков были выбраны синтетические образцы нитрида бора, а также природные минералы – слоистые аллюмосиликаты тальк и слюда, вивианит и аурипигмент. Чешуйки данных материалов переносились на кремний, их линейные размеры не превышали

нескольких сот микрон. Травление проводилось на плазменной установке Центра сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН, обеспечивающей генерацию плазмы газа-реагента. Наблюдения за скоростью травления и геометрией проводились при помощи атомно-силового микроскопа C3M Solver PRO и микроскопа Olympus BX51, с приставкой EnSpectr для in-situ спектроскопии комбинационного рассеяния.

В ходе выполнения работы были получены спектрометрические данные и скорость травления при различных значениях мощности, давлении и скорости подачи газа.

Литература

- [1]. Ивановский Г.Ф. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986 – Т.1, №1. – 232 с.
- [2]. ИСОИ РАН. Исследование технологических режимов травления пленок и подложек из неорганических материалов. –2018. – Т.1, №1. – 92 с.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ

Рукина Ю.И., Обрезков О.И., Мартыненко Ю.В.,
Шевчук С.Л.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, rukina_yi@nrcki.ru

В лаборатории ЛТНП НИЦ КИ ведутся научно-исследовательские работы, направленные на создание покрытий, перспективных для применения в качестве покрытий электродов электрокардиостимуляторов (ЭКС) [1].

Разработка технологии осаждения тонкопленочных функциональных покрытий для электродов ЭКС проводится на разработанной в ЛТНП вакуумной технологической установке «Микромед», техническая оснащенность которой позволяет в широком диапазоне варьировать параметры процесса осаждения покрытий. Откачная система позволяет проводить процессы осаждения в диапазоне давления $10^{-2} \div 10$ Па. Для осаждения покрытий используются планарный магнетрон, работающий на постоянном токе, и модуль пучково-плазменных технологий, состоящий из 3-х импульсных дуговых испарителей (каждый из которых позволяет формировать тонкопленочный слой со скоростью до 15 нм/мин на расстоянии 320 мм) и источника ионов металлов «Сокол-Мини». Вакуумная очистка подложек выполняется пучком ионов аргона, формируемым источником ионов с замкнутым дрейфом электронов или в плазме тлеющего разряда, стимулированного радиочастотным излучением. Планетарная карусель, которая в совокупности со специализированной оснасткой позволяет наносить покрытия одновременно на 1000 кардиоэлектродов, снабжена ленточным нагревателем, датчиком температуры и возможностью подачи электрического смещения для регулирования энергии ионов в ходе технологического процесса.

Одним из перспективных покрытий для электродов ЭКС являются модифицированные платиной тонкие пленки нитрида титана с развитой поверхностью, которые обеспечивают наряду с эффективной стимуляцией сокращений сердечной мышцы и снижением энергопотребления батареи ЭКС вследствие большой ёмкости двойного электрического слоя (ДЭС) [2] и малого импеданса, повышение коррозионной стойкости и стабильности электрохимических параметров на протяжении ресурсного срока эксплуатации [3].

Сравнительный анализ полученных покрытий проводился на основе результатов исследования электрохимических свойств методом импедансной спектроскопии и ресурсных испытаний прототипов электродов. Обратимость электрохимических реакций, сопровождающих протекание электрического тока через образец, контролировалась по виду циклических вольтамперных характеристик тестируемых образцов покрытий.

Литература

- [1]. Обрезков О.И., и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, С 98-110
- [2]. Н. Specht // Proceedings of the Materials and Processes for Medical Devices Conference 2006, P. 169-173
- [3]. Norlin A., et al. //Journal of the Electrochemical Society.2004. – Т. 152. – №. 2. – С. J7

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА

Синайский М.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В.,
Кирпичёв Д.Е., Асташов А.Г., Фадеев А.А., Дорофеев А.А.

*Институт металлургии и материаловедения РАН им А.А. Байкова,
Москва, ms18@mail.ru*

Материалы и наноматериалы на основе вольфрама в настоящее время являются основными кандидатами для изготовления элементов конструкции термоядерного реактора, в частности передней стенки реактора, имеющей непосредственный контакт с высокотемпературной плазмой, и элементов радиационной защиты оборудования, управляющего работой реактора. Материалы на основе вольфрама, в особенности бориды вольфрама, обеспечивают эффективную защиту от гамма-излучения и потоков нейтронов и рассматриваются как перспективные материалы в новых системах радиационной защиты в создаваемых термоядерных установках.

Данная работа направлена на реализацию процессов получения в термической плазме электродугового разряда нанопорошков композиций на основе вольфрама, используемых для создания нанокompозитов в виде сферических частиц с размером 20-50 мкм, предназначенных для создания объемных материалов и покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, в том числе для аддитивных технологий.

Синтез нанопорошков был реализован на плазмохимической установке, защищенной патентом РФ № 2311225, с использованием электродугового плазмотрона мощностью до 25 кВт в реакторе с ограниченным струйным течением. В ходе проведения экспериментальных исследований было осуществлено получение наноразмерных порошков композиций на основе вольфрама с различной растворимостью компонентов (W, W-Ni-Fe, W-Cu, W-Y₂O₃, W-B и др.) в потоке Ag-H₂ или N₂-H₂ плазмы. В качестве исходного сырья

использовались соответствующие оксиды и соединения: WO_3 , NiO , Fe_2O_3 , $\text{Y}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$, WCl_6 , BCl_3 в необходимых смесях и пропорциях.

Установлены закономерности формирования композитного нанопорошка в потоке термической плазмы и определены параметры и условия проведения плазмохимического синтеза, при которых достигается полное превращение исходных реагентов в целевые продукты с равномерным распределением элементов (Ni/Fe , Cu , Y_2O_3 и V) в получаемом композитном нанопорошке на основе вольфрама (W , W-Ni-Fe , W-Cu , $\text{W-Y}_2\text{O}_3$, W-V). Определено влияние основных параметров процесса, включающих состав и энтальпию плазменной струи, расход и дисперсности исходного сырья, а также технологических особенностей процесса на физико-химические свойства получаемого нанопорошка (дисперсный, фазовый и химический состав).

При совместной конденсации паров получаемых компонентов в плазмохимическом процессе синтеза нанопорошковых композиций достигается равномерное осаждение и распределение более легкоплавких компонентов (Ni-Fe , Cu , Y_2O_3 , V и W-V) на поверхности наночастиц вольфрама, что детально исследовано с помощью методов электронной микроскопии с элементным микроанализом.

В результате многостадийного преобразования синтезированных композиционных нанопорошков (при их грануляции и последующей плазменной обработке) получены сферические микропорошки, из которых методом послойного лазерного сплавления изготовлены образцы для будущих испытаний на свойства радиационной защиты. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00112-П.

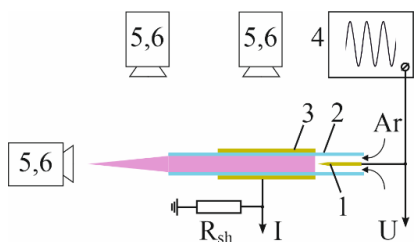
ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ВОЛН В КОАКСИАЛЬНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ, ВОЗБУЖДАЕМОМ СИНУСОИДАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Медведев М.А.^{1,2}, Акишев Ю.С.^{1,2}, Ермолаева С.А.²,
Петряков А.В.¹

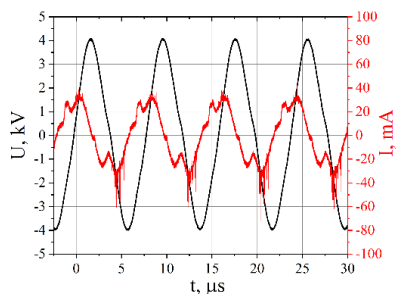
¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, petryakov@triniti.ru

²НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва

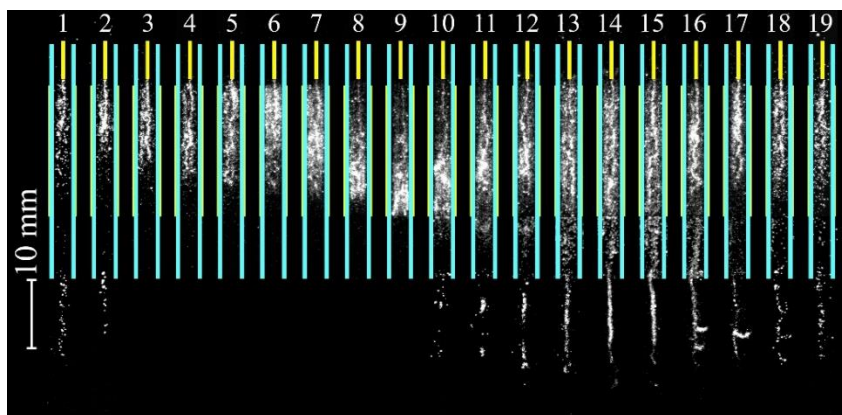
В литературе, посвященной исследованию коаксиального барьерного разряда, обычно исследуют динамику плазменных структур в плазменной струе в отрыве от выяснения динамики плазменных структур, формирующихся в зоне разряда. В то же время, именно плазменные структуры в зоне разряда формируют структуры в плазменной струе, т.е. вне зоны разряда. В данной работе показано, что динамика плазменных структур в зоне разряда обусловлена зарождением у высоковольтного электрода поверхностных ионизационных волн, распространяющихся к выходу из зоны разряда и далее по плазменной струе. На рис.1 представлены схема барьерного разряда, осциллограммы его тока и напряжения и набор кадров, показывающих динамику развития поверхностных ионизационных волн вплоть до формирования стримера в плазменной струе.



а)



б)



в)

Рис. 1. а) Схема коаксиального барьерного разряда; б) осциллограммы тока и напряжения разряда; в) набор фотографий, показывающих динамику развития в разряде поверхностных ионизационных волн, формирующих плазменную струю.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 24-45-20006)

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ПЛАЗМЕННОМ РЕЗОНАНСЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Синцов С.В., Гильденбург В.Б., Водопьянов А.В.,
Глявин М.Ю.

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, sins@ipfran.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований существенно неравновесных разрядов, поддерживаемых при высоком (порядка атмосферного и выше) давлении непрерывным миллиметровым излучением, генерируемым гиротронами с частотами 24 и 263 ГГц. Их изучение представляет интерес в связи с возможными применениями в неравновесной плазмохимии. Ключевой особенностью таких разрядов является возможность реализации условий слабо столкновительного режима поддержания. С учетом термического нагрева, частота электрон – нейтральных столкновений ν_{en} оказывается на 1 – 2 порядка меньше угловой частоты поля ω . Это обуславливает возможность возбуждения сильного плазменного резонанса: в окрестности точки критической плотности компонента электрического поля, параллельная градиенту электронной плотности, возрастает в ω/ν_{en} раз и возникает резонансное поглощение энергии СВЧ поля [1]. Свойства образующейся при этом плазмы весьма благоприятны для плазмохимии, способствуя сильной неравновесности как в области резонансного усиления поля, так и в окружающем плазменном ореоле.

В экспериментальном плане для имеющихся источников миллиметрового излучения были разработаны оптимизированные конфигурации плазмотронов и изучены свойства создаваемых в них стационарных неравновесных разрядов в потоке газа. Для излучения с частотой 24 ГГц была создана газоразрядная система волноводного типа, применение которой обеспечивает высокую (до 90%) эффективность использования энергии электромагнитного поля. Для

гиротрона с частотой 263 ГГц был разработан специализированный «гибридный плазмотрон», представляющий собой коническую волноводную секцию с квазиоптическим вводом миллиметрового излучения [2]. С использованием обоих типов разряда на примерах задач фиксации атмосферного азота и деструкции углекислого газа продемонстрирована возможность проведения неравновесного плазмохимического синтеза. Показано, что в достигнутых неравновесных условиях выход целевого продукта может кратно превышать его равновесные значения, соответствующие газовой температуре в плазме.

Работа выполнена в рамках государственного задания FFUF-2022-0007.

Литература

- [1]. Gildenburg, V.B., Golubev, S.V., Gospodchikov, E.D., Sintsov, S.V., Vodopyanov, A.V. // Phys. Plasmas, 2024, 31(2), 023507.
- [2]. Sintsov, S.V., Vodopyanov, A.V., Mansfeld, D.A., Fokin, A.P., Ananichev, A.A., Goryunov, A.A., Preobrazhensky, E.I., Chekmarev, N.V., Glyavin, M.Yu.. // J Infrared Milli Terahz Waves, 2024, 45, 454–465.

ПЛАЗМЕННАЯ АКТИВАЦИЯ ДЕИОНИЗИРОВАННОЙ ВОДЫ АТМОСФЕРНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМОЙ СВЧ ФАКЕЛА: УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Жуков В.И.¹, Сергейчев К.Ф.¹, Гудкова В.В.¹,
Зими́на М.А.²

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
zhukov.seva@yandex.ru*

²*РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва*

Представлена система плазменной активации деионизированной воды (ПАВ) СВЧ-плазмой аргона с продуванием вокруг факела азота в качестве буферного газа ($P \approx 1.2$ кВт, $f = 2,45$ ГГц, расход аргона 5 ст. л/мин, азота 3 ст. л/мин) [1]. Давление аргона и азота в камере реактора поддерживалось выше $p_{\text{атм}}$, препятствуя попаданию воздуха. Внутри камеры на подвижном столе закреплена кювета из нержавеющей стали, куда помещалась обрабатываемая вода в объеме 450 мл. Кювета охлаждается водой. Изменяя расстояние d от сопла до воды в диапазоне 83–23 мм и время активации 10–90 мин, получены образцы ПАВ, различающиеся по концентрации долгоживущих реактивных форм кислорода (ROS) и азота (RNS), которые могут найти применение в медицине, биологии и в сельском хозяйстве [2].

Были получены спектры излучения факела в диапазоне 200–800 нм в трех координатах по длине факела: у сопла, в середине и на конце. Измерения проводились для случая факела в пустой камере и при наличии обрабатываемой воды. Во втором случае при взаимодействии плазмы или направленного горячего потока газа возникает испарение воды в поверхностном слое.

Измеряемые после обработки концентрации пероксида и нитрит-/нитрат-ионов лежат в диапазоне: H_2O_2 $10 \div 300$ μM , NO_2^- $0 \div 2200$ μM , NO_3^- $100 \div 6000$ μM . Подробно исследовано два режима, когда факел находится на расстоянии от поверхности воды $d = 73$ мм и когда факел был в контакте с водой. В первом режиме формируется

более «мягкая» ПАВ: так, при обработке в течение 45 мин удастся получить устойчивую концентрацию $\text{NO}_2^- \approx 2000 \text{ }\mu\text{M}$ с временем полураспада 22 ч, H_2O_2 25 μM и NO_3^- 250 μM при $\text{pH} \approx 3.2$. За 7 суток нитриты окисляются и полностью переходят в нитраты. Контактный режим позволяет получить устойчивую ПАВ: оптимальное время обработки (для объема 450 мл) 20 мин характеризуется максимальной концентрацией H_2O_2 300 μM и относительно большой NO_3^- 1600 μM с $\text{NO}_2^- \approx 0 \text{ }\mu\text{M}$ при $\text{pH} \approx 2.8$. Первые 40 ч концентрация H_2O_2 падает до 150 μM , а NO_3^- растет до 2000 μM и далее на протяжении 120 ч их концентрации меняются незначительно.

Таким образом, варьируя расстояние факела и время экспозиции, можно целенаправленно формировать химический профиль плазмоактивированной воды под задачи сельского хозяйства, биологии и медицины без добавления внешних реагентов.

Литература

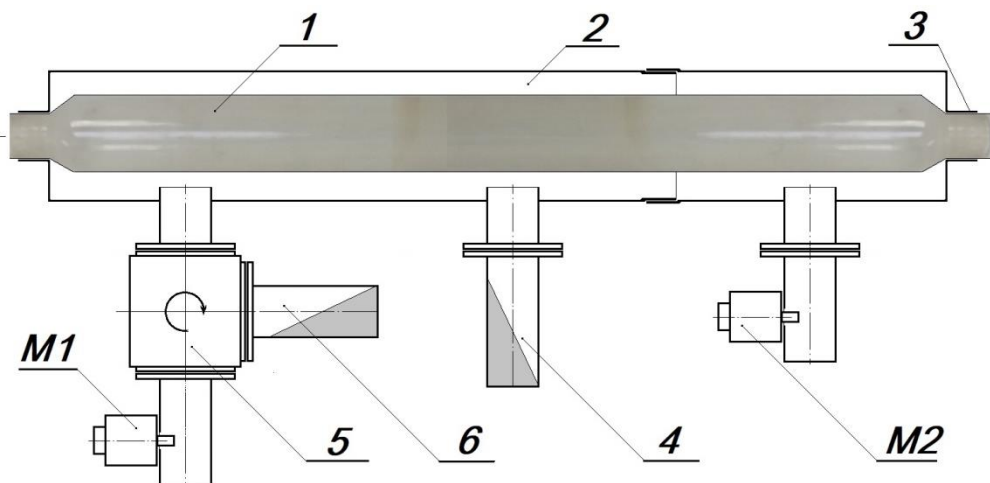
- [1]. Sergeichev K.F., Lukina N.A., Sarimov R.M, Smirnov I. G., Simakin A.V., Dorokhov A.S., Gudkov S.V. Front. Phys., 2021, v. 8, article 614684.
- [2]. Сергейчев К.Ф., Лукина Н.А., Апашева Л.М., Овчаренко Е.Н., Лобанов А.В. Химическая физика, 2022, том 41, № 1, с. 60–65.

СВЧ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ФОРВАКУУМНОЙ ПЛАЗМЕ

Тихонов А.В., Иванов И.А., Тихонов В.Н.

НИИ «Курчатовский институт» - ВНИИРАЭ, Обнинск, ti@list.ru

Представляемая установка предназначена для плазмохимической модификации свойств дисперсных материалов в форвакуумной плазме микроволнового разряда. Основу конструкции установки составляет кварцевый реактор 1, помещенный аксиально в цилиндрическом резонаторе 2 с тремя волноводными узлами связи (см. Рис.). Расположение каждого узла связи было выбрано в результате оптимизации электромагнитной модели, построенной с помощью программы Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) [1]. Реактор 1 представляет собой кварцевую трубку диаметром 65 мм, длиной около метра, с внутренним ребрением, концы реактора заужены до диаметра 38 мм. Диаметр цилиндрического резонатора 2 составляет 115 мм, он выполнен из нержавеющей стали. На торцах резонатора имеются запредельные патрубки 3 с внутренним диаметром 40 мм для прохода зауженных концов реактора. При вращении реактора происходит многократное просыпание обрабатываемого дисперсного материала через область газового разряда.



При включении СВЧ генератора М1 происходит развитие микроволнового разряда в разреженной газовой среде реактора 1. Образующаяся в результате плазма заполняет практически весь объем реактора и в этом случае резонатор представляет собой хорошо согласованную нагрузку по отношению к каждому из трёх узлов связи. После этого может быть запущен и второй генератор М2 - для повышения уровня СВЧ мощности в резонаторе. В отсутствие разряда в резонаторе устанавливается режим бегущей волны от узла связи М1 к узлу связи согласованной нагрузки 4. В случае наличия сильных отражений, дополнительная защита генератора М1 осуществляется циркулятором 5 с балластной нагрузкой 6.

В настоящее время изготовлен рабочий макет устройства, проведены успешные опыты с аргоновой плазмой в форвакуумном диапазоне давлений порядка 100-150 Па.

Литература

[1]. High Frequency Structure Simulator - user's guide // [Электронный ресурс] <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ КАПЛЯМИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ПЛАЗМОЙ УСТАНОВКИ ПЛМ

Аристов А.И., Федорович С.Д., Дедов А.В.

*НИИ «Московский энергетический институт», Москва,
AristovAI@mpei.ru*

Использование жидких металлов в качестве материалов внутрикамерных компонентов (ВК) термоядерных реакторов – одно из перспективных решений проблемы взаимодействия плазма-стенка, когда возникает риск эрозии материалов под действием плазмы [1]. Жидкометаллические внутрикамерные компоненты в токамаках и других термоядерных установках предлагается использовать в виде капельного потока или струй жидкого металла в приповерхностную плазму. При инжекции потока капель жидкого металла в плазму отсутствуют условия замыкания токов через капельный поток, что выгодно отличает схему от иных схем.

Для прогноза динамики инжектированных капель в плазме и выбора параметров экспериментального наблюдения проведено моделирование траектории движения падающей в плазму капли в зависимости от ее заряда. Результаты моделирования использовались для анализа результатов эксперимента.

При моделировании предполагалось отсутствие испарения материала с поверхности капли при ее движении в плазме, что соответствует условиям невысокой тепловой нагрузки на каплю в экспериментах на ПЛМ [2].

В ходе экспериментов на ПЛМ проводилось наблюдение движения капель в гелиевой плазме была проведена при различных параметрах плазмы.

При падении в вакууме (без плазмы) капли имели вытянутую форму в виде цилиндра. При движении через плазму капли приобретали электрический заряд и под действием электрического поля в плазме (формируемого током между катодом и анодом)

траектория отклонялась от вертикали. В плазме зарегистрировано изменение формы капель: капли принимали шарообразную форму.

С увеличением тока разряда (то есть увеличением концентрации плазмы) цилиндрическая форма капли при влете в плазму изменяется – уменьшается длина цилиндра, принимая форму близкую к шарообразной в нижней части разряда.

Затем по результатам экспериментов определялся заряд капель. Для определения заряда капль выполнялась серия численных расчетов при различных зарядах капли. После этого выбирался заряд, траектория которого соответствует эксперименту с наименьшей погрешностью. Помимо этого, заряд капль в плазме определялся с учетом изменения площади поверхности капль за счет противодействия кулоновских сил и сил поверхностного натяжения. Оба метода дали аналогичный результат заряда капль, лежащий в пределах 0,2 – 0,5 мкКл.

Литература

- [1]. Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T. et al. Recent lithium experiments in tokamak T-11M. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 224—228.
- [2]. Krashennnikov S.I., Smirnov R.D. and Rudakov D.L. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2011, 53, 083001.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Богачев Н.Н.¹, Степин В.П.¹, Бакшаев А.С.², Колик Л.В.¹,
Кончеков Е.М.¹, Малахов Д.В.¹, Гусейн-заде Н.Г.¹

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
bgniknik@yandex.ru*

²*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

В последние годы наблюдается активизация исследований в области неравновесной низкотемпературной плазмы атмосферного давления (НТП), что обусловлено широкими перспективами её применения для обработки твёрдых и жидких материалов различной природы, в том числе в биологии и медицине [1]. В большинстве таких работ низкотемпературная неравновесная плазма при атмосферном давлении формируется с использованием диэлектрического барьерного разряда (ДБР), плазменных струй, а также коронных разрядов, реализуемых на базе различных типов источников питания и конфигураций электродов. Особое внимание уделяется разработке компактных и мобильных источников НТП, в которых в качестве высоковольтного преобразователя используется пьезоэлектрический трансформатор [2].

Работа пьезоэлектрического трансформатора основана на прямом и обратном пьезоэлектрических эффектах: входной переменный сигнал вызывает механические колебания кристалла, которые затем преобразуются в высоковольтный электрический сигнал. За счёт нецентросимметричной структуры решётки обеспечивается направленное движение зарядов. Трансформатор работает в резонансном режиме, и его частота зависит от параметров нагрузки, поэтому для стабильной работы требуется управление частотой возбуждающего сигнала.

В настоящем исследовании представлен разработанный компактный источник НТП, основанный на пьезоэлектрическом

преобразователе с драйвером класса E и возможностью цифрового управления частотой возбуждающего сигнала. Созданный источник питания обеспечивает выходное напряжение с амплитудой $V_{pp} = 5$ кВ и эффективным значением $V_{rms} = 2,3$ кВ. Конструкция устройства допускает реализацию различных типов газовых разрядов в зависимости от применяемого наконечника: коронный разряд (прямой пьезоэлектрический разряд), диэлектрический барьерный разряд, искровой разряд, а также разряд в плазменной струе при подаче инертных газов или азота. Разработанный источник обладает высоким потенциалом масштабирования и может быть адаптирован как для локальной обработки маленьких объектов, так и для обработки больших поверхностей. В ходе экспериментов с использованием данной установки были получены коронный, искровой, диэлектрический барьерный разряды, а также устойчивые плазменные струи. Проведены измерения электрических характеристик источника.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00842, <https://rscf.ru/project/24-29-00842/>.

Литература

- [1]. Adamovich I. et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, Vol. 50.32, PP. 323001.
- [2]. Korzec D., Hoppenthaler F., Nettesheim S., 2020, Plasma, Vol. 4, No.1, P. 1-41.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СЕЧЕНИЯ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ УВ:УАГ КЕРАМИКИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ФЮХТБАУЭРА- ЛАДЕНБУРГА

Булычов И.А., Макаров К.Н., Островский В.А.,
Путилин М.В.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, liner@trinitil.ru

В настоящее время активно развиваются импульсно-периодические лазерные системы на УВ:УАГ активных элементах. Такие системы представляют интерес, так как могут работать в частотном режиме с энергией (1 - 10) Дж. В качестве усиливающей среды используется оптическая УВ:УАГ керамика. Для моделирования процессов усиления необходимо знать зависимости сечений вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda, T)$ от длины волны и температуры [1]. В данной работе применен метод Фюхтбауэра-Ладенбурга [2] для определения спектров сечения вынужденного излучения в диапазоне температур от 100К до 300К. Преимущества данного метода состоит в сведении к минимуму влияние эффектов реабсорбции спонтанного излучения.

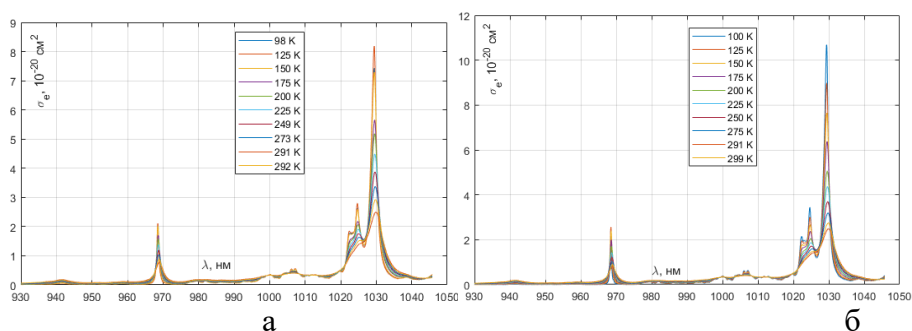


Рисунок 1 Зависимость сечения вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda, T)$ от
длины волны и температуры

На рисунке 1 показаны сечения вынужденного излучения оптической керамики с концентрацией иттербия 0,9 ат.% (а) и 1,1 ат.% (б).

Литература

- [1]. J. Körner, V. Jambunathan, J. Hein et al, “Spectroscopic characterization of Yb³⁺-doped laser materials at cryogenic temperatures”, Appl. Phys. B 116, 2014, 75–81.
- [2]. S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith et al, “Infrared cross-section measurement for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺, and Ho³⁺”, IEEE J. Quantum Electron. 1992, 28(11), 2619-2630.

ЛАЗЕРНОЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ CVD-АЛМАЗА: СТРУКТУРЫ И МОДЕЛИ

Бухаров Д.Н., Черников А.С., Харькова А.В.

ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, buharovdn@gmail.com

Сегодня микроструктуры, синтезированные на поверхности, а также внутри CVD-алмазов являются перспективными материалами для инновационной элементной базы в различных микроэлектронных приборах [1], особенно в сенсорах [2].

Микроструктурирование поверхности CVD-алмаза производилось с использованием фемтосекундной Yb:KGW лазерной системы на длине волны $\lambda=1030$ нм, с длительность импульса $\tau=280$ фс, на рабочей частоте следования импульсов 10 кГц с энергией в импульсе 50 мкДж при варьировании количества импульсов в точке. Лазерное воздействие на поверхность алмаза с различным количеством импульсов в точку инициировало последовательное развитие процессов модификации поверхности и изменения топологии [3].

При малом количестве импульсов (25 импульсов) наблюдалось формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) без существенной абляции материала. С увеличением числа импульсов реализовывалась абляция алмаза, которая сопровождалась образованием углубляющихся и расширяющихся каверн с неоднородным шероховатым профилем с наличием ЛИППС и графитизированного материала на краях, что было подтверждено КР-спектрами. Так, по мере продвижения от центра к периферии каверны графитовый пик уменьшался, и значения приближались к величинам, характерным для аморфного углерода.

Для описания полученных результатов было проведено моделирование шероховатого профиля синтезированных микроструктур CVD-алмаза в приближении диффузионно-ограниченной агрегации [4] в рамках клеточного автомата с окрестностью Неймана, которая допускала дифференциацию элементов по их степени графитизации. Предложенные модели не противоречили данным экспериментального

синтеза и достаточно адекватно описывали полученные микроструктуры.

Исследование выполнено в рамках государственного задания FZUN-2024-0018.

Литература

- [1]. C.J.H. Wort, R.S. Balmer, Diamond as an electronic material, *Materials Today*, 2008, 11, 1–2, 22-28.
- [2]. Samudrala G.K.; Moore, S.L.; Vohra, Y.K, *Fabrication of Diamond Based Sensors for Use in Extreme Environments*, *Materials*, 2015, 8, 2054-2061.
- [3]. Cui X.; Zhang C.; Li G.; Song C.; Qin W.; Wang T. Mechanisms Behind Graphitization Modification in Polycrystalline Diamond by Nanosecond Pulsed Laser, *Materials*, 2024, 17, 6200.
- [4]. Mroczka J., Woźniak M., Onofri F.R.A., Algorithms and methods for analysis of the optical structure factor of fractal aggregates, *Metrol. Meas. Syst.*, 2012, XIX(3), 459-470.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КАРДИЭЛЕКТРОДА С ПОКРЫТИЕМ, НАНЕСЕННЫМ ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ, ОТ РЕЖИМА НАПЫЛЕНИЯ

Кочетов С.Н.

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, kochetov.sn@phystech.edu

Плазменные методы нанесения покрытий (такие, как магнетронное распыление) позволяют получать покрытия кардиоэлектродов с высокими функциональными свойствами [1]. При этом режим осаждения, осаждаемый материал, рельеф подложки существенно влияют на электрохимические свойства двойного электрического слоя (ДЭС) системы кардиоэлектрод – электролит (межклеточная жидкость миокарда сердца). Основными параметрами ДЭС являются: импеданс и время деполяризации (зависят от ёмкости ДЭС, а она – от рельефа покрытия). Баланс между данными характеристиками часто достигается с помощью принудительной деполяризации электрода (ПДЭ). Такой подход приводит к необходимости решения следующих задач: создание высокоразвитого рельефа поверхности (рис.1); разработка методики измерения параметров ДЭС [2] и определение их связи с рельефом [3]; создание эквивалентной электротехнической схемы (ЭЭС) ДЭС для осуществления ПДЭ.

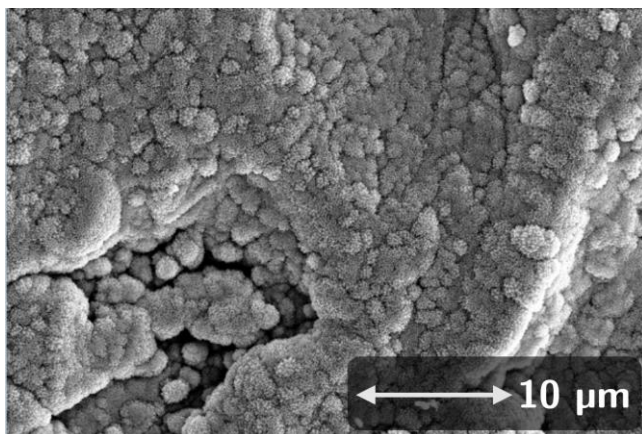


Рисунок 1: Рельеф покрытия, полученного на образце кардиоэлектрода в НИЦ «КИ»

Настоящая работа посвящена моделированию ЭЭС и определению ее параметров для образцов катода кардиоэлектрода с разным рельефом поверхности и подготовкой подложки для напыления.

Литература

- [1]. Шальдах М. Электрокардиотерапия – Санкт-Петербург. – Изд. «Северо-Запад». – 1992. – 256 с.
- [2]. Обрезков О. И., Нагель М. Ю., Мартыненко Ю. В., Рукина Ю. И. Успехи прикладной физики, 2023, т. 11, № 5, с. 455-464.
- [3]. О.И. Обрезков, Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель, О.Л. Шутьев, С.Л. Шевчук, Ю.И. Рукина, В.Е. Мисников, С.Н. Кочетов, М.А. Бажин, Д.И. Минаев, А.Б. Мищенко, Т.В. Чурина. Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47.

ВЛИЯНИЕ СМЕСИ ГАЗОВ И ФОРМЫ СОПЛА НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОВОЛНОВОГО ФАКЕЛА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Куликов Е.С., Моряков И.В., Жуков В.И.,
Заклецкий З.А.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
office@gpi.ru*

Плазменные установки активно применяются для осаждения на поверхности металлических и диэлектрических пленок с целью создания поверхностных структур [1]. Тонкопленочные структуры могут применяться в качестве стабильных интегральных датчиков температуры и излучения. Для получения чистых продуктов важно использовать разряд, не загрязняющий обрабатываемый материал.

В связи с этим полезно использовать безэлектродный газовый разряд, создающий плазму, которая не взаимодействует со стенками камеры и материалом электродов. Факел является таким разрядом. Сырье в факел может быть подано в жидкой, твердой или газообразной фазе.

В данной работе исследуется зависимость параметров факела в различных газовых смесях. А также исследован профиль получаемого разряда в зависимости от формы сопла. Приведена зональная спектроскопия разряда с разными газовыми смесями. Сделаны выводы о влиянии указанных параметров на характеристики разряда.

Форма и стабильность разряда сильно зависят от формы сопла. При наличии неровностей на конце сопла разряд получается нестабильным из-за возникновения турбулентности в истекающем потоке. Для повышения напряженности поля на кончике сопла оно должно быть более острым, что повышает простоту поджига разряда. Выбор газа рубашки факела влияет на скорость рассеивания энергии из ядра факела. Молекулярные газы с высокой массой активной отбирают энергию у ядра.

Литература

- [1]. Сергейчева К.Ф, Лукина Н.А., Арутюнян Н.Р., Физика плазмы, 2019, том 45, № 6, с. 513–523 – DOI: 10.1134/S036729211906009X

«ПАМЯТЬ» ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР В КОАКСИАЛЬНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ, ВОЗБУЖДАЕМОМ ЦУГАМИ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Петряков А.В.¹, Акишев Ю.С.^{1,2}, Ермолаева С.А.²,
Медведев М.А.^{1,2}

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, petryakov@triniti.ru

²НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва

В коаксиальном барьерном разряде, возбуждаемом цугами синусоидального напряжения, поверхностные стримеры создаются каждый полупериод. Каждый стример оставляет после себя след в форме поверхностного заряда, который влияет на структуру последующего стримера. Другими словами, последующий стример может пойти по следу предыдущего стримера. Такой сценарий возможен при условии, что "время жизни" оставленного следа превышает время между соседними полупериодами. Теоретически оценить время жизни очень сложно, поэтому представляет интерес его экспериментальное определение. В эксперименте время жизни следа было сопоставлено со временем повторения плазменной структуры, формируемой в разряде. Это время оказалось равным 100 мкс. Результаты показаны на Рис. 1.

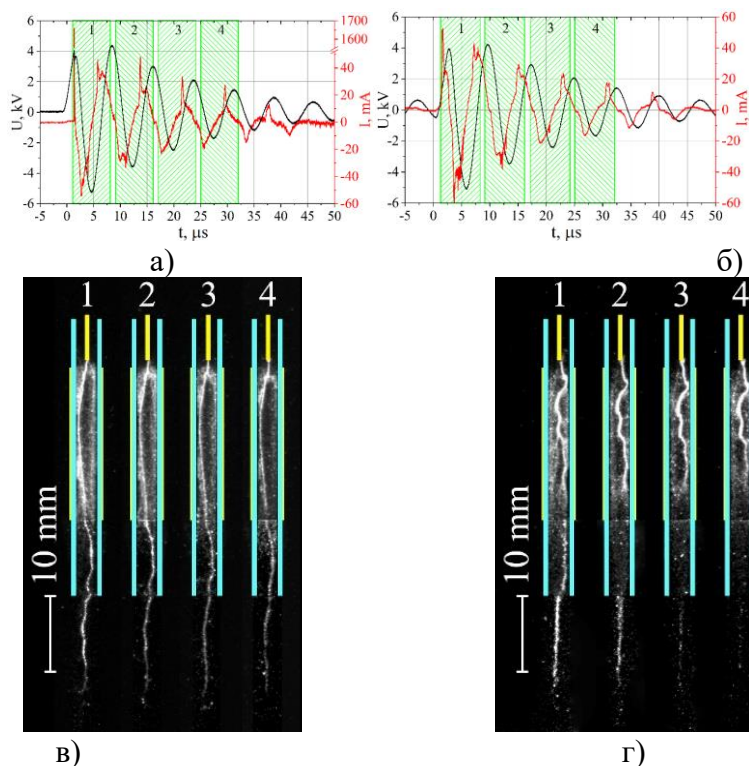


Рис. 1. а), в) Частота цугов $F = 100$ Гц; б), г) частота цугов $F = 20$

кГц;

а), б) осциллограммы тока и напряжения в одном цуге, частота напряжения в цуге 125 кГц. Вертикальные зеленые столбики с номерами соответствуют моментам времени, в которые сделаны снимки в) и г) с такими же номерами. Время экспозиции каждого снимка 7 мкс.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 24-45-20006)

КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 40ХН2МА И ШХ15 В КАМЕРЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

Миллер М.А., Кутуков А.К., Сергеечев А.А., Панин С.Е.,
Данилина Н.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, miller@triniti.ru

Значительная часть промышленных изделий эксплуатируется в агрессивных средах, что приводит к разрушению поверхностного слоя и необходимости вывода изделия из эксплуатации. В работе рассмотрена возможность увеличения коррозионной стойкости конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА путем поверхностной обработки импульсным потоком плазмы (ИПП). Выбранные материалы относятся к недорогим и широко распространенным сталям, использующихся для изготовления бурильных замков и переводников для бурильных труб, подшипников, шайб шарошечных коронок, колонковых долот.

В основе метода обработки ИПП лежит принцип сверхбыстрого нагрева тонкого поверхностного слоя за короткий период времени (до 1 мс) и сверхбыстрое охлаждения со скоростями до 10^{10} К/с за счет высокой теплопроводности выбранных материалов без использования охлаждающих сред. Обработку проводили на плазменном ускорителе КСПУ [1].

Испытания материалов на коррозионную стойкость проводилась в камере соляного тумана (КСТ), предназначенной для ускоренных испытаний изделий, работающих в насыщенной солями среде. Принцип работы: при помощи сжатого воздуха соляной раствор распыляется внутри камеры с испытуемыми образцами в виде тумана или мелкой водяной пыли. В ходе испытаний соляной туман выпадает конденсатом на образцы, приводя к электрохимическим процессам на поверхности.

Эксперимент проводился при непрерывном распылении 5-% NaCl с неизменной температурой 35 ± 2 °С, pH раствора 6,5 – 7,2. Скорость выпадения осадка на образцы составляла 25 мкл/(см²·ч). Суммарная длительность испытаний составляла 15 суток.

Коррозионную стойкость оценивали гравиметрическим способом – по изменению массы образца, измеренную через 24, 72, 168 и 360 часов.

Проведенные эксперименты показывают, что в зависимости от режима обработки ИПП, наблюдается увеличение коррозионной стойкости стали марок 40ХН2МА и ШХ15 до 3 раз. Максимальное уменьшение скорости коррозии для выбранных марок зафиксировано при обработке в режимах, сопровождающихся полным оплавлением поверхности, при котором образуется закалённый слой с волнообразным рельефом. Результат объясняется образованием мелкоячеистой структуры на поверхности сталей, что значительно подавляет коррозионное поражение.

Работа выполнена в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии»: государственный контракт № Н.4к.241.09.23.1058 от 17.04.2023.

Литература

[1]. Кутуков А. К. и др. Инж. физ. – 2023. – № 10. – С. 47-58.

ИЗМЕНЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СПЛАВОВ ВТ6 И ЖС6У-ВИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ МОЩНОГО ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Панин С.Е., Кутуков А.К., Карпов Н.И., Самойлов В.И.,
Миллер М.А., Бойко А.Н.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, panin@triniti.ru

Практика показала, что разрушение лопаток компрессора газотурбинных двигателей (ГТД) в процессе эксплуатации носит усталостный характер. Чтобы повысить надежность работы, выносливость и ресурс лопаток, работающих при высоких статических и циклических нагрузках, а также подвергающихся воздействию тепла и эрозионной среды, необходимо при финишной обработке обеспечить упрочнение поверхностного слоя с наведением в нем необходимого уровня и глубины распространения сжимающих остаточных напряжений [1].

Одними из распространенных материалов для изготовления лопаток ГТД являются титановый (ВТ6) и никелевый (ЖС6У-ВИ) сплавы. В работе были проведены исследования усталостной прочности при обработке образцов материалов мощным импульсом лазерного излучения.

Обрабатываемая поверхность покрывается слоем-поглотителем, непрозрачным для лазерного излучения. Сверху слоя-поглотителя наносится прозрачный слой. Лазерный луч, проходя через прозрачный слой поглощается непрозрачным слоем, вызывая его быстрое испарение и образуя плазменный факел. Давление над обрабатываемой поверхностью быстро возрастает, образуя ударную волну, генерирующую импульсы давления в материал, которые приводят к изменению кристаллической структуры в поверхностном слое материала [2].

Для оценки остаточных напряжений использовался метод $\sin^2\Psi$, основанный на измерении деформаций по положению дифракционного пика. Испытания на усталостную прочность путем изгиба с вращением показали рост количества циклов у обработанных лазерным наклепом образцов относительно необработанных до 4 раз для ВТ6 и до 2,5 раз для ЖС6У-ВИ в зависимости от режима обработки. Наибольшее количество циклов зафиксировано на тех образцах, на которых после обработки методом лазерного наклепа в поверхностном слое образовывались сжимающие остаточные напряжения порядка 700 МПа.

Работа выполнена в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии»: государственный контракт № Н.4к.241.09.23.1058 от 17.04.2023.

Литература

- [1]. Иноземцев А.А. //– М.: Машиностроение, 2008. – Т.1
- [2]. М. Волков, А. Кишалов и др. // Фотоника, вып. 3, 2014, с. 34-44.

ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ШИРОКОАПЕРТУРНОМ РАМАНОВСКОМ КРИСТАЛЛЕ BaWO_4

Пеганов Е.А., Карпов Н.И., Самойлов В.И., Островский В.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, liner@triniti.ru

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) представляет собой эффективный механизм преобразования лазерного излучения в новые спектральные диапазоны. ВКР-лазеры, использующие в качестве активной среды кристаллы вольфрамата бария (BaWO_4), обладают высокими коэффициентами усиления и высокой лучевой прочностью, что делает их перспективными для создания лазерных систем, предназначенных для преобразования излучения в области, требующие высоких энергий и стабильности.

Кристаллы BaWO_4 имеют важное преимущество, заключающееся в возможности выращивания активных сред с размерами, превышающими 20 мм. Это свойство, в сочетании с высокой лучевой прочностью, позволяет эффективно преобразовывать излучение с длинами волн 1–1.1 мкм и энергиями в несколько джоулей в импульсы с длинами волн 1.1–1.5 мкм, что открывает широкие возможности для создания лазеров, работающих в интересующих медицинских спектральных диапазонах.

Длины волн в диапазоне 1.1–1.5 мкм находят активное применение в современной медицине. В частности, длина волны 1167 нм (вторая гармоника, 584 нм) используется в эстетической дерматологии для процедур омоложения кожи, поскольку она способствует стимуляции выработки коллагена и улучшению микроциркуляции [1]. Длина волны 1308 нм (вторая гармоника, 654 нм) играет важную роль в фотодинамической терапии (ФДТ) злокачественных новообразований, где она используется для активации фотосенсибилизирующих агентов, применяемых в лечении различных видов рака [2].

Однако, несмотря на многочисленные преимущества, существующие лазерные системы в этих диапазонах часто страдают от

ограничений по энергии и области обработки, что сдерживает их коммерциализацию и широкое использование. В ходе проведённого исследования была достигнута энергия порядка 1 Дж в одиночном импульсе ВКР-лазера при наносекундной длительности импульса накачки в ближнем инфракрасном диапазоне (1167 нм и 1308 нм). Это достижение значительно расширяет возможности применения ВКР-лазеров на основе $BaWO_4$ в области медицины и других высокотехнологичных сфер.

Литература

- [1]. Lueangarun S., Namboonlue C., Tempark T. Postinflammatory and rebound hyperpigmentation as a complication after treatment efficacy of telangiectatic melasma with 585 nanometers Q-switched Nd: YAG laser and 4% hydroquinone cream in skin phototypes III-V //Journal of Cosmetic Dermatology. – 2021. – Т. 20. – №. 6. – С. 1700-1708.
- [2]. Teiten M. H. et al. Endoplasmic reticulum and Golgi apparatus are the preferential sites of Foscan® localisation in cultured tumour cells //British journal of cancer. – 2003. – Т. 88. – №. 1. – С. 146-152

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО КОНВЕРТЕРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Петренко П.И.^{1,2}, Чемоданов Н.С.¹, Переславцев А.В.¹,
Артемов А.В.¹, Вошинин С.А.¹,

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²НИЯУ «МИФИ», Москва

Процесс разработки систем плазменной переработки отходов сопровождается сложными расчетами нагрузки на оборудование, тепловых, материальных балансов в реакционной зоне установок, потоков существенно нагретых смесей газов различного состава. Для проверки теоретических и имеющихся расчетных моделей [1] была создана математическая модель плазменного конвертера. В докладе изложена методика моделирования физико-химических процессов в конвертерах плазменных установок.

Для моделирования используется

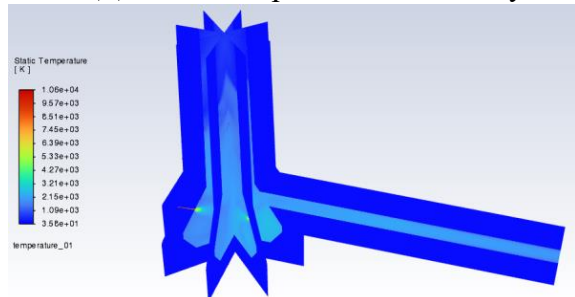


Рис. 1. Распределение температур в модели плазменного конвертера

программное обеспечение ANSYS Fluent [2], которое позволяет успешно реализовать расчет моделей газовой гидродинамики в совокупности с химическими реакциями и возможной подачей твердых частиц различных отходов усредненного состава или потоков жидких отходов.

Используемая методика позволяет оценить, как состав газа в объеме установок, так и состав отходящих газов, оценить влияние плазмообразующих газов на протекающие физико-химические процессы, а также рассчитать теплообмен газовой компоненты со стенками реакционного объема, получить данные о распределении температур, скоростей и линий тока газовой компоненты.

Данная методика расчета объединяет в себе следующие аспекты: особенности создания геометрии и генерации расчетной сетки, ее необходимые характеристики, используемые уравнения и модели турбулентности, химической кинетики, массо- и теплообмена, основные химические реакции и объем сопутствующих данных для расчета.

Представленная методика позволяет успешно рассчитывать модельный процесс переработки различных отходов в плазменных конвертерах различной геометрии и при различных физико-химических условиях. Использование данного подхода к моделированию физико-химических процессов может быть полезным при проектировании плазменных конвертеров различной производительности для установок плазменной переработки отходов.

Литература

- [1]. Переславцев, А. В. Плазменная переработка отходов: монография / А. В. Переславцев, С. А. Вошинин, А. В. Артемов. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 436 с.
- [2]. Fluent A. 12.0 Theory Guide //Ansys Inc. – 2009. – С. 816.

РАСЧЕТ ДИАПАЗОНОВ ТЕМПЕРАТУР РАЗДЕЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СОСТАВА ОЯТ ПРИ ИОННО- ТЕРМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ

Петровская А.С., Цыганов А.Б.

ООО "ИнноПлазмаТех", Санкт-Петербург, anita3425@yandex.ru

Замыкание ядерного топливного цикла и разработка эффективных технологий переработки ОЯТ является актуальной задачей ядерной энергетики.

Используемые в настоящее время для переработки ОЯТ радиохимические методы крайне сложны технически и приводят к большим объемам ЖРО, сепарация в плазменных центрифугах обладает невысокой производительностью и низкой селективности по массе выделяемых ионов. Отсутствие эффективного решения переработки ОЯТ остановило программы промышленного освоения ЯЭУ на быстрых нейтронах во всех странах мира, кроме России, т.к. такие реакторы на современном этапе развития крайне неэффективны экономически. Они требуют дорогостоящее высокообогащенное ядерное топливо и, хотя демонстрируют высокий коэффициент выгорания и конверсии урана-238, но, в конечном итоге, отправляют в неперерабатываемые отходы, потерявшие критичность ТВЭЛы с очень высоким (>20%) остаточным содержанием делящихся материалов, выводя их из оборота. В этой связи для решения проблемы переработки ОЯТ и замыкания ядерного топливного цикла нами разрабатывается принципиально новый подход: ионно-плазменная технология с разделением элементного состава ОЯТ по температурам насыщенных паров. Технология основана на применении плазменного разряда для ионного и термического распыления таблетки ОЯТ или ее фрагментов в потоке инертного газа (аргон) с последующим осаждением на вкладышах диффузионной разделительной трубы с продольным градиентом температуры при давлении аргона ~ 1 атм., скорости потока газа – носителя ~ 10 м/с и плотности тока разряда $1\text{--}5$ А/см². В настоящей работе выполнен расчет диапазонов парциальных давлений

и температур осаждения элементного состава ОЯТ из реакторной установки ОК-150 атомного ледокола «Ленин» [1]. Диапазон температур осаждения каждого радионуклида определялся по уменьшению парциальной концентрации паров выбранного элемента в необходимое число k раз (в зависимости от запрашиваемой чистоты разделения) по сравнению с его начальной парциальной концентрацией в потоке газа. Получены диапазоны температур для раздельного (99%) осаждения элементов состава ОЯТ установки ОК-150: U– (2700-2800)К, Pu– (1500-1750)К, Am – (800-900)К, Sr – (500-750)К, , Tc –(2000-2400)К, Cs – (1000-1250)К, Sm – (630-800)К. Ионно-термическая технология позволяет сразу отделить уран от большинства продуктов отработанной топливной композиции. Преимущества технологии: разделение по элементам в один шаг, отсутствие ЖРО, сокращение стоимости переработки ОЯТ (операционные расходы переработки 1 кг ОЯТ оцениваются нами в размере 20 долларов США, в то время как стоимость переработки радиохимическими методами составляет от 700 до 2000 долларов США).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00321, <https://rscf.ru/project/24-29-00321/>

Литература

- [1]. Наумов В.А., Караваева Е.В. // Вестник МГТУ. 2013. Т.16, №1. С.137.

ВЛИЯНИЕ АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ

Степин В.П., Богачев Н.Н., Андреев С.Е., Жуков В.И.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
vjacheslav-stepin@rambler.ru*

Перспективным направлением исследований в области плазменных технологий и радиофизики является разработка плазменных антенно-фидерных устройств и систем. Преимущества этого типа антенн является возможность динамически управлять их радиочастотными характеристиками путём изменения величины и пространственного распределения электронной плотности в газоразрядных областях. В данной работе рассматривается влияние распределения плотности электронов в плазме излучающего тела несимметричной вибраторной антенны [1]. Антенна представляла собой стандартную газоразрядную трубку коммерческой люминесцентной лампы (длина 160, диаметр 12 мм), наполненную аргоном при давлении 1–3 Торр и парами ртути при давлении $\approx 0,01$ Торр, с дисковым экраном диаметром 200 мм. Возбуждение разряда в трубке осуществлялось частью передаваемой через антенну мощности на частоте 443 МГц (СВЧ-разряд на поверхностной волне) [2].

Ранее были проведены измерения аксиального распределения [3] концентрации с помощью резонаторного метода. На длине трубки плотность уменьшается в пять раз. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования, выполненного в электромагнитном коде КАРАТ в 2,5D геометрии с использованием метода конечных разностей во временной области для расчета электромагнитного поля и метода «частица в ячейке» (Particle-in-Cell).

В численном моделировании для давлений аргона в диапазоне от 0,1 Торр до 1 Торр достигнут стационарный режим разряда, получены значения концентраций электронов и их продольное и

радиальное распределение, также получены значения тока в плазме и их распределения поля внутри газоразрядной трубки и в ближней зоне.

Полученные аксиальные и радиальные распределения были использованы при осуществлении оценки радиочастотных характеристик антенны в результате ее моделирования в среде программы COMSOL Multiphysics. Переход от однородного распределения к экспериментально полученному аксиально-убывающему слабо меняет направление основного лепестка (не более 5°) диаграммы направленности антенны, приводит к значительному уменьшению направленности излучения (около 30%) и увеличению ширины основного лепестка диаграммы направленности на 45° . Радиальный профиль при полученных значениях концентрации плазмы $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и на частоте 443 МГц почти не влиял на диаграмму направленности антенны.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору Гусейнзаде Н.Г., д.т.н., доценту Замуруеву С.Н., к.ф.-м.н. Усачёнку М.С., к.ф.-м.н. Сергейчеву К.Ф., к.ф.-м.н. Карфидову Д.М., к.ф.-м.н. Богданкевич И.Л., д.ф.-м.н, профессору Симончику Л.В. за помощь в проведении исследований и обсуждении результатов.

Литература

- [1]. Magarotto M. et al. Plasma Antennas: A Comprehensive Review //IEEE Access. – 2024.
- [2]. Bogachev N. N. et al. //Plasma Physics Reports. – 2019. – Т. 45. – С. 372–375.
- [3]. Степин В.П. и др. // РАДИОИНФОКОМ – 2024: сб. тр. (Москва, 18–22 ноя. 2024 г.). – М.: РТУ МИРЭА, 2024. – С. 327–332.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ХРОНОГРАММ УДАРНОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МИШЕНЯХ

Юсупова Л.М.^{1,2}, Казаков Е.Д.^{1,2,3,4}, Ткаченко С.И.^{2,3,4,5},
Смирнова А.Р.^{2,3,4}

¹НИУ «Московский энергетический институт», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³НИУ «Московский физико-технический институт», Долгопрудный

⁴Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

⁵Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

При импульсном воздействии релятивистского электронного пучка в исследуемых полимерных и композитных материалах формируется и распространяется ударная волна. Для изучения динамики ударноволновых процессов на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» применяется широкий спектр диагностик, в том числе и лазерное теневое фотографирование [1].

Этот метод позволил заметить следующую особенность: уже после прохождения основной ударной волны (1), вызванной воздействием электронного пучка на поверхность материала, на хронограмме заметны потемнения поля лазерного излучения, свидетельствующие об изменении давления, а значит, и показателя преломления в этой точке. Причем «вторичные» ударные волны возникают как почти сразу после прохождения «первичной» волны (2), так и спустя значительное время вплоть до 10-14 мкс (6). Кроме того, часто эти волны имеют непостоянный во времени наклон (3, 4, 5), что, возможно, говорит о быстроменяющейся скорости распространения.

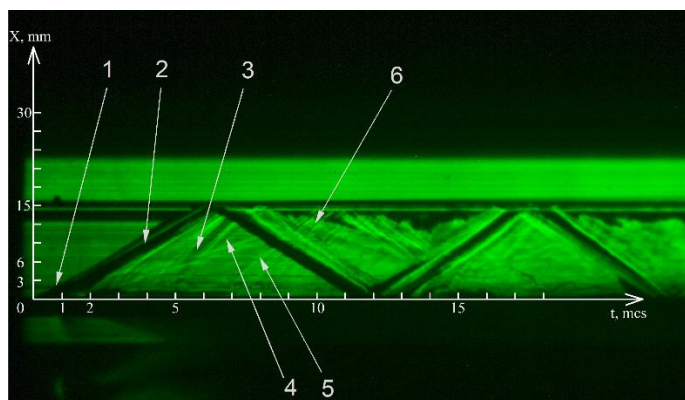


Рис. 1. Хронограмма распространения ударной волны в образце из оргстекла.

В данной работе был проведен анализ хронограмм, на которых были заметны вторичные ударные волны. Для этого волны оцифровывались, а затем аппроксимировались для оценки значения скорости распространения и координаты формирования на оси мишени. Было получено, что большинство вторичных волн обладают достаточно высокими скоростями (2 - 4 км/с), что свидетельствует о большом давлении, которое их порождало. Таким образом, была собрана и систематизирована база данных для дальнейшего анализа причин возникновения вторичных ударных волн.

Литература

- [1]. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г. и др., Приборы и техника эксперимента, 2020, № 3, С. 90-95.

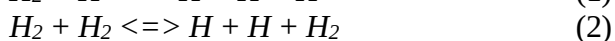
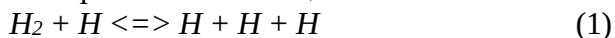
АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

О ПРИМЕНИМОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ ПЛАЗМЫ

Каральник В.Б., Акишев Ю.С., Кочетов И.В.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, karalnik_vb@triniti.ru

Для моделирования процесса ускорения водородной плазмы в канале квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) необходимо знать степень диссоциации водорода. В некоторых работах [1, 2] плазма рассматривается как полностью атомарная. Действительно, при температуре 5 – 10 тысяч градусов и исходной плотности водорода $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, равновесная степень диссоциации близка к единице. Однако, важную роль играет время установления термодинамического равновесия в сравнении с временем пролета плазмы вдоль канала ускорителя. Для изучения динамики диссоциации водорода создана кинетическая модель, включающая прямые и обратные реакции диссоциации в столкновениях с нейтральными атомами и молекулами и реакции с участием заряженных частиц:



Расчеты проведены для условий, известных из эксперимента и предварительного моделирования: температура потока увеличивается от 1.5 – 3 на входе до 10 тысяч градусов на выходе, скорость – от 3 – 4 до 100 км/с, плотность на входе 10^{17} см^{-3} . Степень диссоциации на входе задавалась равной термически равновесной для входной температуры. Модельные профили температуры и скорости в канале даны на Рис.1а. Результаты (Рис. 1б) показывают, что времени пролета плазмы вдоль канала ускорителя ($\sim 2 \text{ мкс}$) недостаточно для установления локального термодинамического равновесия, даже при разогреве плазмы до 10^4 К .

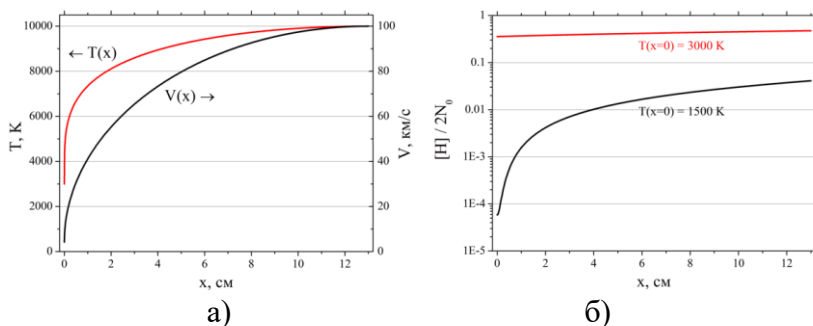


Рис. 1. а) Модельные профили температуры и скорости в канале ускорителя; б) изменение степени диссоциации вдоль канала при разной температуре на входе.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1062 от 19.04.2023.

Литература

- [1]. Козлов А.Н. Компрессионные течения плазмы в КСПУ при наличии сильного продольного магнитного поля // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 217. 20 с. doi:10.20948/prepr-2018-217
- [2]. Козлов А.Н. Кинетика ионизации и рекомбинации в канале плазменного ускорителя // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 181-188.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Данильченко И.К.^{1,2}, Томилин Д.А.¹

¹ АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва

² НИУ «Московский физико-технический институт»,
Долгопрудный, danilchenko.ik@phsrttech.edu

Одним из ключевых вопросов, возникающих при моделировании плазмы в разрядном канале холловского двигателя, является описание турбулентного (аномального) переноса электронов поперек магнитного поля. Известно, что механизмом, отвечающим за возникновение этого вида переноса, являются волны, распространяющиеся в азимутальном направлении (вдоль направления дрейфа электронов) [1]. Таким образом, для учета турбулентного переноса в численной модели, необходимо учитывать азимутальные неустойчивости, но, вместе с тем, необходимо учитывать радиальные и аксиальные направления для корректного учета взаимодействия плазмы со стенками разрядного канала.

Создание трехмерной модели плазмы на данный момент не представляется возможным из-за высокой вычислительной сложности задачи, поэтому для моделирования двигателей используются радиально-аксиальные модели, учитывающие турбулентную проводимость с помощью различных эмпирических закономерностей [2], а для изучения турбулентной проводимости и азимутальных неустойчивостей используются аксиально-азимутальные модели.

В данной работе было проведено численное исследование плазмы в разрядном канале холловского двигателя с помощью двумерной аксиально-азимутальной модели (2D2V PIC), оптимизированной под высокопроизводительные численные расчеты с использованием многопоточных вычислений и векторизации (SIMD). Динамика ионной и электронной компонент плазмы в самосогласованном электрическом и внешнем магнитном поле рассчитывалась с помощью метода частиц в ячейках, при этом столкновения между частицами, являющиеся

механизмом возникновения классической проводимости, не учитывались в расчете. Особое внимание уделялось исследованию зависимости аксиального электронного тока от параметров азимутальных волн, в частности от корреляции между концентрацией электронов и азимутальным электрическим полем.

Литература

- [1]. J. Cavalier, N. Lemoine, G. Bonhomme, S. Tsikata, C. Honoré, D. Grésillon, “Hall thruster plasma fluctuations identified as the ExB electron drift instability: Modeling and fitting on experimental data”, *Physics of Plasmas* 20, 082107 (2013)
- [2]. Kravchenko D.A., Shagayda A.A., Selivanov M.Y., Shashkov A.S., Tomilin D.A., Khmelevskoi I.A., et al. “Ion Thruster Discharge Modeling with Adjustment of Coefficient of Anomalous Electron Conductivity”, *Journal of Propulsion and Power*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 2022

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ИМИТИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДЯЩУЮ ЖИДКОСТЬ

Шмаков Е.И.^{1,2}, Смольянов И.А.^{1,2}, Рахимов Р.Ф.²,
Балабаев Н.Е.², Беляев И.А.²

¹*УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, shmakov.evgeny@urfu.ru*

²*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,
bia@ihed.ras.ru*

В настоящее время процесс воздействия электромагнитных импульсов на полости с жидким металлом в условиях, характерных для термоядерных энергетических реакторов, работающих в импульсных или переходных режимах плазмы, остается малоизученным и не имеет четкого теоретического описания (феноменологии). Подобные режимы могут возникать в термоядерных реакторах, где состояние плазмы изменяется чрезвычайно быстро (за 0.1-10 мс).

На сегодняшний день отсутствуют надежные методы измерения ключевых физических параметров в таких системах, включая: распределение скоростей течения, динамику давления, электромагнитные силы, плотности индуцированных токов. Для исследования МГД-процессов в условиях быстроменяющихся электромагнитных полей планируется разработка экспериментального лабораторного комплекса, способного воспроизводить и изучать данные явления. Поскольку предварительные оценки дают чрезмерно широкий диапазон возможных значений физических параметров (скоростей, давлений и усилий), требуется проведение дополнительных исследований для сужения этого диапазона, что необходимо как для выбора соответствующей измерительной аппаратуры, так и для последующей корректной верификации численных моделей.

В данной работе производится оценка краевых эффектов магнитного поля, создаваемого электромагнитом в экспериментальной установке. Также производится предварительная оценка возникающих механических воздействий на основные узлы лабораторного стенда. Для оценки выбора чувствительности измерительных датчиков проведена оценка получаемых значений давлений и возникающих скоростей (Рисунок 1). Эти результаты получены при импульсе тока амплитудой 1.5 кА в постоянном гомогенном магнитном поле 1.6 Т.

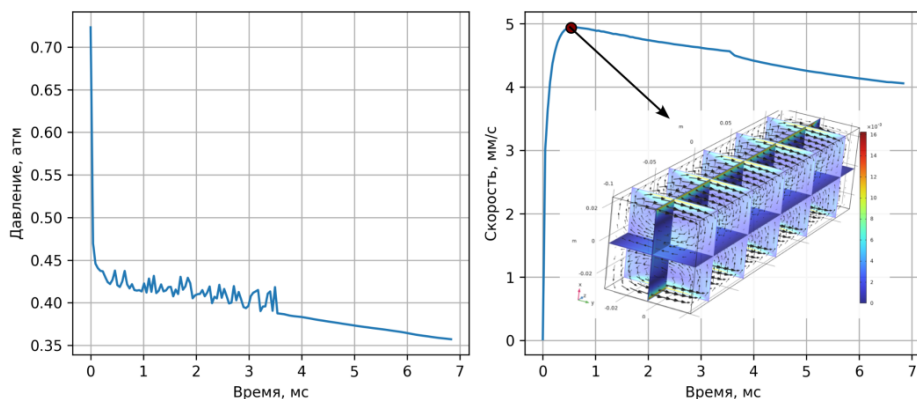


Рисунок 1. Эволюция давления и скорости при импульсном воздействии током в постоянном магнитном поле

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МГД-СИСТЕМЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ БЫСТРО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Смолянов И.А.^{1,2}, Шмаков Е.И.^{1,2}, Беляев И.А.²

¹УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, i.a.smolyanov@gmail.com

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, bia@ihed.ras.ru

Кратковременные плазменные явления, такие как срывы плазмы (дисрупции), ожидаются в будущих термоядерных реакторах с магнитным удержанием. Эти события сопровождаются быстрым изменением магнитного поля, генерируемого плазменным током, что приводит к возникновению значительных силовых воздействий в бланкетах реактора.

В данной работе сравниваются особенности моделирования магнитного поля с помощью псевдо вакуумных ГУ (ПВГУ) и подходом с расширенной областью (ПРО), а также оценивается влияние тока движения $\mathbf{J}_m = \mathbf{u} \times \mathbf{B}$ в столь быстро меняющихся системах. Разработана численная модель импульсного электромагнитного воздействия на проводящую жидкость (PbLi) в бланкете под воздействием магнитного поля

$$\mathbf{B}(t) = (B_T, B_p^0 \exp(-t/\tau), 0)$$

где, B_T - постоянное тороидальное магнитного поля 10 Тл, максимальное значение затухающего полоидального магнитного поля $B_p^0 = 0.5$ Т, с постоянной времени $\tau = 6$ мс.

Сравнены результаты распределения тепловыделения, значений усилий, распределения магнитной индукции и других физических параметров полученные различные с помощью численных моделей с разными допущениями (Рисунок 1.)

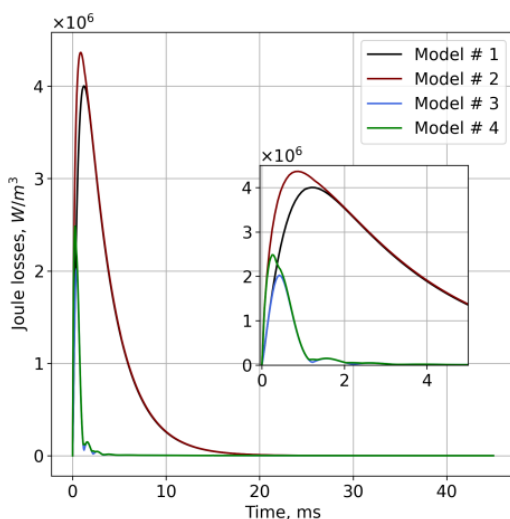


Рисунок 1. Распределение максимального значения тепловыделения от времени. **Модель # 1** – без учета влияния скорости в уравнении МП и ПВГУ; **Модель # 2** – без учета влияния скорости в уравнении МП и ПРО; **Модель # 3** – с учетом влияния скорости в уравнении МП и ПВГУ; **Модель # 4** – с учетом влияния скорости в уравнении МП и ПРО.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Мамонов А.А., Гуторов К.М., Чернышев В.С.,
Подковыров В.Л.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, tamonov@triniti.ru

На текущий момент в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» проводятся экспериментальные исследования работы квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ). Важной характеристикой работы ускорителя является скорость плазменного потока. Ее измерения на КСПУ производятся с помощью регистрации Доплеровского смещения [1] и по времяпролетной методике [2]. Целью настоящей работы является создание метода автоматизированной обработки осциллографических сигналов времяпролетной диагностики.

В экспериментах свечение плазменного потока в различных сечениях вдоль его распространения регистрируется с помощью ФЭУ. Присутствующие в потоке сгустки формируют флуктуации амплитуды сигнала ФЭУ. Для определения временной задержки между сигналами ФЭУ осциллограммы разбиваются на окна фиксированной ширины. В каждом окне рассчитывается взаимнокорреляционная функция сигналов. По максимуму пика корреляции определяется временная задержка между сигналами, по ширине пика – погрешность.

Основные факторы, влияющие на точность метода – геометрия измерения оптического сигнала, частота дискретизации осциллограммы и выбор ширины окна при обработке. Геометрия измерения определяет угол коллиматора, с помощью которого собирается свечение плазменного потока. Угол выбирается таким образом, чтобы линейные размеры плазменного сгустка были больше размеров чувствительной области коллиматора на оси потока.

Частота дискретизации ограничивает минимальный шаг сдвига сигналов друг относительно друга при расчете взаимнокорреляционной

функции. Таким образом, при измерениях частоту дискретизации необходимо выбрать наибольшую из доступных.

Ширина окна влияет на временное разрешение метода. Она выбирается из следующих условий. Для получения острого пика взаимокорреляционной функции необходимо, чтобы окно было хотя бы на порядок шире периода флуктуаций, обусловленных свечением стустков. С другой стороны, выбор слишком широкого окна не позволяет регистрировать быстрые изменения временной задержки между сигналами. Следовательно, ширина окна должна быть не больше желаемого временного разрешения.

Литература

- [1]. Yaroshevskaya A.D., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., and Litvinenko Yu.I. Determination of Plasma Flow Velocity with Time Resolution Based on the Doppler Effect // Plasma Physics Reports. - 2024. - V. 50. - No 6. - P. 689-696.
- [2]. Коваленко Д.В., Климов Н.С., Житлухин А.М., Музыченко А.Д., Подковыров В.Л., Сафронов В.М., Ярошевская А.Д. Получение потоков аргонной плазмы и преобразование их энергии в излучение на установке КСПУ-Т для моделирования радиационных нагрузок, характерных для ослабленного срыва ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2014. – Т. 37, №4. – с. 39-48

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ СТЕНДА ПЕРСТ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ СРЕДСТВ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

Анциферова А.С., Бобырь Н.П.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Anciferova_AS@nrcki.ru

В целях создания в РФ экспериментальной базы для разработки безэлектродных плазменных ракетных двигателей (БПРД) высокой мощности, в НИЦ «Курчатовский институт» создается стенд-имитатор космического пространства ПЕРСТ (рис. 1). На сегодняшний день проектирование и изготовление всех элементов конструкции стенда ПЕРСТ завершено, начаты монтажные работы. Планируемая дата ввода в эксплуатацию стенда – второй квартал 2026 г.

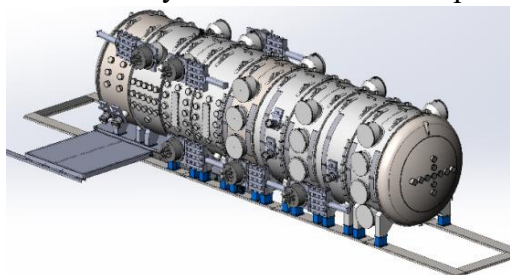


Рис. 1.Общий вид стенда ПЕРСТ

Стенд представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру (ВК) из двух частей – двигательного отсека (длиной $L = 5,1$ м, диаметром $D = 5$ м) объемом $\sim 90 \text{ м}^3$, в котором устанавливается макет БПРД, и испытательного отсека ($L = 15,1$ м, $D = 5$ м)

объемом $\sim 300 \text{ м}^3$, в котором происходит диагностика параметров плазмы двигателя.

На испытательном отсеке стенда ПЕРСТ предусмотрено 25 фланцев с условным проходным диаметром (ДУ) 1000 мм для установки средств высоковакуумной откачки. Так как на первом этапе эксплуатации установки предполагается использование семи криогенных насосов H&I HPG3-90U совместно с тепловыми экранами, необходимо определить оптимальную схему их расположения, для

достижения наименьшего давления в зоне измерения параметров плазмы двигателя (4 м испытательного отсека).

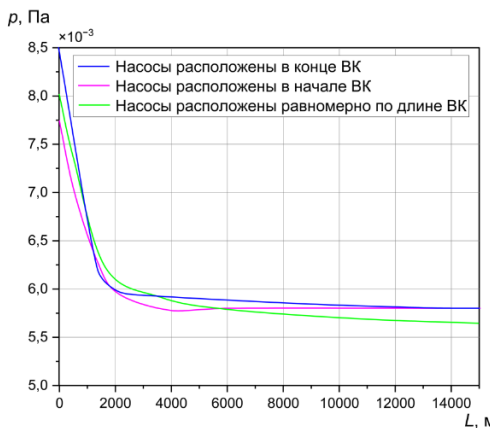


Рис. 2. Результаты расчета

вакуумном стенде ПН-3. По результатам верификации было принято решение о возможности применения математической модели молекулярного течения для численного моделирования работы стенда ПЕРСТ с погрешностью до 50 %.

В результате данной работы было получено распределение давления на оси вакуумной камеры стенда-имитатора космоса ПЕРСТ в случаях трех расположений крионасосов (рис. 2). Видно, что давления отличаются не более чем на 10 %.

Литература

- [1]. Н П Бобырь и др. 2023 *Вакуумная техника и технологии* – 2023 – С. 421-425.

В программе COMSOL Multiphysics, используя математическую модель свободно-молекулярного течения газа, было проведено моделирование вакуумной откачки испытательного отсека стенда ПЕРСТ при натекании в него аргона - рабочего тела двигателя. Была проведена верификация применяемой математической модели на действующем

МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАММА КАМЕРЫ ДЛЯ ОФЭКТ НА ОСНОВЕ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Загоруйко А.С.¹, Скобляков А.В.², Канцырев А.В.²,
Голубев А.А.¹

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, senya.zaq@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В представленной работе разработана модель ячейки гамма-камеры [1], основанной на комптоновском рассеянии, для использования в системе однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ). В среде Geant4 проведено Монте-Карло моделирование работы ячейки гамма-камеры.

Модель состоит из точечного источника Тс-99m [2], двух сцинтилляторов SrI2 [3] с поперечными размерами 50 x 50 мм толщиной 4 мм и 6 мм, и двух виртуальных детекторов с аналогичными поперечными размерами. Виртуальные детекторы разбиты на ячейки с размерами 5 x 5 мм, представляющими собой матрицу SiPM. Расстояние между сцинтилляторами – 33 мм, расстояние между источником и первым сцинтиллятором – 52 мм. Разработана методика реконструкции положения источника на основе измерения потерь энергий гамма-квантов в первом сцинтилляторе и координат взаимодействия гамма-квантов со сцинтилляторами [4].

В результате моделирования показана возможность использования системы в ОФЭКТ на основе комптоновского рассеяния: эффективность регистрации выше на 2 порядка по сравнению с классическими гамма-камерами [5], полученное в моделировании пространственное разрешение составило $\sigma \sim 2.1 - 3$ мм.

Литература

- [1]. L.J. Harkness, et al. “A Compton camera application for the GAMOS GEANT4-based framework”
- [1]. R. J. Kowalsky, S. W. Falen. “Technetium-99m Radiopharmaceuticals: Status and Trends”

- [2]. V.A. Pustovarov, et al. “A luminescence spectroscopy study of scintillation crystals SrI_2 doped with Eu^{2+} ”
- [3]. Kim S. M., et al. (2013). “Resolution recovery reconstruction for a Compton camera.
- [4]. J. C. Dickson, et al. “EANM practice guideline for quantitative SPECT-CT”

ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА СЧИТЫВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО ГАММА-ЗОНДА

Лапшин М.А., Канцырев А.В., Богданов А.В., Голубев А.А.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, lapshin.mm.aa@gmail.com

Одним из перспективных методов радионуклидной диагностики является использование компактных гамма-зондов [1], позволяющих определять локализацию радиофармпрепарата при сканировании исследуемой зоны организма. Такой метод применим при поиске злокачественных новообразований кожи, лимфоузлов, молочных желез и других мягких тканей. Применение гамма-зондов позволяет существенно снизить инвазивное воздействие на пациента, что особенно важно в послеоперационный период, а также ускорить процессы выздоровления.

В данной работ разработан макет гамма-зонда и прототип электронной схемы для регистрации гамма-излучения на основе сцинтиллятора LYSO, кремниевого фотоумножителя SiPM MicroFC-30035-SMT с усилителем, компаратора с ЦАП и микросхемы программируемой логики ПЛИС (FPGA Xilinx Artix 7). Применение микросхемы FPGA [2] и SiPM позволяет эффективно обрабатывать поступающие данные в режиме реального времени и минимизировать размер электронной схемы гамма-зонда. Сцинтиллятор LYSO, обладает большим световыходом и быстродействием при регистрации гамма-излучения. На языке программирования Verilog разработано программное обеспечение для считывания сигналов от SiPM и передачи данных на персональный компьютер (ПК) через USB порт. Программное обеспечение ПК, разработанное на языке Python, позволяет проводить калибровку регистрирующей схемы и организовывать процесс измерения гамма-излучения радиофармпрепарата при пространственном сканировании зоны поиска опухоли.

Проведено тестирование макета гамма-зонда и электронной схемы при сканировании тестового объекта с точечным радиоактивным источником гамма-излучения, получена пространственная картина позиции источника гамма-излучения.

Литература

- [1]. Povoski S. P. et al., World journal of surgical oncology. 2009. T. 7. C. 1-63.
- [2]. E Fysikopoulos, et al., Journal of Instrumentation, V. 8, 2013

ВОЗМОЖНЫЕ ЦИКЛЫ КВАЗИЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ

Вовкинский Е.Г., Чирков А.Ю.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, evgeny.vovkivsky@yandex.ru

Ядерные реакции при взаимодействии протонов с легкими элементами потенциально позволяют реализовать схемы безнейтронного ядерного синтеза с выходом энергии. По-видимому, впервые такая безнейтронная реакция ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$ (выход 17.3 МэВ) была реализована Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном в 1932 году на созданном ими ускорителе сравнительно простой конструкции. Р.Ф. Постом предлагалось использовать реакцию ${}^6\text{Li}(p, {}^3\text{He})\alpha$ для производства изотопа ${}^3\text{He}$ в цикле совместно с реакцией ${}^3\text{He}(D,p)\alpha$. Безнейтронный цикл Поста «симметричен» циклу Джеттера, реализующему производство энергии на основе «традиционной» для термоядерного синтеза реакции $T(D,n)\alpha$. Наконец, сейчас наблюдается новый всплеск интереса к безнейтронной реакции ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ [1]. Указанные безнейтронные «протонные» реакции, на первый взгляд, не приводят к радиоактивности, что рассматривается как преимущество по сравнению с традиционной D–T-реакцией, основной продукт которой – нейтрон с энергией ~14 МэВ. При низких энергиях (до 100 кэВ) сечения «протонных» реакций менее 0.1 барн, поэтому в рамках термоядерного синтеза эффективное производство энергии вряд ли возможно. Так, для наиболее эффективной из них реакции $p-{}^{11}\text{B}$ усиление в термоядерной плазме даже при оптимистических предположениях ~5 [2].

В настоящем исследовании рассматриваются возможности возбуждения указанных безнейтронных реакций ускоренными частицами в плотной среде. Такие условия реализуются в лазерной плазме, а также в плазме Z-пинча и плазменного фокуса. Однако, при высоких энергиях могут интенсивно протекать реакции с участием продуктов основной реакции. В таких вторичных реакциях рождаются в том числе нейтроны, поэтому цикл производства энергии уже не будет безнейтронным. В

частности, В.С. Беляевым и соавторами предложен цикл на основе $p\text{--}^{11}\text{B}$ -реакции, в котором нейтроны от вторичных реакций утилизируются в реакции с ^{10}B [3]. Так как в $p\text{--}^{11}\text{B}$ -реакции рождается три α -частицы, то вторичные реакции в бороводородном цикле Беляева производят более одного протона. То есть возможно своего рода размножение. В цикле на основе реакции $p\text{--}^6\text{Li}$ во вторичных реакциях рождаются протоны, но без размножения. Для поддержания такого цикла необходима компенсация соответствующих потерь, которая и будет определять усиление в системе. Для бороводородного цикла эффективность размножения промежуточных «реагентов» будет определяться интенсивностью утечек частиц из реакционного объема. В условиях, когда утечки сравнительно малы, возможна инициация цикла малой порцией быстрых частиц и, соответственно, многократное усиление энергии.

Литература

- [1]. Vovkivsky E.G., Chirkov A.Yu. //Plasma Phys. Rep. 2025. V. 51. P. 21–35.
- [2]. Chirkov A.Yu., Vovkivsky E.G. // J. Fusion Energy. 2025. V. 44. 5.
- [3]. Беляев В.С., Крайнов В.П., Загреев Б.В., Матафонов А.П. // Ядерная физика. 2015. Т. 78. С.580–590.

ВИРТУАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ В ВАРЬИРУЕМОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ДО 100 ТЭВ

Скобляков А.В., Колесников Д.С., Канцырев А.В.,
Голубев А.А.

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, dinAlt220@yandex.ru

В представленной работе на языке программирования C++ разработан универсальный генератор потока мюонов над уровнем моря применимый для калибровки детекторов частиц в экспериментах в области физики высоких энергий или моделирования работы мюонных детекторов для прикладных задач, например геофизики. Для моделирования потока мюонов в диапазоне $1 < E < 105$ ГэВ используется аналитического выражение из работы [1]. Доля мюонов от полного потока при энергиях меньше 1 ГэВ составляет около 20 %, поэтому в случае использования детекторов мюонов на поверхности земли или на небольших глубинах в грунте/конструкционном материале необходимо учитывать низкоэнергетичную часть мюонного спектра. Для этого была создана полномасштабная модель атмосферы [2,3] высотой ~ 31 км в среде Монте-Карло моделирования Geant4. Модель состояла из 42 плоских слоев. Начиная с самого нижнего слоя, каждый следующий слой обладает плотностью на 10% меньше по сравнению с предыдущим. Над верхним слоем моделировался спектр первичных космических протонов в диапазоне энергий от 0 ГэВ до 106 ГэВ [4], которые, в результате взаимодействия с атомами атмосферы, рождали вторичные частицы (в том числе мюоны). Под нижним слоем регистрировался энергетический спектр мюонов в зависимости от зенитного угла. Отличительной особенностью созданного генератора является возможность моделировать поток мюонов в варьирваемом диапазоне энергий от E_0 до 105 ГэВ, где E_0 - варьирваемый энергетический порог, что значительно сокращает время моделирования в сравнении с традиционными генераторами (например CRY[5]).

Литература

- [1]. Bogdanova, L., et al. Physics of Atomic Nuclei. 2006, V. 69, P. 1293 - 1298.
- [2]. 1976 US Atmosphere Model, URL - https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/online-publications/miscellaneous/us-standard-atmosphere-1976/us-standard-atmosphere_st76-1562_noaa.pdf
- [3]. Haggmann, Chris et al. (2007). Monte Carlo Simulation of Proton-induced Cosmic-ray Cascades in the Atmosphere.
- [4]. Papini, C. Grimani, and S.A. Stephens, Nuovo Cim C 19 , 367 (1996).
- [5]. Chris Haggmann et al., Cosmic-ray Shower Library (CRY), LLN Laboratory, 2012

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕКОВ МЮОНОВ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЮОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Панюшкин В.А., Скобляков А.В., Канцырев А.В.,
Голубев А.А.

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, vsevolod.panyushkin@itep.ru

В основе метода мюонной радиографии лежит измерение ослабления или рассеяния мюонов космического происхождения, позволяя определить плотность и структуры исследуемых объектов. Измерения основаны на определении угловых параметров треков мюонов, проходящих через мюонный детектор. Компактные цилиндрической позиционно-чувствительные детекторы мюонов [1,2] позволяют использовать их в шахтах, скважинах и других местах, где невозможно установить большие плоскостные детекторы.

В данной работе приводится численная методика восстановления траекторий треков мюонов для позиционно-чувствительного детектора, изготовленного в виде цилиндра, состоящего из трёх детектирующих слоёв, позволяющих восстанавливать трек мюона. В качестве детектирующих слоев могут быть использованы полосы, изготовленные из сцинтиллятора [1], или сцинтиллирующее оптоволокно [2]. Приводится сравнение восстановленных траекторий мюонов и траекторий, промоделированных Монте-Карло методом в среде Geant4.

Литература

- [1]. H.F. Schreiner III, Methods and Simulations of Muon Tomography and Reconstruction, PhD dissertation, The University of Texas at Austin, 2016. <https://ideon.ai>.

УЧЕТ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Колесников Д.С., Скобляков А.В., Канцырев А.В.,
Голубев А.А.

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, dstorm1@mail.ru

Информация о рентгеновском спектре излучения, эмитируемого плазмой импульсных лазерных и электроразрядных установок, необходима для понимания и описания протекающих в плазме физических процессов и построения моделей поведения вещества в экстремальном состоянии. Для регистрации рентгеновских спектров излучения в диапазоне длин волн менее 1 нм применяются кристаллические дифракционные спектрографы. Основными проблемами, препятствующими достоверному восстановлению спектров из экспериментальных данных, являются наложение сигналов от разных порядков дифракции и сложный вид аппаратной функции, зависящий от длины волны регистрируемого излучения. Для расчета аппаратной функции спектрографа в среде Geant4 разработана его виртуальная Монте-Карло модель [1], учитывающая геометрию проведения эксперимента, форму и кристаллическую структуру кристалла слюды. С использованием рассчитанных модельных спектров проведено исследование параметров аппаратной функции, получено ее аналитическое приближение. Рассчитанная аппаратная функция использована для восстановления спектров излучения плазмы.

Литература

- [1]. A. V. Skobliakov; D. S. Kolesnikov; A. V. Kantsyrev; A. A. Golubev et al, RSI, 2024, V.95, №7, DOI: 10.1063/5.0212101

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОТОКА ИОНОВ ПЛАЗМЫ

Богданов А.В., Канцырев А.В., Хурчиев А.О.,
Гаврилин Р.О., Панюшкин В.А., Голубев А.А

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, toshka87@list.ru

Измерение параметров плазменных потоков и излучения плазмы, генерируемых на мощных импульсных установках, является необходимым условием для понимания и описания физических процессов, протекающих в плазме. Для измерения энергии излучения плазмы и/или потока ионов используются калориметрические детекторы [1]. Данный вид детекторов основан на эффекте повышения температуры тонкой пластинки, принимающей излучение и поток плазмы.

Для измерения параметров излучения плазмы мега-амперного Z-пинча создан комплексный калориметрический детектор, который сочетает в себе, как функцию измерения энергии потока, так и функцию коллектора заряда (аналог цилиндра Фарадея) с временным разрешением. При разработке конструкции детектора была выбрана осесимметричная компоновка элементов. Наличие осевого отверстия в приемной пластине калориметра позволяет размещать за ним, по ходу потока ионов плазмы, магнитный спектрометр.

Регистрация разницы температур между приёмной пластиной калориметра и массивным латунным термостатом производится с помощью элементов Пельтье, соединённых последовательно. Чувствительность калориметра достигает 6.3 ± 0.3 мВ/Дж. Регистрация сигналов калориметра производится с помощью аналого-цифрового преобразователя с динамическим диапазоном 22 бит. Калибровка калориметрического детектора осуществляется встроенной системой импульсного нагрева приёмной пластины, в виде наклеенных непосредственно на пластину smd резисторов с допуском 1%.

С использованием калориметрического детектора проведена серия измерений параметров излучения и потока ионов плазмы мега-амперного Z-пинча.

Литература

- [1]. Балдина Э.Г. и др., Измерение полного пробега и удельного энерговыведения пучка ионов урана в пористых углеродных мишенях, Атомная энергия, 2004, т. 96, в. 4, с. 300.

РАСЧЕТ ЭКРАНИРОВКИ РАССЕЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТОКАМАКА Т-15МД В ИНЖЕКТОРЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОТКЛОНЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ИОНОВ

Бочарова Е.В., Баркалов К.Е., Ерёмин В.А., Исаев А. М.

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Bocharova_EV@nrcki.ru

Инжектор нейтрального пучка – система, используемая для нагрева и поддержания тока в термоядерных установках с помощью ввода быстрых атомов водорода и его изотопов. На токамаке Т-15МД [1] будут использоваться три инжектора каждый с двумя источниками ионов (ИИ) СТИС-1С [2]. Система будет работать на положительных ионах водорода и позволит инжектировать пучки с энергиями до 60 кэВ. На выходе из ИИ присутствует не только компонента H_1^+ , но и молекулярные ионы водорода H_2^+ и H_3^+ , компонентный состав на выходе которых составляет 75% : 15% : 10% соответственно.

После нейтрализации и диссоциации на газовой мишени в пучке находятся ионы и нейтралы с полной энергией инжекции E_0 , а также $E_0/2$ и $E_0/3$. Оставшиеся ионы с помощью электромагнита поворачивают в вертикальной плоскости на 180° и попадают на приемник остаточных ионов (ПОИ). Он представляет из себя V-образный калориметр, панели которого наклонены к оси пучка на 14° с целью снижения приходящей плотности мощности.

Помимо поля отклоняющего магнита, на ионные компоненты пучка оказывает влияние вертикальная составляющая рассеянного поля токамака Т-15МД: смещает вбок с оси, усложняет их перехват и изменяет профиль энергосвечения на ПОИ. Наличие пассивной экранировки нейтрализаторов и полюсов отклоняющего магнита приводят к тому, что для анализа конфигурации магнитного поля в инжекторе необходимо проводить трехмерное моделирование. Расчет был проведен для случая с максимальной вертикальной составляющей рассеянного поля, соответствующего сценарию разряда с током плазмы 2 МА [1] при энергии $E_0 = 60$ кэВ.

По проведенному расчету был выбран оптимальный ток в катушках отклоняющего магнита, обеспечивающий максимальный перехват всех ионных компонент пучка на ПОИ. Результат расчета использовался в качестве условия для детального изучения их траекторий с помощью кода BTR [3]. Такой подход позволит проводить моделирования с целью предварительной оценки режима работы отклоняющего магнита для различных сценариев токамака Т-15МД во время экспериментальной настройки инжектора.

Литература

- [1]. Хвостенко П. П. и др. Экспериментальная термоядерная установка Токамак Т-15МД //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – №. 1. – С. 15-38.
- [2]. Барсуков А.Г., Крылов А.И., Маркелов А.Ю., Панасенков А.А. и др. Разработка и экспериментальное исследование квазистационарного ионного источника СТИС-1 В сб.: XL Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 11—15 февраля 2013 г. Тезисы докладов, 2013, с. 45.
- [3]. Dlougach E., Kichik M. Beam transmission (BTR) software for efficient neutral beam injector design and tokamak operation //Software. – 2023. – Т. 2. – №. 4. – С. 476-503.

РАЗРАБОТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННОГО ВЧ ИСТОЧНИКА

Воинцев В.А., Шиховцев И.В.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, vointsev1998@mail.ru*

Инжекторы быстрых атомов широко используются в различных термоядерных установках для нагрева и диагностики плазмы. Процесс формирования атомарного пучка в инжекторах начинается с ионного источника [1], в котором создается плазма, из которой при помощи системы электродов, называемой ионно-оптической системой (ИОС), вытягиваются и ускоряются положительные или отрицательные ионы.

В Институте Ядерной Физики для квазистационарного токамака с реакторными технологиями TRT разрабатывается нагревной инжектор, в конструкцию которого заложен поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов с энергией 120 кэВ и длительностью работы до 100 с [2]. Для генерации плазмы в данном источнике используются четыре высокочастотных (ВЧ) индукционных драйвера, присоединённых к расширительной камере под углом 29° к центральной оси источника для равномерного распределения плазмы возле электродов ИОС. В расширительной камере возле электрода установлен магнитный фильтр, наличие которого, с одной стороны, способствует улучшению генерации отрицательных ионов и подавлению вытягиваемых электронов [3], с другой, может приводить к существенной анизотропии плотности плазмы вблизи ИОС и, соответственно, плотности вытягиваемого ионного тока, а также негативно влиять на генерацию плазмы в ВЧ драйверах [4].

Для исследования способов оптимизации параметров плазмы в источнике и для изучения влияния магнитного фильтра ведется разработка диффузной-дрейфовой модели плазмы в разрабатываемом источнике. В данном докладе показаны предварительные результаты моделирования разряда в источнике длительностью до 10 мс, а также проводится сравнение с результатами стендовых измерений

распределений плотности ионного тока на выходе драйверов и вблизи ИОС.

Литература

- [1]. R. S. Hemsworth, T. Inoue. Positive and negative ion sources for magnetic fusion // IEEE TPS 33(6), 1799 – 2005.
- [2]. Yu. I. Belchenko et al. Possible Scheme of Atomic Beam Injector for Plasma Heating and Current Drive at the TRT Tokamak // PLASMA PHYSICS REPORTS Vol. 47. 2021.
- [3]. R. Zagórski et al Influence of different magnetic configurations on plasma parameters in SPIDER device // 2023 JINST 18 C08008.
- [4]. N. Marconato et al., “An optimized and flexible configuration for the magnetic filter in the SPIDER experiment,” Fusion Eng. Des., vol. 166, May 2021, Art. no. 112281

ВРЕМЕННАЯ КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА

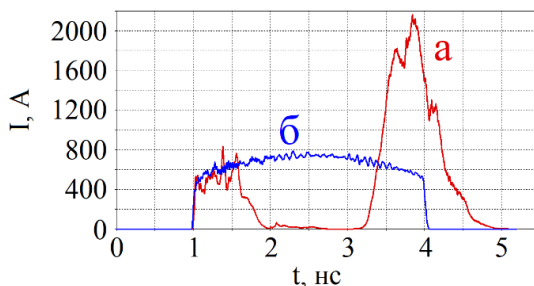
Донец А.Е., Рогожин В.И., Раваев А.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, donets@triniti.ru

Представлена идея экспериментальной реализации виртуального катода (ВК) в аксиально-симметричной конфигурации магнитоизолированного диода с двойным катодом.

Для создания ВК в системах с сильноточными релятивистскими электронными пучками (РЭП), формируемыми взрывоэмиссионными катодами, необходима пространственно-неоднородная область транспортировки РЭП. В аксиально-симметричных устройствах с сильноточными РЭП, транспортируемыми в сильном продольном магнитном поле, обычно для создания ВК на некотором расстоянии от катода увеличивают радиус полого заземленного лайнера (трубы дрейфа). Такой подход не позволяет при постоянстве энергии электронов и полного тока РЭП легко менять параметры ВК, поскольку требует изменения размеров лайнера, связанных с размерами вакуумной камеры и соленоида, создающего магнитное поле.

В настоящей работе предложено создавать ВК в конфигурации, напоминающей двойной коаксиальный катод [1], часто применяющийся в сильноточной релятивистской электронике для регулировки тока РЭП. В отличие от этого известного случая, здесь в качестве рабочего катода, формирующего РЭП, используется внешний электрод. Внутренний электрод имеет неоднородную по длине форму, изменяющую потенциал коаксиального с ним РЭП вплоть до образования ВК. С точки зрения эксперимента в предложенной конфигурации изменять параметры ВК значительно проще, чем при традиционном подходе.



Моделирование формирования и распространения РЭП проводилось для фиксированных параметров источника электронов, магнитного поля и лайнера и для различных размеров и форм внутреннего электрода. Один из результатов моделирования продемонстрирован на рисунке – компрессия электронного пучка (а), который запирается на время порядка 1 нс, т.е. прекращается течение тока, после чего накопленный заряд в течение короткого промежутка времени вылетает в область дальнейшего распространения с током, превосходящим ток РЭП без ВК (б).

Предложенная схема создания ВК может быть эффективна для создания электронных пучков с управляемыми временными характеристиками. Регулировка длительности импульсов тока сильноточных РЭП наносекундной длительности обычно осуществляется с помощью срезающих или обостряющих разрядников, но такой подход связан с ограничением общего энергосодержания пучков. Явление компрессии РЭП в конфигурации диода с ВК открывает новые возможности для повышения импульсной мощности пучков и, как следствие, повышения мощности формируемых с их помощью СВЧ-импульсов.

Работа выполнена в инициативном порядке.

Литература

- [1]. Нечаев В.И., Солуянов Е.И., Фукс М.И., Письма в ЖТФ, 5(2): 113-117 (1979)

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ГАЗОВОГО СОСТАВА ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПО ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ

Преображенский Е.И., Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А.,
Чекмарев Н.В.

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, evgenypr@ipfran.ru*

Газовые разряды, инициируемые СВЧ-излучением, представляют значительный интерес для прикладной физики плазмы. Одним из основных применений таких разрядов является проведение плазмохимических реакций [1], в частности, разложение углекислого газа [2]. Однако многообразность физических процессов, а также высокая стоимость и сложность оборудования, делают актуальным поиск альтернативных методов анализа. В этой связи методы машинного обучения открывают новые возможности для анализа параметров разряда без использования дорогостоящего оборудования.

В данной работе исследовалось применение машинного обучения для прогнозирования выходных концентраций продуктов плазмохимической конверсии CO_2 по оптическим спектрам. Установка представляла собой кварцевую трубку, которая была совмещена с СВЧ волноводом [3]. В качестве плазмообразующего газа использовался CO_2 . Плазма генерировалась СВЧ излучением магнетрона с частотой 2.45 ГГц и мощностью до 3 кВт. Разряд атмосферного давления представлял собой шнур с диаметром 10 мм, а длиной 30 мм. Для анализа продуктов разложения CO_2 использовался газоанализатор, работающий в непрерывном режиме. Одновременно проводилась регистрация спектров плазмы в диапазоне от 350 до 1000 нм.

Для численных расчётов выбирались стационарные режимы разряда. Из спектра выбирались точки, которые имеют максимальную корреляцию с концентрациями компонент выходной смеси, в первую очередь CO . По этим значениям строились линейная и многослойная

регрессионные модели при помощи библиотеки sklearn python. Результаты показали, что данные методы позволяют с приемлемой точностью прогнозировать концентрацию СО по значениям мощности, потоков газов и спектрам. Это открывает возможность отказаться от дорогостоящего газоанализатора в пользу оптических измерений в сочетании с машинным обучением.

Литература

- [1]. Полак Л.С., Овсянников А.А., Словецкий Д.И., Вурзель Ф.Б. Теоретическая и прикладная плазмохимия. М.: Наука, 1975.
- [2]. Chekmarev, N. V., Mansfeld, D. A., Vodopyanov, A. V., Sintsov, S. V., Preobrazhensky, E. I., & Remez, M. A. (2024). Enhancement of CO2 conversion by counterflow gas quenching of the post-discharge region in microwave plasma sustained by gyrotron radiation. *Journal of CO2 Utilization*, 82, 102759. DOI: 10.1016/j.jcou.2024.102759
- [3]. Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский (2025). Конверсия углекислого газа в плазме СВЧ-разряда с закалкой встречным потоком газа. *Письма в ЖТФ*, 2025, том 51, вып. 7. DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60077.20162

АСТРОФИЗИКА И ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ, ФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОЛЬГИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТКИМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Седов М.В.^{1,2}, Алхимова М.А.^{1,2}

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*НИИЯУ «МИФИ», Москва*

Важной задачей и основной сложностью при экспериментальном изучении вещества с высокой плотностью энергии является детектирование его параметров: определение давления, температуры и плотности [1]. При нагреве вещества с помощью мощных лазерных импульсов одним из основных методов определения температуры и плотности плазмы является рентгеновская спектроскопия [2,3]. Стоит отметить, что в большинстве проводимых экспериментов с фемтосекундной лазерной плазмой, измеренные рентгеновские спектры являются интегральными по времени и пространству. Из анализа интегральных спектров можно определить только температуру и плотность плазмы, которые будут давать наибольший вклад в измеренный спектр. Для дополнительного анализа эволюции горячей сверхплотной плазмы хорошо подходят численные методы, в частности метод частиц-в-ячейке (Particles in cells, PIC).

В данной работе приведены результаты численного расчета (с помощью пакета EPOCH [4]) и аналитические оценки взаимодействия ультрарелятивистского ($I_{\text{las}} \sim 5 \times 10^{21}$ Вт/см²) лазерного импульса фемтосекундной длительности со стальными фольгами толщиной $h \sim 1$ -5 мкм. Выполненные расчёты подтверждают результаты эксперимента, представленного в работе [3], где плотность энергии на мишени $We = 1.2$ ГДж/см³ была оценена из параметров плазмы, определенных рентгеноспектральным методом. С помощью численного PIC расчета показано, что при рассматриваемой лазерной интенсивности действительно формируется плазма со сверхвысокой плотностью энергии (≥ 1 ГДж/см³): ее объём достигает 50 мкм³ (при диаметре фокального

пятна 2 мкм и толщине мишени 5 мкм), а время жизни достаточно продолжительное $t \sim 500$ фс. Из разработанной аналитической модели диссипации поглощенной лазерной энергии в фольге конечной толщины для интенсивности 5×10^{21} Вт/см² получены оценки скорости переноса энергии из фокального пятна ($v \approx 0.15$ с).

Литература

- [1]. Fortov, V. E. Extreme States of Matter High Energy Density Physics. Springer Series in Materials Science, 2016.
- [2]. B. F. Kraus et. al. // Physical Review Letters. 2021. V. 127. № 20. P. 205001
- [3]. M. Alkhimova et. al. // Matter and Radiation at Extremes. 2024. V. 9. № 6.
- [4]. T. D. Arber et. al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2015. V. 57. № 11. P. 113001

РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С 10^{22} Вт/см²

Алхимова М.А.¹, Скобелев И.Ю.¹, Вишняков Е.А.²

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

На сегодняшний день, исследование природы и свойств вещества (плазмы), формируемого под воздействием ультраинтенсивных лазерных импульсов, представляет огромный интерес, как с точки зрения фундаментального знания о природе нашей вселенной, так и с точки зрения практического применения в качестве мощного эмиссионного источника рентгеновского, гамма и корпускулярного излучений в медицинских и прикладных задачах. Для плазмы, формируемой под воздействием высококонтрастного лазерного излучения с интенсивностью $\sim 10^{21}$ - 10^{22} Вт/см², характерны малые времена жизни $\sim 1 - 3$ нс в экстремальном состоянии, высокие ГВт-плотности энергии, и температуры порядка 2–5 кэВ. Одним из ключевых методов по исследованию экстремального состояния вещества и его эмиссионных свойств является рентгеновская спектроскопия с высоким спектральным разрешением.

В данной работе представлены результаты по применению рентгеновских методов диагностики для исследования плазмы стальных фольг, формируемой под действием фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью $\geq 5 \cdot 10^{21}$ Вт/см², в двух принципиально различных экспериментах. Первый эксперимент был направлен на исследования эмиссионных свойств плазмы, при взаимодействии тонких стальных фольг с высококонтрастными импульсами. А второй – на создание условий для эффективной генерации высоких гармоник и достижение режима генерации гамма-всплеска, для которых существенны параметры преплазмы.

В обоих экспериментах для измерения параметров плазмы использовались рентгеновские фокусирующие спектрометры (ФСР) на основе сферически-изогнутых кристаллов альфа-кварца. На

основе сравнения экспериментальных спектров с результатами атомно-кинетических расчетов спектров многозарядных ионов исследовано влияние, энергии лазерного импульса, величины лазерного контраста, (другими словами – влияние пре-плазмы), и толщин стальных мишеней на температуру, плотность, ионизационный состав стальной плазмы. При комплексном анализе рентгеновских эмиссионных спектров, измеренных в эксперименте с высоким лазерным контрастом, обнаружен эффект релятивистского просветления лазерной плазмы. Показана возможность формирования в области взаимодействия плазмы с плотностью энергии $\sim 1 \text{ ГВт/см}^3$. Эмиссионные характеристики спектров железа использовались также как один из диагностических способов оптимального позиционирования мишеней в области фокусировки лазерного излучения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100 ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОЩНОСТИ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Лукьяшин А.В.^{1,2}, Дёмин В.В.¹, Клепач А.Д.^{1,3}, Резни М.¹

¹НИЯУ «МИФИ», Москва, AVLukyashin@mephi.ru

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

³Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Практическое использования нейтрино для мониторинга ядерных реакторов обсуждаются ещё с 1970-х годов. Задачи дистанционного определения мощности реактора и соотношения выгорания изотопов ядерного топлива $^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ рассматривались для нейтринных детекторов на органических сцинтилляторах и использующих реакцию обратного бета-распада нейтрино на протоне (ОБР) [1]. В последние годы наблюдается большой прогресс в технологиях детекторов, основанных на обратном бета-распаде – это детекторы в масштабе тонн, установленные на поверхности земли и способные выполнять прецизионные измерения спектра нейтрино. Принципиально иной физический процесс: упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре (УКРН) было экспериментально подтверждено в 2017 году на ускорительном комплексе SNS в США, и существует ряд экспериментальных установок, направленных на наблюдение этого процесса с реакторными нейтрино. Большое сечение взаимодействия и беспороговая природа этого процесса делают возможным использование эффекта когерентного рассеяния как для фундаментальной физики, так и для прикладных задач ядерной безопасности. Одной из таких установок является двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100, который, на данный момент, имеет самую большую по массе детектирующую мишень, среди детекторов по поиску УКРН на реакторах [2]. Детектор РЭД-100 обладает высокой чувствительности к слабым сигналам ионизации и способен регистрировать ядра отдачи малых энергий. В данной работе представлен модельный расчёт изменения темпа счёта УКРН-событий в детекторе РЭД-100 в зависимости от дня топливной кампании. Представлено

сравнение скоростей счёта событий и результирующих возможностей мониторинга ядерных реакторов детекторами нейтрино, использующих в качестве физического принципа регистрации как эффект ОБР, так и эффект УКРН [3]; проведено дополнительное сопоставление этих классов детекторов. А также рассмотрен целый ряд факторов, который может оказать существенное влияние на темп счёта событий.

Литература

- [1]. Боровой А.А., Микаэлян Л.А. «Возможности практического использования нейтрино», Атомная Энергия, 1978, т. 44, вып. 6, стр. 508.
- [2]. Akimov D.Y. et al. (RED-100 Collaboration), «The RED-100 experiment», 2022 Journal of Instrumentation 17, T11011.
- [3]. Bowen M., Huber P. «Reactor neutrino applications and coherent elastic neutrino nucleus scattering», 2020, Phys. Rev. D, 102, 053008.

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Хурчиев А.О., Гаврилин Р.О., Скобляков А.В.,
Панюшкин В.А., Волков В.А., Канцырев А.В.,
Голубев А.А.

НИИ «Курчатовский институт», Москва, roman_gavrilin@mail.ru

Диагностика параметров плазмы, образующейся в сильноточных разрядах и лазерных мишенях, требует точных методов регистрации заряженных частиц и рентгеновского излучения. Пленочные детекторы Imaging Plates (IP) на основе фотостимулированного люминофора (BaFBr:Eu²⁺) широко применяются благодаря высокому динамическому диапазону и пространственному разрешению [1].

Чувствительность пленок IP 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 сигнала PSL от поглощенной энергии dE_{dep} в расчете на одну частицу для электронов и фотонов:

$$PSL(E) = \alpha \int_0^W \frac{dE_{dep}}{dz}(E, z) e^{-z/L} dz = \alpha dE_{dep}^{eff},$$

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 α зависит от типа заряженной частицы, но не зависит от её энергии. Таким образом, зная коэффициент α , можно рассчитать чувствительность пленки для широкого диапазона энергий.

В данной работе представлены результаты калибровки детекторных пленок IPBAS-MS и BAS-TR для заряженных частиц [4] и рентгеновского излучения. Калибровка проводилась с помощью радиоактивных источников и лазерного медицинского сканера VistaScan Mini View.

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

Литература

- [1]. J. Miyahara et. al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1986, V. 246, p. 572-578.
- [2]. K. Zeil, D. Kraft, A. Jochmann et. al. Rev. Sci. Instrum., 2010, V. 81, 013307.
- [3]. T. Bonnet, M. Comet, D. Denis-Petit et. al. Rev. Sci. Instrum., 2013, V. 84, 103510.
- [4]. Хурчиев А. О., Панюшкин В. А. и др. Приборы и техника эксперимента. 2023. № 6, С. 46-55.

САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ СВЕРХТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С МАГНИТНЫМ ШИРОМ

Царева О.О.¹, Леоненко М.В.¹, Григоренко Е.Е.¹,
Малова Х.В.^{1,2}, Попов В.Ю.^{1,3,4}, Зеленый Л.М.¹

¹*Институт космических исследований РАН, Москва*

²*НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

³*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

⁴*НИУ «Высшая школа экономики», Москва*

Наблюдения MMS в магнитосферном хвосте Земли подтвердили существование сверхтонких токовых слоёв (СТС), формируемых размагниченными электронами [1,2]. Эти структуры характеризуются значительным магнитным широм и интенсивными токами, параллельными магнитному полю ($\mathbf{j} \parallel \mathbf{B}$), что указывает на бессиловую конфигурацию ($[\mathbf{j} \times \mathbf{B}] = \mathbf{0}$).

Для исследования этих структур была разработана одномерная самосогласованная модель СТС [2] с учетом шировой компоненты магнитного поля и гибридной динамики электронов: размагниченные электроны описываются в квазиадиабатическом приближении, а замагниченные — в рамках МГД подхода. Магнитное поле включает самосогласованные компоненты $B_x(z)$ и $B_y(z)$, поддерживаемые токами $j_y(z)$ и $j_x(z)$, а также постоянную компоненту B_z в системе координат GSM.

Показано, что (1) интенсивные СТС при малом шире ($B_y/B_\infty \leq 0.3$, где B_∞ — амплитуда поля на границе слоя) формируются размагниченными электронами с высокой анизотропией скоростей; (2) с увеличением магнитного шира электроны замагничиваются, а токовый слой утолщается и ослабевает; (3) при сильном шире ($B_y/B_\infty \geq 0.7$) система переходит в слабосиловую конфигурацию, однако полностью бессиловая конфигурация недостижима из-за квазиадиабатической динамики частиц. Сравнение с данными MMS показывает хорошее согласие при малых B_y , однако при сильном шире наблюдаемые СТС демонстрируют нестационарность (сильные электрические поля, $|\mathbf{E}| \geq 12$ мВ/м) и требуют дальнейшего развития модели с учётом динамических процессов.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 23-12-00031.

Литература

- [1]. Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Zelenyi L.M., et al. // JGR 2021. V. 126 (11). P. e2021JA029641.
- [2]. Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E., et al. // JGR 2023. V. 128 (6). P. e2023JA031459.

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАНАДИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Голышев А.А., Молодец А.М.

ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, golyshev@icp.ac.ru

Представлены экспериментально-расчётные результаты исследования объёмно-температурной зависимости удельного электросопротивления ванадия при высоких давлениях и температурах. Экспериментальная часть работы содержит измерения электросопротивления ударно-сжатых образцов ванадия в диапазоне давлений до 70 ГПа и температур до 750 К. Проведены расчёты истории термодинамического состояния ванадия при ударном сжатии. Анализ экспериментальных результатов показал, что эффект насыщения удельного электросопротивления ванадия, имеющий место при атмосферном давлении в виде s-образной кривой 1 (см. Рис.1), сохраняется и при гигапаскальных давлениях в виде s-образных графиков 2.

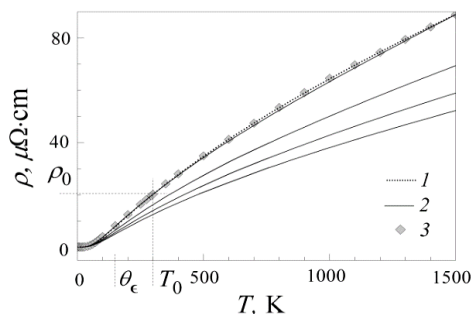


Рис.1 Высокотемпературные изобары удельного электросопротивления $\rho = \rho(V, T)$ ванадия. 1 – аппроксимация литературной экспериментальной атмосферной изобары $\rho = \rho(V_0, T)$, 2 – модельные изобары $\rho = \rho(V, T)$

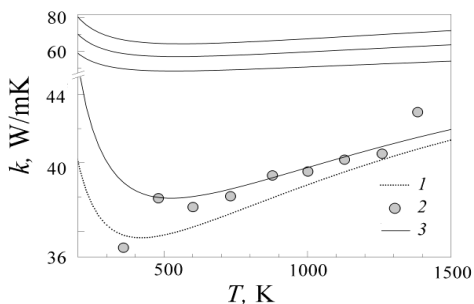


Рис.2 Высокотемпературные изобары суммарной (электронной k_e и решёточной k_l) теплопроводности $k = k(V, T)$ ванадия. 1 – модельная изобара электронной составляющей теплопроводности k_e , 2 – литературные

ванадия при различных давлениях экспериментальные данные [2], 3 – (сверху вниз) 0.0 ГПа, 20.0 ГПа, модельные изобары $k=k(V,T)$ 40 ГПа и 60.0 ГПа, 3 – ванадия при различных давлениях литературные [1] (снизу вверх) 0.0 ГПа, 20.0 ГПа, экспериментальные данные для 40 ГПа и 60.0 ГПа. атмосферной изобары.

Обсуждается полуэмпирическая трактовка закономерностей объёмно-температурной зависимости электросопротивления и теплопроводности ванадия в протяжённой области давлений и температур. Объёмно-температурная зависимость насыщения электросопротивления ванадия реконструирована в диапазоне давлений 20–60 ГПа. Количественный прогноз температурно-барической зависимости коэффициента теплопроводности ванадия показан графиками 3 на Рис.2 в диапазонах давлений 0-60 ГПа и температур 500-1300 К.

Работа выполнена в рамках Госзадания №124020600049-8.

Литература

- [1]. Desai P. D., James H. M., Ho C. Y. // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1984. – V.13. – P. 1097-1130.
- [2]. Воронин Л. К., Меркульев А. Н., Неймарк Б. Е. // ТВТ. – 1970. Т. 8, выпуск 4, С. 780-783.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВОЙ ДИНАМИКИ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛ

Кузнецов И.А., Поройков А. Ю., Шашкова И.А.,
Дольников Г.Г., Ляш А.Н., Захаров А.В., Бедняков С.А.,
Карташева А.А.

Институт Космических Исследований РАН, Москва

Солнечное ультрафиолетовое (УФ) излучение оказывает существенное влияние на динамику пылевых частиц на поверхностях безатмосферных тел, таких как Луна. Во время миссий Apollo было замечено свечение горизонта и стримеры над лунной поверхностью, что связывают с рассеянием солнечного света на заряженных пылевых частицах [1]. Зарядка пыли происходит вследствие фотоэмиссии под действием УФ-излучения и потоков солнечного ветра, приводя к электростатическим эффектам, способствующим подъему и движению пыли.

Для изучения этих процессов в лабораторных условиях нами была подготовлена серия экспериментальных исследований, направленных на оценку влияния солнечного УФ-излучения на активацию и динамику пылевых частиц реголита. В экспериментах использовались образцы, имитирующие лунный реголит, и применялись источники УФ-излучения.

Результаты показали, что при достижении определенного порогового уровня интенсивности УФ-излучения происходит зарядка пылевых частиц, приводящая к их подъему. Определены граничные условия, при которых начинается движение пылевых частиц.

Данные исследования имеют важное значение для планирования будущих космических миссий к безатмосферным телам. Понимание влияния солнечного УФ-излучения на пылевую динамику позволяет прогнозировать возможные риски для оборудования и астронавтов, а также разрабатывать меры по минимизации негативных эффектов пыли.

В докладе будут подробно рассмотрены методология проведенных экспериментов, анализ полученных данных и их интерпретация в контексте влияния солнечного УФ-излучения на динамику пылевых частиц безатмосферных тел.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 10 Экспериментальной Лабораторной Астрофизики и Геофизики НЦФМ.

Литература

- [1]. Popel, S. I., L. M. Zelenyi, and A. Yu Dubinskii. Lunar dust and dusty plasmas: Recent developments, advances, and unsolved problems. // Planetary and Space Science – 2018. – V. 156. – P.71-84.

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНАЯ МЕДИЦИНА

ПЛАЗМА + БИОМЕДИЦИНА = НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ПЛАЗМЫ И БИОМЕДИЦИНЫ

Акишев Ю.С.^{1,2}, Ермолаева С.А.², Петряков А.В.¹

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, akishev@triniti.ru

²НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва

В настоящее время во всех развитых странах мира интенсивно идет становление нового перспективного направления в биомедицине, называемого Плазменная Медицина. Речь идет о широком и разностороннем использовании слабоионизованной неравновесной плазмы атмосферного давления как нового источника биоактивных частиц для воздействия на вирусы, бактерии, простые и раковые клетки, а также на другие биообъекты с целью разработки новых эффективных технологий лечения различных заболеваний. Достижение указанной цели подразумевает тесное сотрудничество ученых и практиков, создающих источники неравновесной плазмы, с учеными и практиками из области биомедицины, использующих источники плазмы.

Данный доклад будет посвящен рассказу о свойствах неравновесной плазмы, полезных для биомедицины; о различных газоразрядных источниках, создающих такую плазму; о процессах, происходящих с биоактивными частицами при их транспортировке от плазменного источника до биообъекта, а также о задачах, стоящих перед физикой плазмы, которые необходимы решить, чтобы разработать механизмы воздействия плазмы на биообъекты. Будет дан обзор результатов, достигнутых в различных странах в области плазменной медицины.



Рис.1. Медицинский прибор на MW плазме the Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics (Germany). Прибор с использованием 6 электродов выдает холодный плазменный факел. Газ: аргон; Частота = 2,3 ГГц; Мощность = 100 W.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 24-45-20006)

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМЫ В РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ

Ермолаева С.А.¹, Акишев Ю.С.^{1,2}, Захарченко А.Е.¹,
Домнин П.А.¹, Калинин Е.В.¹, Петряков А.В.²,
Медведев М.А.^{1,2}

¹НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, drermolaeva@mail.ru

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

Факел низкотемпературной газовой плазмы (НТП) содержит композицию низкомолекулярных веществ, обладающих биологической активностью, включая заряженные частицы и активные формы кислорода и азота (АФК и АФА). В большом числе работ, опубликованных за последние 15 лет, было показано, что НТП обладает бактерицидной активностью, а также демонстрирует селективность в отношении клеток бактерий и человека, что позволяет использовать НТП для бактерицидного воздействия на ткани человека без выраженной токсичности для человеческих клеток. Более того, в экспериментальных и клинических работах было показано, что применение НТП ускоряет заживление ран и особенно эффективно при воздействии на хронические раны и язв.

Для понимания механизмов, лежащих в основе ранозаживляющего эффекта НТП, мы исследовали как ее бактерицидную активность в отношении возбудителей раневых инфекций, так и взаимодействие НТП с клетками, играющими роль в процессах регенерации мягких тканей. На лабораторных животных было показано, что единичное применение НТП позволяет уменьшить микробную нагрузку на раневой поверхности в 10-100 раз. Курсовое применение НТП позволяет ускорить элиминацию с раневой поверхности синегнойной палочки (*Pseudomonas aeruginosa*) и ускоряет стадию грануляции. В *in vitro* экспериментах было показано, что НТП ускоряет пролиферацию фибробластов в дозозависимой манере.

Исследование эффекта НТП на мезенхимальные стволовые клетки – прогениторные клетки, играющие важнейшую роль в регуляции регенеративных процессов, - показало, что НТП стимулирует их метаболическую и пролиферативную активность, а также увеличивает продукцию ими факторов роста, таких как basic Fibroblast Growth Factor (bFGF) - регуляторных молекул, стимулирующих миграцию и пролиферацию основных типов клеток, участвующих в заживлении ран. Различия в эффекте НТП в зависимости от состава плазменного факела, а также от наличия короткоживущих частиц. Разработанная экспериментальная система и полученные результаты не только важны для понимания фундаментальных основ вклада НТП в ускорение регенерации тканей человека, но и позволят в будущем оптимизировать плазменные источники, разрабатываемые для целей плазменной медицины.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 24-45-20006).

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ VITA И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Бикчурина М.И.^{1,2}, Быков Т.А.^{1,2}, Верховод Г.Д.^{1,2}, Дегтярев В.С.¹, Касатов Д.А.^{1,2}, Касатова А.И.^{1,2}, Кашеев А.А.¹, Колесников Я.А.^{1,2}, Коновалова В.Д.^{1,2}, Кошкарев А.М.^{1,2}, Остреинов Г.М.^{1,2}, Савинов С.С.^{1,2}, Сингатулина Н.Ш.^{1,2}, Соколова Е.О.^{1,2}, Солдатов А.Е.¹, Сорокин И.Н.^{1,2}, Таскаева Ю.С.^{1,2}, Шейн Т.В.^{1,2}, Шуклина А.А.^{1,2}, Щудло И.М.^{1,2} и Таскаев С.Ю.^{1,2}

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, M.I.Bikchurina@inp.nsk.su*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

В Институте ядерной физики СО РАН предложен и создан ускорительный источник нейтронов VITA, включающий в себя i) тандемный электростатический ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции (ускоритель тандем с вакуумной изоляцией) для получения моноэнергетичного пучка протонов или дейтронов энергией до 2,3 МэВ, током до 10 мА, ii) тонкую литиевую мишень для генерации мощного потока нейтронов в реакциях ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ и $\text{Li}(d,n)$, iii) ряд систем формирования пучка нейтронов для получения пучка холодных, тепловых, эпитепловых или быстрых нейтронов. Установка также генерирует α -частицы в реакциях ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$ и ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$, две яркие линии фотонов с энергией 478 кэВ и 511 кэВ в реакциях ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ и ${}^{19}\text{F}(p,e^+e^-){}^{16}\text{O}$ соответственно и позитроны в реакции ${}^{19}\text{F}(p,e^+e^-){}^{16}\text{O}$.

Установку используют для разработки методики бор-нейтронозахватной терапии, включая изучение влияния нейтронного излучения на клеточные культуры и лабораторных животных, разработку средств и методом дозиметрии, тестирование новых препаратов адресной доставки бора, лечение домашних питомцев со спонтанными опухолями, для разработки методики литий-нейтронозахватной терапии, для детального изучения радиационного блистеринга при имплантации протонов, для измерения сечения

ядерных реакций, для радиационного тестирования материалов и для ряда других приложений.

В докладе будет дано описание установки, представлены и обсуждены полученные результаты, заявлены планы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОСОВМЕСТИМОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОПОРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ СТРУКТУР, СОЗДАННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ. В ИМПЛАНТАХ И РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ

Будаева М. В.^{1, 2}

¹ЧУ «ИТЭР-Центр», Москва, m.budaeva@iterrf.ru

²НИУ «Московский физико-технический институт», Долгопрудный

В медицине для изготовления имплантатов и кардиостимуляторов требуется использование металлов, в том числе титана. Материалы для медицинских применений должны соответствовать целому ряду требований, таких как биосовместимость, включая отсутствие цитотоксичности. Пролиферативная способность клеток зависит от поверхности, на которой они будут расти, что напрямую связано с иммунным ответом организма, см. напр. [1]. Титановые материалы с пористой поверхностью необходимы для использования в качестве материалов для каркасов в тканевой инженерии, для кардиоэлектродов. Плазменная обработка титановых материалов [2] изменяет их поверхность, обеспечивая формирование шероховатости и нанопористости, что приводит к новым физическим и химическим свойствам, полезным для медицинских применений, в том числе для изготовления кардиостимуляторов с улучшенными характеристиками.

Образцы титановых нанопористых материалов, полученных путем плазменной обработки в установке ПЛМ-М, были протестированы на геропротекторную активность на модельной системе живых нематод *Caenorhabditis elegans*. Результаты показали, что по сравнению со стандартной гладкой пластиковой поверхностью культуральных планшетов продолжительность жизни нематод была выше у особей, содержащихся в ячейках с титановыми нанопористыми образцами. Было проведено тестирование пролиферативной активности мезенхимальных стволовых клеток, адгезированных на нанопористую титановую

поверхность, в сравнении с пластиковой поверхностью планшетов; пролиферативная активность клеток оказалась выше в случае нанопористого титана. Результаты исследования нанопористых титановых материалов, полученных при плазменной обработке, показали возможность снижения иммунного ответа при их имплантации, что перспективно для их применения в имплантах, электрокардиостимуляторах, протезах и медицинских стимуляторах.

Литература

- [1]. Kovylin R., Baten'kin M., Kulikova T., Egorikhina M., et al. Biocompatible Non-Toxic Porous Polymeric Materials Based on Carbonate- and Phthalate-Containing Dimethacrylates. *Chemistry Select.* 2019, 4, 4147-4155.
- [2]. Budaev V. P., Fedorovich S. D., Martynenko Yu. V., Egorikhina M. N., Karpov A. V., Gubkin M. K., Budaeva M. V., Lazukin A. V., Marchenkov A. Yu., Plasma technology for creating highly porous titanium materials for biocompatibility testing, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020, 1683, 032015.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКЛИКА КАРДИОЭЛЕКТРОДА НА ИМПУЛЬС СТИМУЛЯЦИИ

Каракаш М.Н., Нагель М.Ю.

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва,
karakash.mn@phystech.edu, mifst04nmy@mail.ru*

Эндокардиальная электростимуляция – метод лечения заболеваний, связанных с аритмией сокращения миокарда, начал развиваться с 60-х годов прошлого столетия и широко применяется в настоящее время. Для стимуляции сердечных сокращения на вживляемый в миокард катод подаются отрицательные импульсы напряжения [1, 2].

Одним из методов исследования электрохимических систем является импедансная спектроскопия, или же метод амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ). Его активно применяют в том числе и для исследования двойного электрического слоя (ДЭС), возникающего на кардиоэлектроде при взаимодействии с биологическими тканями. Из спектра можно извлечь важные физические показатели электрода, такие как ёмкость, КПД [3].

В данной работе система «электрод + ДЭС» рассматривается как элемент в эквивалентной схеме, чей импедансный спектр получен в эксперименте. Затем с помощью разложения подаваемого импульса с генератора в ряд Фурье по гармоникам можно моделировать отклик электрода, как сумму откликов на отдельные гармонические сигналы.

Исследование позволило выявить набор характерных частот процессов, протекающих на кардиоэлектроде при его работе на примере платинового электрода в растворе NaCl 1%. Получена возможность количественной оценки нелинейности ДЭС, как элемента электрической цепи, а также расчёта времени деполяризации электрода. Показана качественная зависимость отклика от максимального количества используемых гармоник. Дальнейшие модификации метода включают в себя, например, линеаризацию

уравнений, описывающих эволюцию токов и напряжений в соответствующей эквивалентной схеме.

Литература

- [1]. Бокерия О. Л. Кардиостимуляция. Большая российская энциклопедия.
- [2]. Шальдах М. Электрокардиотерапия. – СПб: «Северо-Запад», 1992.
- [3]. Обрезков О.И., Базылев В.А., Мартыненко Ю.В, Нагель М.Ю. Оценки функциональных свойств тонкопленочных материалов для покрытий электродов кардиостимуляторов. Медицинская техника//2022. № 1. С. 331.

ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ВОДЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ АДЬЮВАНТА

Моряков И.В.¹, Воробьев Д.С.^{2,3}, Заклецкий З.А.¹,
Анпилов А.М.¹, Гусейн-заде Н.Г.¹

*¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
igor_miw@mail.ru*

²ФГБНУ НИИВС им. И.И. Мечникова, Москва

*³Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ
(Сеченовский Университет), Москва*

В последнее время интенсивно ведутся разработки с целью увеличения иммуногенности вакцин и сывороток. На текущий момент единственные разрешенные соединения (адъюванты) для усиления иммунного ответа у человека изготавливают на основе солей алюминия (соли, гидроксид и фосфат алюминия). В тоже время механизм действия адъювантов сложен и исследован не в полной мере. Известно, что антиген (АГ) из вакцины или сыворотки прикрепляется к адъюванту. Это приводит к тому, что АГ лучше разносится по организму и, увеличивается время взаимодействия клетки с вводимым АГ. Также при взаимодействии АГ с наночастицами увеличивается молекулярная масса возникшего комплекса [1]. Тем самым улучшается распознавание АГ антигенпрезентирующими (дендритными) клетками.

В предлагаемой работе коллоидный раствор гидроксида алюминия ($\text{Al}(\text{OH})_3$) в воде был получен при реализации периодического импульсного высоковольтного разряда в жидкости с металлическими гранулами алюминия в межэлектродном пространстве. При подаче высоковольтного напряжения в местах неплотного контакта электродов и металлических гранул возникают микроплазменные образования, приводящие к распылению материала электродов и металлических гранул. При этом в каждом разрядном промежутке в жидкости образуется парогазовая область, что приводит к перемещению металлических гранул после каждого высоковольтного импульса. Получаемая фракция

наночастиц – гидроксид алюминия в двух кристаллических фазах Байерит и Гиббсит, характерный размер ~25 нм.

В дальнейшем была проведена серия экспериментов по измерению сорбции белков (количественная характеристика, которая позволяет численно оценить взаимодействие АГ с адьювантом) и наночастиц коллоидного раствора. Наилучшее значение сорбции рекомбинантного белка и наночастиц $Al(OH)_3$ была получена при массе твердого вещества в коллоидном растворе ~ 1 г в 80 мл [2] и составила 90% – что соответствует лучшим зарубежным препаратам. Эксперименты на лабораторных животных (мышях) продемонстрировали высокую степень выработки антител на вводимую вакцину с адьювантом на основе коллоидного раствора $Al(OH)_3$ – после трехкратной иммунизации животных антитела были обнаружены при максимальном разбавлении сыворотки в 25 тыс. раз.

Литература

- [1]. Olga N. et al. Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology, 2023; 699:661; DOI: 10.36233/0372-9311-342
- [2]. Заклецкий и др., Сборник тезисов докладов ICPAF-2025, DOI: 10.34854/ICPAF.52.2025.1.1.216

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЙОДИДА ЦЕЗИЯ ГАРНИСАЖНЫМ МЕТОДОМ

Салаватов Н.А.¹, Аркадов Н.М.^{1,2}, Смирнов Г.В.^{1,2},
Ермоченкова А.В.¹, Юрасова О.В.¹

¹АО "Гипердмет", Москва, nasalavatov@rosatom.ru

²НИУ «Московский энергетический институт», Москва

Одним из высокочувствительных методов диагностики в ядерной медицине является однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ). Как следует из названия в ОФЭКТ используются радиофармпрепараты, меченные радиоизотопами, которые испускают только один гамма-квант за один акт радиоактивного распада. После введения препарата дальнейшее сканирование позволяет получить подробное 3D-изображение. Основными областями применения ОФЭКТ являются диагностика при онкологии и инфекциях, измерение мозгового кровотока, а также исследование работы сердца.

Основой детекторов в ОФЭКТ служат щелочно-галогенидные сцинтилляционные кристаллы. Выбор связан с их свойствами и относительно низкой ценой производства. Нами в качестве сцинтиллятора для детектора ОФЭКТ был выбран йодид цезия. Такой выбор обусловлен показателем энергетического разрешения, который достигает ~6% для γ -662кэВ Cs^{137} при уровне светового выхода 40 000–60 000 фотонов на 1 МэВ, и очень низкой гигроскопичностью, вследствие чего отсутствуют проблемы, связанные с обработкой материала и его применением, которые встречаются у гигроскопичного NaI.

Общей проблемой широко используемых методов получения галогенных кристаллов является контакт расплава с материалом тигля, что требует использования специальных дорогих материалов для его изготовления. В связи с этим существенно возрастают затраты на производство таких кристаллов. Мы предлагаем альтернативный выход из этой ситуации – использование гарнисажного метода получения кристаллов. Гарнисаж – это особый слой шихты между расплавом и тиглем, который позволяет предотвратить контакт расплава с тиглем,

что позволяет использовать более дешевый материал для тигля, а также минимизировать возможное загрязнение примесями от контакта с тиглем. Еще одним достоинством этого метода является его простота в масштабировании.

Нами была создана лабораторная установка для выращивания поликристаллического CsI, легированного Na, с использованием шихты массой 250–300 г. Определен оптимальный тепловой режим для этого процесса, который состоит из нагрева, выдержки при определённое время при определенной температуре (крышка тигля – 850-880 °С, боковая стенка и днище тигля – от 560 до 600 °С) и медленного охлаждения. Установлено, что лимитирующей стадией, влияющей на качество полученных кристаллов, является начало процесса охлаждения, когда происходит зарождение кристаллов и их начальный рост. Для того чтобы получаемые образцы поликристаллов CsI(Na) по своей геометрии могли быть применены в детекторах ОФЭКТ нами исследован и использован метод горячего прессования. В результате были получены поликристаллы CsI с необходимыми геометрическими характеристиками. Установлены оптимальная температура и продолжительность процесса прессования поликристаллических образцов.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ КРАНИОПЛАСТИКИ И ДРУГИХ НЕНАГРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ КОСТНОЙ ТКАНИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УСИЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Плахотнюк Е.Д.¹, Волик Т.В.¹, Тен Д.В.¹, Горячева Я.А.²,
Хохлов Н.В.², Миллер М.А.², Сенатов Ф.С.¹

¹НИТУ «МИСИС», Москва

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, edplakhotnyuk@triniti.ru

В реконструктивной хирургии остро стоит задача создания индивидуальных имплантатов, сочетающих механическую прочность и высокую биоактивность для замещения дефектов черепных костей и других ненагружаемых участков. Металлические сетки надёжно фиксируют фрагменты, но не стимулируют остеогенез, тогда как биокерамика обладает остеокондуктивными и остеоиндуктивными свойствами. [1,2] Цель исследования — разработать технологию изготовления уникальных имплантатов из диоксидной керамики, оптимизированных по составу для самостоятельного применения и для интеграции с металлическими каркасами.

Для изготовления образцов был разработан ряд керамических композиций на основе CaCO_3 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в относительных пропорциях от 90/10 до 20/80. После прессования образцы подвергали двухэтапному спеканию при 600 °С и 1100 °С. [3] Морфологию и пористость анализировали методом СЭМ, состав — энергодисперсионным анализом, механические свойства — при трёхточечном изгибе.



Образец с соотношением $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2 = 90/10$ продемонстрировал оптимальный баланс: прочность изгиба 46,25 N при минимальной пористости. Увеличение доли $\text{Ca}(\text{OH})_2$ снижало пористость, однако выше 50 % это приводило к падению прочности ниже клинических требований. ЭДС-анализ показал, что рост содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ уменьшает концентрацию кислорода в матрице, что связано с сокращением газообразных продуктов спекания и образованием более плотной структуры.

Предложенный материал сочетает прочность и биоактивность, делая его пригодным для краниопластики как самостоятельный имплантат или в сочетании с металлическим каркасом. Подход позволяет получать изделия сложной индивидуальной формы и снижает риск послеоперационных осложнений. В дальнейшем планируется внедрение 3D-моделирования для персонализированного производства и проведение доклинических испытаний *in vivo* для оценки интеграции и безопасности.

Литература

- [1]. Fedor Senatov et al. Designing of Porous PMMA/Diopside Bone Cement for Non-Load Bearing Applications. // Journal of Asian Ceramic Societies. – 2020. – №8(3). – P. 862–872
- [2]. Nicoara, A.I et al. Fabrication and Characterization of Porous Diopside/Akermanite Ceramics with Prospective Tissue Engineering Applications // Materials. – 2023. – №16.
- [3]. Скрипова П. Н., Сиротенко Л. Д. Гелевое литье керамических материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – №1.

ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНЕННОЙ/СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В РАБОТЕ С ИНОРОДНЫМИ ТЕЛАМИ

Гребенюк Е.А.¹, Змитриченко Ю.Г.¹, Иванов В.М.²,
Коржук М.С.³, Точильников Г.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, office@smtu.ru

²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, office@spbstu.ru

³Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, vmeda-na@mil.ru

Дополненная реальность (ДР; augmented reality, AR) является синтезом визуальной информации с объектами реального мира при помощи специальных технических устройств, в то время как смешанная реальность (СР, mixed reality MR) – это возможность воздействия на реальные объекты, используя данные ДР.

Целью данного исследования было изучение потенциала интраоперационного применения технологий дополненной/смешанной реальности при работе с инородными телами (ИТ).

В исследовании использовались современные системы AR, такие как Microsoft HoloLens, и специализированные программные решения для визуализации анатомических структур в реальном времени. Методология включала клинические случаи, в которых были применены данные технологии.

Полученные в результате сегментации координаты залегания инородного тела от поверхности кожи были объединены с анатомическими структурами тела с помощью технологии дополненной реальности. Это позволило наглядно увидеть анатомо-топографическое положение ИТ. В данных клинических случаях, после сегментирования данных КТ и 3D-моделирования, были выявлены топографические особенности, которые определили тактику лечения.

Сегментация данных компьютерной томографии позволяет распознавать анатомические объекты, а также их взаимосвязь.

Наложение 3D-моделей на реальные объекты с использованием технологии дополненной реальности позволяет точно определить топографо-анатомическое расположение инородного тела. Это направление в хирургии помогает оптимизировать тактику лечения, снижать риск осложнений и сокращать время операции.

Литература

- [1]. А.В. Лысенко, А.Я. Разумова, А.И. Яременко, В.М. Иванов, С.В. Стрелков, Применение технологии дополненной реальности при оперативных вмешательствах на верхней челюсти. Клинический случай // Институт стоматологии № 3 (92), 2021, с.30-32 (ВАК)
- [2]. Гребеньков В.Г., Румянцев В.Н., Иванов В.М., Суров Д.А., Стрелков С.В., Коржук М.С., Балюра О.В., Святненко А.В., Дымников Д.А., Демко А.Е. Опыт применения технологии дополненной реальности в хирургическом лечении больных первичными и рецидивными опухолями органов малого таза // Вестник Российской военно-медицинской академии. - 2022. - Т. 24. - №4. - С. 697-706. doi: 10.17816/brmma112505

МЕТОДИКИ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРА

Кончечков Е.М.^{1,2}, Павлик Т.И.¹, Бурмистров Д.Е.¹,
Серов Д.А.¹, Гудкова В.В.^{1,2}, Грудиев Е.И.²,
Конькова А.С.¹, Богачев Н.Н.¹, Гусейн-заде Н.Г.¹

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
konchekov@fpl.gpi.ru*

²*РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва*

В современной биомедицинской практике все большее внимание уделяется методикам, применяющим низкотемпературную плазму (НТП) для модификации биологических структур и дезинфекции поверхностей. Деструктивное воздействие на липидные оболочки клеток и генетический материал обеспечивают выраженный антимикробный потенциал в отношении широкого спектра инфекционных агентов. Также перспективным направлением исследований стало создание функциональных жидкостей, обогащенных с помощью НТП активными формами кислорода и азота, которые сочетают терапевтическую эффективность с возможностью обработки сложных анатомических структур при минимальной инвазивности. Данный подход, в частности, открывает дополнительные возможности в таргетной онкотерапии.

В докладе демонстрируются методики обработки *in vitro* и *in vivo* биоматериалов и водосодержащих сред, направленные на подавление опухолевого роста [1], устранение бактериальных [2] и вирусных патогенов. Эксперименты проводились с использованием оригинального источника НТП "САРКО" (разработка ИОФ РАН), функционирующего в двух принципиально разных режимах. В первом случае реализован импульсный искровой наносекундный разряд в воздушной среде, обеспечивающий интенсивный синтез активных форм кислорода и азот в обрабатываемых жидкостях. Второй режим основан на формировании плазменной струи в аргонной атмосфере, что потенциально позволяет

применять технологию для деликатного воздействия на живые ткани без риска локального перегрева.

Публикация выполнена в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

Литература

- [1]. Pavlik T., Gudkova V., Razvolyaeva D., Pavlova M., Kostukova N., Miloykovich L., Kolik L., Konchekov E., Shimanovskii N., IJMS, 2023, vol. 24, no. 6, p. 5100.
- [2]. Konchekov E.M., Gudkova V.V., Burmistrov D.E., Konkova A.S., Konkova A.S., Zimina M.A., Khatueva M.D., Polyakova V.A., Stepanenko A.A., Pavlik T.I., Borzosekov V.D., Malakhov D.V., Kolik L.V., Gusein-zade N., Gudkov S.V., Biomolecules, 2024, vol. 14, no. 2, p. 181.

ДИСТОРСИОМЕТРИЯ – НОВЫЙ СПОСОБ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Змитриченко Ю.Г.¹, Коржук М.С.^{2,3}, Рябчевский В.О.⁴,
Кропачев Д.Ю.⁵, Коржук В.М.⁴, Еселевич Р.В.²,
Сизоненко Н.А.², Башкатова Е.В.¹, Гребенюк Е.А.¹,
Суров Д.А.²

¹*Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет, Санкт-Петербург, office@smtu.ru*

²*Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова,
Санкт-Петербург, vmeda-na@mil.ru*

³*НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова Минздрава России,
Санкт-Петербург, center.petrova@niioncologii.ru*

⁴*НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, od@itmo.ru*

⁵*АО НПП «Эталон», Омск, fgur@omsketalon.ru*

Дисторсиометрия — способ исследования свойств биологических объектов на основе анализа нелинейных искажений проходящего электрического сигнала, заключающийся в пропускании через биологический объект с помощью электродной системы электрического тока, отличающийся определением в целях получения информации об этом объекте спектра и уровня гармонических искажений, возникающих при прохождении сигнала через биологический объект [1].

Для оценки возможностей дисторсиометрии для медицинских целей нами использована электрическая цепь, включающая программный цифровой генератор сигнала, цифро-аналоговый преобразователь, соответствующие проводники и электроды, аналогово-цифровой преобразователь и программное обеспечение для цифрового анализа нелинейных искажений.

В ряде серии опытов была исследована возможность дисторсиометрического контроля свертывания крови человека *in vitro*. Использованы погружные стержневые электроды, зондирующий сигнал

синусоидальной формы частотой 1 кГц. Получен динамический дисторсиометрический профиль процесса свертывания. При этом динамика второй гармоники соответствует традиционной тромбоэластограмме, а третьей, вероятно, – содержанию профакторов. Наряду с этим были проведены пилотные исследования дисторсиометрических профилей опухолевого поражения мягких тканей и здоровых мягких тканей на крысиных моделях. Использован двухчастотный зондирующий сигнал 60 и 120 Гц, игольчатые электроды. Получены различающиеся дисторсиометрические профили ткани конечности, пораженной опухолью, и здоровой конечности.

Способ исследования свойств биологических объектов на основе анализа нелинейных искажений проходящего электрического сигнала – дисторсиометрии является перспективным для биологических и медицинских исследований, в том числе в онкологии, как экспресс-диагностика опухолевого роста на основании различий между совокупностями характеристик дисторсиометрических графиков пораженной опухолью ткани и гомологичной интактной.

Литература

- [1]. Коржук М.С., Кропачев Д.Ю., Гебель Е.С. и др. Способ исследования биологических объектов на основе анализа нелинейных искажений проходящего электрического сигнала. // Патент №2718296 от 01.04.2020.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Алкенова К.А., Угодчикова А.В., Кутуков А.К.,
Крайнова Е.О., Галеева К.Э., Хохлов Н.В., Байбаков Г.С.,
Миллер М.А.

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, Kaalkenova@triniti.ru

Медицинская промышленность остро нуждается в биосовместимых материалах, имеющих высокий эксплуатационный ресурс. Ключевым направлением является разработка материалов для изготовления имплантатов. В работе рассмотрена возможность использовать в качестве контактного материала, биосовместимые покрытия, нанесенные на имплантат методом микродугового оксидирования (МДО). Состав выбранных покрытий помимо совместимости отличается высокими прочностными характеристиками и способностью противостоять агрессивным средам. Метод МДО обеспечивает высокую адгезионную прочность и позволяет наносить покрытия на имплантаты сложной геометрической формы.

МДО покрытия ввиду особенностей протекания процесса при нанесении могут обладать высокой пористостью и шероховатостью [1]. Для нивелирования этого недостатка в работе проведена постобработка покрытий импульсным потоком плазмы (ИПП). Метод позволяет воздействовать на структуру и морфологию тонкого поверхностного слоя, никак не воздействуя при этом на место контакта покрытия с подложкой и не влияя тем самым на их адгезионные свойства.

Нанесение покрытий проводилось методом МДО в анодно-катодном потенциостатическом режиме в среде щелочных электролитов. В ходе проведения экспериментов варьировали частоту следования импульсов от 50 до 150 Гц. Прикладываемое напряжение и длительность импульсов были постоянными и составили 400/200 В и 200 мкс, соответственно.

В качестве метода постобработки ИПП использовался плазменный ускоритель КСПУ-Б. При воздействии плазмы на поверхность происходит ее сверхбыстрый нагрев со скоростями до 10^{-6} К/с и сверхбыстрое охлаждение за счет собственной теплопроводности материала без применения охлаждающих сред. Подробное описание ускорителя приведено в работе [2].

После нанесения и обработки покрытий регистрировались изменения в тонком поверхностном слое как количества, так и размеров пор, а также фиксировались изменения в показателях шероховатости. Полученные результаты открывают новые возможности при конструировании материалов для медицины с новыми свойствами.

Литература

- [1]. T.W. Clyne, S.C. Troughton. A Review of Recent Work on Discharge Characteristics During Plasma Electrolytic Oxidation of Various Metals // J. Inter. Mater. Rev. – V.64(3). – 2019. - p.127-162.
- [2]. А. К. Кутуков, С. Е. Панин, В. Л. Подковыров. [и др.]. Установка для упрочнения промышленных изделий импульсными плазменными потоками // Инженерная физика. – 2023. – № 10. – С. 47-58.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАКОВЫЕ КЛЕТОЧНЫЕ КУЛЬТУРЫ НАНОСЕКУНДНЫМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ В ПРОТОКЕ АРГОНА

Гудкова В.В.^{1,2}, Бурмистров Д.Е.¹, Серов Д.А.¹,
Грудиев Е.И.^{1,2}, Колик Л.В.¹, Гусейн-заде Н.Г.¹,
Кончеков Е.М.^{1,2}

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,
gudkova-vi@fpl.gpi.ru*

²*РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва, gudkova_vv@pfur.ru*

Применение низкотемпературной плазмы в противоопухолевой терапии актуально ввиду образования активных форм кислорода и азота в ходе плазмохимических реакций, протекающих при воздействии газовым разрядом на водный раствор. Эти соединения вызывают гибель раковых клеток [1].

В работе используется источник неравновесной низкотемпературной плазмы атмосферного давления САРКО, созданный на основе пьезотрансформатора [2,3]. С помощью данного источника генерировался искровой разряд в протоке аргона. Длительность импульса ~ 20 наносекунд, частота $f = 21,1$ кГц, скорость протока – 2 л/мин. Проводилось исследование жизнеспособности адгезивных раковых клеток линии HEp-2 (карцинома гортани) и фибробластов MRC-5 V2, трансформированных вирусом SV40, при воздействии разрядом на клетки в питательной среде DMEM в 24-луночной планшете. С помощью МТТ-теста была определена полулетальная доза, а также с помощью флуоресцентной микроскопии и проточной цитометрии определены способы гибели раковых клеток. Для оценки биологической активности растворов, приобретенной при плазменной обработке, в работе проводились измерения концентраций долгоживущих активных форм кислорода и азота (H_2O_2 , NO_2^-) с помощью спектрофотометра при добавлении химических зондов [4].

Работа выполнена в рамках Проекта № 0253232000 Системы грантовой поддержки научных Проектов РУДН.

Литература

- [1]. Laroussi M. *Frontiers in Physics*. 2020. V. 8.
- [2]. Артемьев К.В. и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2024. №7, с. 55-62.
- [3]. Konchekov E. M. et al. *Biomolecules*. 2024. V. 14.
- [4]. Gudkova, V.V. et al. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2024. V. 44, pp. 305–334.

ОБРАЗОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И АЗОТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНЫМ СВЧ-РАЗЯДОМ НА ЖИДКОСТИ

Гудкова В.В.^{1,2}, Давыдов А.М.¹, Артемьев К.В.¹

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, gudkova-vi@fpl.gpi.ru*

²*РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва, gudkova_vv@pfur.ru*

Плазмохимические реакции, протекающие на границе раздела разряд-жидкость, являются предметом пристального изучения ввиду генерируемых в ходе воздействия активных форм кислорода и азота в жидкости. Эти соединения биологически активны, реакции между короткоживущими формами (пероксинитрит, гидроксил-радикал и т.д.) приводят к образованию долгоживущих соединений, сохраняющихся в растворе длительное время – пероксида водорода, нитрит- и нитрат-ионов. Подобная активация жидкостей и воздействие на биологические системы с помощью разрядов атмосферного давления нашли свое применение в стоматологии, дерматологии, лечении диабетических стоп, противоопухолевой терапии и т.д. [1]

В ходе работы исследовалось влияние микроволнового импульсного капиллярного разряда в протоке аргона на воду первого типа. Стоит отметить, что воздействие СВЧ-разрядом на жидкость не приводит к ее загрязнению ввиду отсутствия эрозии электродов, что особенно актуально для биологических применений. В эксперименте использовался режим $t_{\text{и}} = 33$ мкс, частотой следования импульсов $f = 50$ Гц, $P_{\text{и}} = 2$ кВт. Средняя мощность микроволнового излучения составила 3,3 Вт [2].

Измерения долгоживущих активных форм кислорода и азота проводились с помощью спектрофотометрии при добавлении химических реактивов. При воздействии на 40 мл воды в течение 270 минут концентрация H_2O_2 составила 2400 ± 120 мкМ, концентрация $\text{NO}_3^- = 220 \pm 20$ мкМ, нитрит-ионы не были зафиксированы в пределах чувствительности методики.

Литература

- [1]. Laroussi M. et al. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences. 2022. V. 6, №. 2, pp. 127 – 157.
- [2]. Gritsinin S.I. et al. Plasma Physics Reports. 2013. V. 39, №8, pp. 644 – 650.

МЕХАНИЗМЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В БИОСЕНСОРЕ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Ковалева М.Д., Кытина Е.В.

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,
drakothesame@gmail.com, kata13012002@mail.ru*

Наноструктурированный оксид алюминия (нано- Al_2O_3) имеет развитую поверхность, достигающую несколько квадратных метров на грамм вещества. В настоящее время перспективным направлением является разработка оптических биосенсоров на основе нано- Al_2O_3 , характеризующиеся высокой чувствительностью и быстрым действием [1]. Поэтому целью данной работы было изучение механизмов фотолюминесценции нано- Al_2O_3 .

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) детектировались на монохроматоре SOLAR ТП с ПЗС-камерой, работающей в видимом диапазоне спектра. Для возбуждения ФЛ использовался гелий-кадмиевый лазер с длиной волны 325 нм. Образцы нано- Al_2O_3 были получены в процессе анодного окисления алюминиевой фольги в растворе на основе оксиэтилидендифосфоновой (ОЭДФ) кислоты при различных температурах: от 10 до 55 $^{\circ}\text{C}$. Образцы обозначены следующим образом: А-10, А-25, А-40, А-55.

В спектрах ФЛ всех образцов регистрируются 2 полосы ФЛ: на 463 и 610 нм. Интенсивность ФЛ ($I_{\text{фл}}$) меняется немонотонно в зависимости от температуры синтеза: $I_{\text{фл}}$ увеличивается с ростом температуры, проходит через максимум (при 25 $^{\circ}\text{C}$ для полосы на 463 нм и при 40 $^{\circ}\text{C}$ для полосы на 610 нм) и затем уменьшается. Учитывая, что исследуемые образцы имеют ширину запрещенной зоны около 6 эВ, а энергия возбуждающего излучения составляет 3.8 эВ, что существенно меньше, можно сделать вывод, что ФЛ имеет дефектную природу. Поскольку $I_{\text{фл}}$ имеет максимум для наблюдаемых полос ФЛ при разных температурах синтеза, можно предположить, что ФЛ на 463 и 610 нм реализуется посредством излучательной рекомбинации

фотовозбужденных электронов на различных дефектах, концентрация которых проходит через максимум при различных температурах синтеза: при 25 °С для ФЛ на 463 нм и при 40 °С для ФЛ на 610 нм. Таким образом, варьируя температуру анодного окисления, можно управлять концентрацией дефектов и, соответственно, интенсивностью ФЛ биосенсоров на разных длинах волн излучения.

Полученные биосенсоры могут быть использованы для детектирования различных биомаркеров на их поверхности. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-19-00402, <https://rscf.ru/project/24-19-00402/>.

Литература

- [1]. Eessaa A.K., El-Shamy A.M. Review on fabrication, characterization, and applications of porous anodic aluminum oxide films with tunable pore sizes for emerging technologies // Microelectron. Eng. 2023. V. 279. P. 112061.
- [2]. Rajeev G., Prieto Simon B., Marsal L.F., Voelcker N.H. Advances in Nanoporous Anodic Alumina-Based Biosensors to Detect Biomarkers of Clinical Significance: A Review // Adv Healthc Mater. 2018. V.7, №5 P. 1700904.

УПРАВЛЕНИЕ ТИПОМ И КОНЦЕНТРАЦИЕЙ СПИНОВЫХ ЦЕНТРОВ В НАНОРАЗМЕРНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Кытина Е.В.

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,
kata13012002@mail.ru*

Наноразмерный оксид алюминия (нано- Al_2O_3) применяется для создания фотонных кристаллов, сенсоров на газы, нанокompозитов, биосенсоров на биомаркеры, в том числе онкомаркеры [1]. В последние годы ведутся активные работы по созданию высокочувствительных и селективных оптических биосенсоров на основе нано- Al_2O_3 [1]. Поэтому целью данной работы была идентификация спиновых центров и определение их концентрации в наноразмерном Al_2O_3 , синтезированном в органических и неорганических кислотах.

Спиновые центры изучались методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) (прибор Bruker ELEXSYS-E500-10/12). Образцы нано- Al_2O_3 были сформированы посредством анодирования алюминиевой фольги в растворах на основе ОЭДФ и селеновой кислот. Температура электролита варьировалась от 5 до 55 $^{\circ}\text{C}$, плотность тока составляла 15 мА/см 2 . Для простоты образцы промаркированы по температуре синтеза: Al_2O_3 -5, Al_2O_3 -10, Al_2O_3 -25, Al_2O_3 -40, Al_2O_3 -55.

Методом ЭПР во всех образцах, сформированных в ОЭДФ кислоте при различных температурах электролита, обнаружены кислородные вакансии (F^+ -центры). Концентрация F^+ -центров зависела немонотонно от температуры синтеза, достигая минимума при 40 $^{\circ}\text{C}$.

Обнаружено, что в образцах, сформированных в селеновой кислоте при различных температурах электролита, также обнаружены F^+ -центры и новые спиновые центры - кислородные радикалы. При увеличении температуры синтеза до 25 $^{\circ}\text{C}$ образуется еще один тип

радикалов, которые представляют собой фрагменты селеновой кислоты, образовавшие связи с поверхностью нано- Al_2O_3 . При дальнейшем увеличении температуры синтеза до 40 °С концентрация всех спиновых центров резко уменьшалась, что, вероятно, обусловлено протравливанием поверхностного слоя, что подтверждается данными электронной микроскопии. Таким образом, меняя температуру синтеза можно контролировать тип и концентрацию радикалов.

Полученные наноструктуры Al_2O_3 с управляемой концентрацией спиновых центров могут быть использованы для анализа биомаркеров на поверхности Al_2O_3 . Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-19-00402, <https://rscf.ru/project/24-19-00402/>.

Литература

- [1]. X. Huang, H. Mutlu, P. Théato, The toolbox of porous anodic aluminum oxide-based nanocomposites: from preparation to application, *Colloid Polym Sci* 299 (2021) 325–341.

ИММУНОТРОПНОЕ ДЕЙСТВИЕ РАСТВОРА ХЕНКСА, ОБРАБОТАННОГО ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ, ДЛЯ ЖЕНЩИН ДВУХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП

Павлик Т.И., Кончеков Е.М., Гусейн-заде Н.Г.

Институт общей физики им А. М. Прохорова РАН, Москва

Холодная плазма и обработанные ею растворы оказывают противовоспалительное и регенеративное действие [1]. Важно исследовать механизмы этого действия, а также сравнить эффекты для разных возрастных групп.

В данной работе брали кровь условно здоровых женщин в возрасте 20-30 лет и 55-70 лет. Из крови выделяли мононуклеарные лейкоциты, которые культивировали в питательной среде RPMI с добавлением раствора Хенкса (20%), обработанного холодной плазмой при помощи источника САРКО [2, 3]. Через 24 часа анализировалась продукция лейкоцитами цитокинов и активных форм кислорода (АФК).

Раствор, обработанный плазмой, повышал продукцию лейкоцитами противовоспалительного цитокина ИЛ-10 (на 100%) и снижал продукцию провоспалительного цитокина ИЛ-6 (на 50%) и АФК (на 40%) у женщин из группы 55-70 лет, что подтверждает противовоспалительное действие плазмы в клинике. При этом у женщин группы 20-30 лет наблюдалось только снижение продукции ИЛ-6 (на 80%). Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что раствор, обработанный плазмой, оказывает серьезное противовоспалительное действие на пожилых женщин, а на молодых женщин оказывает скорее иммуносуппрессирующее действие.

Раствор Хенкса, обработанный холодной плазмой при помощи источника САРКО, будет иметь перспективы в лечении воспалительных заболеваний у женщин пожилого возраста.

Работа выполнена в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

Литература

- [1]. Dubey S. K., Parab S., Alexander A., Agrawal M., Achalla V. P. K., Pal U. N., Pandey M. M., Kesharwani P., Process Biochemistry, Vol. 112, PP. 112-123.
- [2]. Artem'ev K., Kolik L., Podkovyrov L., Sevostyanov S., Kosolapov V., Meshalkin V., Diuldin M., IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 390, Is. 1, P. 012039.
- [3]. Konchekov E., Gudkova V., Burmistrov D., Konkova A., Zimina M., Khatueva M., Polyakova V., Stepanenko A., Pavlik T., Borzosekov V., Malakhov D., Kolik L., Gusein-zade N., Gudkov S., Biomolecules, Vol. 14, Is. 2, P. 181.

ЦИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАСТВОРА, ОБРАБОТАННОГО ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ, НА КЛЕТКИ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Павлик Т.И., Кончеков Е.М., Гусейн-заде Н.Г.

Институт общей физики им А.М. Прохорова РАН, Москва

Рак молочной железы (РМЖ) является распространённым онкологическим заболеванием с высокой летальностью [1]. Новым физическим методом лечения РМЖ может стать обработка опухоли холодной плазмой или растворами, в которых под действием плазмы образовались активные формы кислорода (АФК).

Мы воздействовали раствором Хенкса, обработанным холодной плазмой (источник САРКО, разработанный в ИОФ РАН [2, 3]), на культуру клеток РМЖ MCF- 7. Клетки культивировали в течение 2 суток в питательной ДМЕМ с добавлением раствора, обработанного плазмой (20 %), после чего проводили анализ жизнеспособности клеток.

Метод МТТ показал снижение митохондриальной активности клеток на 30 % при времени обработки раствора до 2,5 мин и на 45 % при времени обработки раствора 5-7,5 мин. Методом ПЦР было показано уменьшение транскрипции факторов митоза JAK2 и STAT3 и увеличение транскрипции фактора апоптоза p53.

Таким образом, мы показали, что раствор Хенкса, обработанный плазмой при помощи источника САРКО, оказывает цитостатическое действие на клетки РМЖ. Такой эффект говорит о возможных перспективах использования источника САРКО при лечении РМЖ.

Работа выполнена в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

Литература

- [1]. Румянцева А. В., Азизова Т. В., Банникова М. В., Зубкова О. В., Проблемы репродукции, 2019 г., Т. 25, No5, С. 22-29.
- [2]. Artem'ev K., Kolik L., Podkovyrov L., Sevostyanov S., Kosolapov V., Meshalkin V., Diuldin M., IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 390, Is. 1, P. 012039.
- [3]. Konchekov E., Gudkova V., Burmistrov D., Konkova A., Zimina M., Khatueva M., Polyakova V., Stepanenko A., Pavlik T., Borzosekov V., Malakhov D., Kolik L., Gusein-zade N., Gudkov S., Biomolecules, Vol. 14, Is. 2, P. 181.

**Всероссийская молодежная конференция по управляемому
термоядерному синтезу, плазменным технологиям и
высокотехнологичной медицине**

2025

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ISBN 978-5-521-24626-7