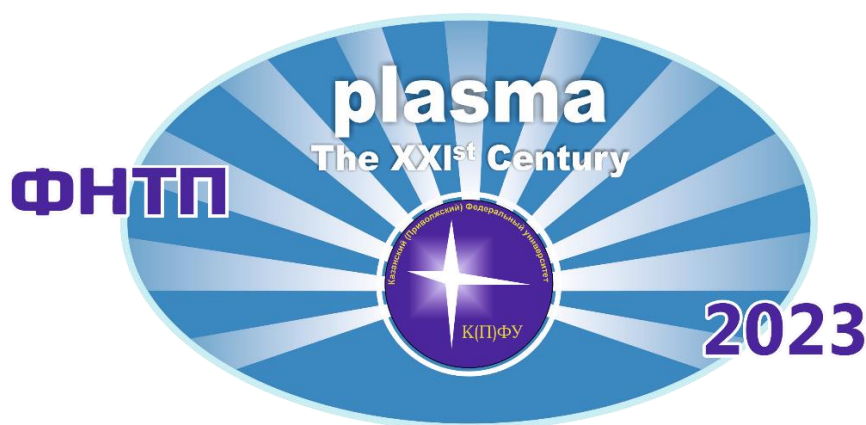


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ
«ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН
ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИМЕНИ А.В. ТОПЧИЕВА РАН
КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ (ФНТП-2023)

Сборник тезисов
Всероссийской (с международным участием) конференции

Казань, 5–9 июня 2023 г.



КАЗАНЬ

2023

УДК 533.9
ББК 22.333
Ф50

Редакционная коллегия:

Петров Олег Федорович – академик РАН, председатель;
Лебедев Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук,
заместитель председателя;
Кашапов Наиль Фаикович – член-корреспондент АН РТ,
доктор технических наук, заместитель председателя;
Акишев Юрий Семенович – доктор физико-математических наук;
Кашапов Рамиль Наилевич – кандидат технических наук, ученый секретарь

Физика низкотемпературной плазмы (ФНТП-2023): сборник тезисов
Ф50 Всероссийской (с международным участием) конференции (Казань, 5–9
июня 2023 г.). – Казань: Издательство Казанского университета, 2023. –
365 с.

ISBN 978-5-00130-716-7

В сборнике представлены материалы Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2023, где отражены новые направления развития физики низкотемпературной плазмы и смежных областей.

Сборник представляет интерес для специалистов, инженеров, молодых ученых и студентов, работающих и ведущих исследования в области физики низкотемпературной плазмы.

УДК 533.9
ББК 22.333

ISBN 978-5-00130-716-7

© Издательство Казанского университета, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады	16
<u>Коваль Н.Н.</u> СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В РАЗРЯДАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	17
<u>Фирсов А.А., Тарасов Д.А., Добровольская А.С., Трошкин Р.С., Перевощиков Е.Е., Битюрин В.А., Бочаров А.Н.</u> СВОЙСТВА РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ.....	19
<u>Василяк Л.М., Кудрявцев Н.Н., Костюченко С.В.</u> СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ И ВОЗДУХА.....	22
<u>Скалыга В.А., Голубев С.В., Изотов И.В., Выбин С.С., Киселёва Е.М., Поляков А.В., Разин С.В.</u> СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЭЦР ИСТОЧНИКИ ПРОТОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ.....	24
<u>Абдуллин И.Ш., Некрасов И.К., Сагитова Ф.Р.</u> ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ.....	27
<u>Акишев Ю.С., Петряков А.В., Фефелова Е.А.</u> ДИНАМИКА ОБЪЕМНОЙ И ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ СТРУКТУРЫ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА ПРИ УСКОРЕНИИ ПЛАЗМЫ В РЕЛЬСОВОЙ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ.....	28
<u>Титов В.А., Наумова И.К.</u> ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ.....	30
Секция 1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ (ТЕРМОДИНАМИКА, ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА, ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ)	32
<u>Мальцев М.А., Морозов И.В., Осина Е.Л., Миненков Ю.В.</u> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХАТОМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРГОНА В НИКЗОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ.....	33
<u>Файрушин И.И., Мокшин А.В.</u> ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ ИОНОВ СИЛЬНО НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В РАМКАХ САМОСОГЛАСОВАННОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕОРИИ.....	35
Секция 2. ФИЗИКА ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ (В ПОСТОЯННЫХ, ПЕРЕМЕННЫХ, ВЧ И СВЧ ПОЛЯХ)	37
Приглашенный доклад: <u>Рыжков С.В., Кузенов В.В., Воронина Е.А., Секачева М.Д.</u> ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНО-ЯРКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МПК РАЗРЯДА.....	38
<u>Aleksandrov N.L., M.N.Shneider M.N., Starikovskiy A.Yu.</u> HIGH-VOLTAGE NANOSECOND PULSED DISCHARGES IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD.....	40

<u>Батукаев Т.С., Билера И.В., Крашевская Г.В., Лебедев Ю.А.</u> МИКРОВОЛНОВЫЙ РАЗРЯД В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ С БАРБОТИРОВАНИЕМ АРГОНА И CO ₂	42
<u>Воеводин В.В., Коржова О.И., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННОГО ТОКА, СОЗДАВАЕМОГО ИЗ ПЛАЗМЫ ВСТРЕЧНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ КАНАЛОВ ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА.....	44
<u>Галимова А.В., Белогловский А.А.</u> ИЗУЧЕНИЕ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ВЛИЯНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТРИМЕРОВ В ВОЗДУХЕ НА НАКОПЛЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ИХ КАНАЛОВ.....	46
<u>Дулатов А.К., Андреев Д.А., Голиков А.В., Григорьев Т.А., Ильичев И.В., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А.</u> ИЗЛУЧАТЕЛИ НЕЙТРОНОВ С ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНЬЮ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	48
<u>Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Коковин А.О., Семенюк Н.С.</u> СТРИМЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОГО ГАЗА.....	50
<u>Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ВОЗДУХЕ.....	52
<u>Артемьев К.В., Борзосек В.Д., Заклецкий З.А., Малахов Д.В.</u> ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ФРОНТА ИОНИЗАЦИИ И ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ПОДПОРОГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА.....	54
<u>Мансфельд Д.А., Чекмарев Н.В., Синцов С.В., Преображенский Е.И., Ремез М.А., Водопьянов А.В.</u> РАЗЛОЖЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СВЧ РАЗРЯДЕ, ПОДДЕРЖИВАЕМОМ В ВОЛНОВОДНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 24 ГГц.....	56
<u>Мельников А.Д., Усманов Р.А., Полищук П.В., Гавриков А.В.</u> ВАКУУМНАЯ ДУГА КАК ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ ДЛЯ МЕТОДА ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ВЕЩЕСТВ.....	58
<u>Андреев Д.А., Голиков А.В., Григорьев Т.А., Дулатов А.К., Ильичев И.В., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А.</u> ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА В ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ.....	60
<u>Сайфутдинов А.И., Германов Н.П., Сорокина А.Р., Сайфутдинова А.А.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ТУГОПЛАВКИМИ И НЕТУГОПЛАВКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ..	62
<u>Сайфутдинов А.И., Сайфутдинова А.А., Кустова Е.В.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-РАЗРЯДА В АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ...	64
<u>Сайфутдинова А.А., Германов Н.П., Сайфутдинов А.И., Кустова Е.В.</u> ДИНАМИКА ФИЛАМЕНТАЦИИ СВЧ-РАЗРЯДА В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ.....	66

<u>Соловьев В.Р.,</u> Караваева Н.И., Лисицын Д.А. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ФИЛАМЕНТАЦИИ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В АЗОТЕ И ВОЗДУХЕ.....	68
<u>Фирсов А.А.,</u> Тарасов Д.А., Добровольская А.С., Трошкин Р.С., Перевощиков Е.Е., Битюрин В.А., Бочаров А.Н. РАЗРЯД ПОСТОЯННОГО ТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ, И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ПЛАЗМЕННОЙ АЭРОДИНАМИКИ.....	70
<u>Антипов С.Н.,</u> Гаджиев М.Х., Ильичев М.В., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА МИКРОВОЛНОВОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	73
<u>Антонов Н.Н.,</u> Ойлер А.П. ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ РАЗДЕЛЯЕМЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ПЛАЗМЕННОМ МАСС-СЕПАРАТОРЕ.....	75
<u>Гашигуллин К.А.,</u> Мастюков К.Ш., Сухих М.Е., Исмагилов Д.М., Гайсин Ал.Ф., Желтухин В.С. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ С ЖИДКИМИ И ТВЕРДЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ, АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ.....	77
<u>Голубев М.С.,</u> Павлов С.И., Дзлиева Е.С., Новиков Л.А., Карасев В.Ю. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ, ЛЕВИТИРУЮЩИХ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ РАЗРЯДЕ.....	79
<u>Дрожжин С.А.,</u> Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ПРИ НАНЕСЕНИИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ.....	81
<u>Кашапов Л.Н.,</u> Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СФЕРОИДИЗАЦИИ ЧАСТИЦ ОКСИДА КРЕМНИЯ В ВЧ-РАЗРЯДЕ.....	83
<u>Павлов С.И.,</u> Голубев М.С., Дзлиева Е.С., Новиков Л.А., Карасев В.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЯ ЛЕВИТАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В РАЗЛИЧНЫХ ПЛАЗМОФОРМИРУЮЩИХ ГАЗАХ.....	86
<u>Ригин А.В.,</u> Строкин Н.А. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ И СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ.....	88
<u>Сергеев П.В.,</u> Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ТИТАНА.....	90
<u>Сидоров А.В.,</u> Веселов А.П., Водопьянов А.В., Глявин М.Ю., Калынов Ю.К. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО МОЩНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ.....	92
<u>Тазмеев Г.Х.,</u> Тазмеев Х.К. МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ТОКА В РАЗРЯДЕ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ: УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ.....	94

<u>Тазмеев Х.К., Тазмеев Г.Х., Тазмеев А.Х.</u> ВЛИЯНИЕ СЛАБОТОЧНОЙ ДУГИ НА ПОТОК ПЛАЗМЫ ОТ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ.....	96
<u>Чистолинов А.В., Тюфтяев А.С.</u> ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КАНАЛЕ РАЗ- РЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ ОТ ТОКА РАЗРЯДА.....	98
<u>Шепеленко А.А., Купряев Н.В.</u> СТРАТЫ В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ СТОЛБЕ РАЗРЯДА В ПОТОКЕ КИСЛОРОДА И НАРАБОТКА СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА.....	100
<u>Бельгибаев Э.Р., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Гайсин Аз.Ф., Валиев Р.И., Хафизов А.А.</u> ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫЕ РАЗРЯДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ ВНУТРИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРУБКИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ.....	102
<u>Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Фахрутдинова И.Т., Гайсин Аз.Ф.</u> ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ.....	104
Гашигуллин К.А, <u>Мастюков К.Ш.</u> , Сухих М.Е, Исмагилов Д.М, Гайсин Ал.Ф., Желтухин В.С. ПОЛИРОВКА И УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО МЕТОДА.....	106
Секции 3 и 4. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕ. НЕРАВНОВЕСНАЯ ПЛАЗМА, КИНЕТИКА ПЛАЗМЫ, УБЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОНЫ.....	108
<u>Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Полисадов С.С.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИОНОВ АЗОТА, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ДИОДОМ С ПАССИВНЫМ АНОДОМ.....	109
<u>Корнев Р.А., Назаров В.В.</u> ДИАГНОСТИКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСР-ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССЕ ВОДОРОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ SiF ₄	111
<u>Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И.</u> ОСОБЕННОСТИ УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВОМ ДИОДЕ С КОНИЧЕСКИМ КАТОДОМ.....	113
Кожевников В.Ю., <u>Козырев А.В.</u> , Коковин А.О., Семенюк Н.С. КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПЛАЗМЫ В КОАКСИАЛЬНОМ ВАКУУМНОМ ПРОМЕЖУТКЕ.....	115
<u>Сайфутдинов А.И., Сысоев С.С., Гушин Д.В.</u> КИНЕТИКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ.....	117
<u>Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И.</u> ЛОКАЛЬНЫЕ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВОМ ПРОМЕЖУТКЕ С КЛИНОВИДНЫМ КАТОДОМ.....	119
<u>Aleksandrov N.L., Ponomarev A.A.</u> MONTE CARLO SIMULATION OF ION KINETICS IN NITROGEN AND OXYGEN PLASMAS UNDER NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD CONDITIONS.....	121

<u>Григорьян Г.М.</u> , Демьянов А.В., Дятко Н.А., Кочетов И.В. ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ ФРЭЭ В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В Хе-Не СМЕСИ.....	123
<u>Григорьян Г.М.</u> , Демьянов А.В., Дятко Н.А., Кочетов И.В. ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ РЕЛАКСАЦИИ НИЖНИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ Хе В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСИ С Не.....	125
Секция 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК.....	127
<u>Волков Л.С.</u> , Фирсов А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ГРАНИЦУ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	128
<u>Загидуллин М.В.</u> , Михеев П.А., Дворников А.Д. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В Ar-He СМЕСИ.....	130
<u>Мамедов И.М.</u> , Узволок А.А., Масленников С.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ В МИНИАТЮРНОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРITЕЛЕ С ИСКРО-ДУГОВЫМ ИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ.....	132
Аверьянова С.А., Куракина Н.К., <u>Образцов Н.В.</u> , Тонконогов Е.Н., <u>Жилиготов Р.И.</u> ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОТОК В СОПЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ГАЗОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ.....	134
Мурашов Ю.В., Образцов Н.В., Куракина Н.К., <u>Жилиготов Р.И.</u> , Кожубаев Ю.Н. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕ- НИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В ПОТОКЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ДУГО- ВОГО ПЛАЗМОТРОНА.....	136
Шутов Д.А., Иванов А.Н., <u>Рыбкин В.В.</u> ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ЖИДКОМ АНОДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА: РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ..	138
Герасимов А.В., <u>Садыков И.Н.</u> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧИ-РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ.....	140
<u>Шемахин А.Ю.</u> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВЧ-ПЛАЗМЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ.....	142
<u>Юрьев А.В.</u> , Адаменков Ю.А., Горбунов М.А., Шайдулина В.А., Калачева А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА АКТИВНУЮ СРЕДУ ЛАЗЕРА С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ПОМОЩЬЮ КИНЕТИЧЕСКОЙ 0-D(T) МОДЕЛИ.....	144
<u>Доброклонская М.С.</u> , Попов Д.И. УСТОЙЧИВЫЕ И НЕУСТОЙЧИВЫЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ В ВОЗДУХЕ.....	146
<u>Жарков Я.Е.</u> , Романов К.И., Шершунова Е.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВМЕСТНО С ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ.....	148

<u>Лазарев Е.Н., Желтухин В.С.</u> МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ ОБРАЗЦА ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ ВЧИ-РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ.....	150
<u>Жилиготов Р.И., Образцов Н.В., Куракина Н.К., Мурашов Ю.В.</u> РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИМПУЛЬСНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ГИН 7 МВ.....	152
<u>Корнев Р.А., Шабарова Л.В., Ермаков А.А.</u> ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПРОБОЕМ ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГАЛОГЕНИДОВ БОРА.....	154
<u>Загидуллин М.В., Михеев П.А., Дворников А.Д.</u> ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ НА НАРАБОТКУ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ АРГОНА Ar (s5) В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В Ar-He СМЕСИ.....	156
<u>Образцов Н.В., Быков Н.Ю., Суров А.В., Хватов А.А., Маслаев А.М.</u> ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМОТРОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	158
<u>Панкова Е.А., Желтухин В.С., Шаехов М.Ф., Рахматуллина Г.Р., Шагивалиева Р.Р.</u> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ.....	160
<u>Савин А.Ю., Желтухин В.С., Лучкин А.Г.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧ-МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ.....	162
<u>Смирнова А.Р., Бойков Д.С., Казаков Е.Д., Ольховская О.Г., Ткаченко С.И.</u> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЫ АНОДНОГО ФАКЕЛА В ДИОДНОМ ЗАЗОРЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ «КАЛЬМАР».....	164
<u>Желтухин В.С., Шемахин А.Ю., Киселев Г.Б., Терентьев Т.Н.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ УШИРЕНИЯ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ.....	166
<u>Тряскин Я.В., Пинчук М.Э., Богомаз А.А.</u> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ С ТОКАМИ МЕГААМПЕРНОГО ДИАПАЗОНА В ГАЗЕ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ.....	167
<u>Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю.</u> ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПЕРЕНОСА КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРОЛИТА В РАЗРЯДАХ С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ.....	169
Секция 6. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ.....	171
<u>Артёмов А.П., Федюнин А.В., Русских А.Г., Орешкин В.И.</u> ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ТАНТАЛОВОГО PZ-ПИНЧА.....	172
<u>Валинуров М.А., Гавриков А.В., Ойлер А.П., Усманов Р.А.</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ОТРАЖАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ С ТЕРМОКАТОДОМ.....	174

<u>Дьяченко А.А.</u> , Пинчук М.Э., Иов И.Л., Степанова О.М. ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗРЕШЁННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ЛИНИЙ N2 С-В И ОН А-Х В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ, ИСТЕКАЮЩЕМ В ВОЗДУХ.....	176
<u>Емлин Р.В.</u> , Морозов П.А., Щербаков Е.Н. ИЗМЕРЕНИЕ МАСС-ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТ ПЛАЗМЫ НАНОСЕКУНДНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ.....	178
<u>Кавыршин Д.И.</u> , Будаев В.П., Федорович С.Д., Карпов А.В., Чиннов В.Ф., Лукашевский М.В., Чан К.В., Муравьева Е.А., Мязин А.С., Коньков А.А., Рогозин К.А., Анисимов Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ПРОТОТИПОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ИХ ИСПЫТАНИЯХ В УСТАНОВКЕ ПЛМ.....	180
<u>Казиев А.В.</u> , Колодко Д.В., Сазонов Н.С., Агейченков Д.Г., Тумаркин А.В. ИЗУЧЕНИЕ ИОННОГО ПОТОКА ИЗ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНОГО НЕРАСПЫЛЯЮЩЕГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА.....	182
<u>Колодко Д.В.</u> , Лисенков В.Ю., Агейченков Д.Г., Казиев А.В. ГЕНЕРАЦИЯ ГРУППЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ КИСЛОРОДА В ПЛАЗМЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА.....	184
<u>Майстренко Д.А.</u> , Шагайда А.А. РАЗРАБОТКА АПЕРТУРНОГО ЗОНДА С ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ.....	186
<u>Пинчук М.Э.</u> , Дьяченко А.А., Иов И.Л., Степанова О.М. ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	188
<u>Рыкунов Г.И.</u> , Казиев А.В., Колодко Д.В., Алиева А.И., Гаспарян Ю.М. ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ФОНОВОЙ ВЧИ ПЛАЗМЕ.....	190
<u>Селивонин И.В.</u> , Кувардин С.Е., Моралев И.А. ЦИФРОВОЙ МЕТОД КОРРЕЛИРОВАННОГО ПО ВРЕМЕНИ СЧЕТА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА.....	192
<u>Семенов М.Н.</u> , Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА.....	194
Павлов А.В., Протасов Ю.Ю., Скрыбин А.С., <u>Телех В.Д.</u> , Щепанюк Т.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ПРИ АБЛЯЦИИ ПОЛИМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	196
<u>Усманов Р.А.</u> , Мельников А.Д., Гавриков А.В., Антонов Н.Н., Полищук В.П. ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕПРЕРЫВНОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ.....	198
Кириллов Д.В., <u>Шимлых П.А.</u> , Рязанов В.А. ХАОТИЧЕСКОЕ И НАПРАВЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ.....	200

<u>Дацко И.М., Чайковский С.А., Русских А.Г., Ванькевич В.А., Жигалин А.С., Орешкин В.И.</u> СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ СКИНОВОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В МЕГАГАУСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.....	202
<u>Жигалин А.С., Русских А.Г., Орешкин В.И., Артёмов А.П.</u> СВЕРХБЫСТРЫЙ ЭРОЗИОННЫЙ КЛАПАН ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗО-ПЛАЗМЕННЫХ ЛАЙНЕРОВ.....	204
Секция 7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ВЕЩЕСТВОМ.....	206
Приглашенный доклад: <u>Корнев Р.А., Буланов А.Д.</u> ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ Si, В, Мо, ИХ КАРБИДОВ И ГЕРМАНИЯ ИЗ ЛЕТУЧИХ ГАЛОГЕНИДОВ ДЛЯ НОВЫХ ПРИМЕНЕНИЙ.....	207
<u>Горбатов С.А., Петрухина Д.И., Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Иванов И.А., Басырова Д.В.</u> ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ИЗОЛЯТ ДИКОГО ШТАММА RHUTORTHORA SPP. ВЫДЕЛЕННОГО С ПОВЕРХНОСТИ КУЛЬТУР КАРТОФЕЛЯ.....	209
<u>Зиновьев А.В., Пискарев М.С., Скрылева Е.А., Сенатулин Б.Р., Гатин А.К., Гильман А.Б., Сырцова Д.А., Тепляков В.В., Кузнецов А.А.</u> МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛТРИМЕТИЛСИЛАНА В РАЗРЯДАХ РАЗНОГО ТИПА.....	211
<u>Kadyrov A.A., Frolov V.Ya., Yushin B.A.</u> NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF A PLASMA JET ON A METAL POWDER IN VARIOUS GASEOUS ENVIRONMENT.....	214
<u>Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Полищук В.А., Томаев В.В., Ермоленко М.А., Новиков Л.А., Павлов С.И.</u> АНАЛИЗ МОДИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ МЕЛАМИН ФОРМАЛЬДЕГИДА В ПЫЛЕВОЙ ЛОВУШКЕ.....	216
<u>Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф.</u> СРАВНЕНИЕ АНОДНОГО И КАТОДНОГО РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНОГО РАСТВОРА ЖИДКОГО СТЕКЛА.....	218
<u>Коробейщиков Н.Г., Николаев И.В., Стищенко П.В.</u> РАСПЫЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ.....	220
<u>Абдуллин И.Ш., Некрасов И.К., Сагитова Ф.Р.</u> ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНЫХ ВЧ РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ИЗДЕЛИЙ.....	222
<u>Пасынкова Д.С., Новиков П.А., Чесноков Д.А., Жупанов В.Г., Телех В.Д., Скрыбин А.С.</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ Al/MGF2 ЗЕРКАЛ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВУФ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	224
<u>Ажажа И.И., Ахмадеев Ю.Х., Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В.</u> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОГО БОРИДА.....	226

<u>Шакиров Р. И., Шарифуллин Ф. С., Сагитова Ф.Р., Желтухин В.С.</u> МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ.....	228
<u>Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф.</u> ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ.....	230
<u>Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Даутов И.Г., Васильев Н.О.</u> СФЕРОИДИЗАЦИЯ ОКСИДА КРЕМНИЯ В УСТАНОВКЕ ТЕРМОПЛАЗМА-50.....	232
<u>Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф.</u> ПЛАЗМЕННО-УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ.....	234
<u>Крисковец Д.С., Иванов Д.В., Фролов В.Я., Юшин Б.А.</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ.....	236
<u>Козлов А.А., Козлов А.В., Поварёшкин А.М., Полищук В.П., Шурупов А.В.</u> ПЕРЕХОД ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КОНТАКТА В ПЛАЗМЕННЫЙ В РЕЛЬСОВЫХ УСКОРИТЕЛЯХ.....	238
<u>Кукушкина М.С., Казиев А.В., Колодко Д.В., Харьков М.М., Рыкунов Г.И., Цвентух М.М.</u> ВЛИЯНИЕ ВИДА НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДУГОВЫХ ПРОБОЕВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧИ-РАЗРЯДА.....	240
Секция 8. ПЛАЗМОХИМИЯ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	242
<u>Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Синцов С.В., Нежданов А.В., Преображенский Е.И., Чекмарев Н.В., Машин А.В.</u> РАЗЛОЖЕНИЕ МЕТАНА ПРИ ПОМОЩИ ВЧ ПЛАЗМОТРОНА.....	243
<u>Волошин Д.Г., Кропоткин А.Н., Лопаев Д.В., Палов А.П., Рахимова Т.В., Амиров И.И.</u> ТРАВЛЕНИЕ РУТЕНИЯ В СМЕСИ Ag/O ₂	245
<u>Мочалов Л.А., Кудряшов М.А., Прохоров И.О., <u>Вшивцев М.А.</u></u> ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ КАДМИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	247
<u>Ивченко А.В., <u>Комов А.Н.</u></u> ПЛАЗМОАКТИВИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	249
<u>Карташов С.И., Иванов А.Н., Шутов Д.А., Овчинников Н.Л., Рыбкин В.В.</u> КИНЕТИКА ДЕЙСТВИИ РОДАМИНА Б В ВОДНОМ РАСТВОРЕ В ПРИСУТСТВИИ ФОТОКАТАЛИЗАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	251
<u>Купутдинова А.И., Гайсин Ал.Ф., Закиров Д.У.</u> ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ.....	253
<u>Одинокоев В.В., Костюков Д.А., Шубников А.В., <u>Овцын А.А.</u>, Хошев А.В., Доломанжи А.</u> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И СИСТЕМЫ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С ПОДВИЖНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ.....	255

<u>Пушкарев А.И., Рябов А.Ю., Полисадов С.С.</u> ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТАНОЛА В БАРБОТАЖНОМ РЕАКТОРЕ.....	257
<u>Синцов С.В., Водопьянов А.В., Масфельд Д.А., Преображенский Е.И., Чекмарев Н.В.</u> РАЗРЯДЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯБ ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ НЕПРЕРЫВНЫМ МИЛЛИМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	259
<u>Смирнова К.В., Лебедев Ю.А., Евреинов Е.Ю.</u> ПОЛУЧЕНИЕ БИНАРНЫХ ОКСИДОВ ЦИНКА И МЕДИ НА ЦЕОЛИТАХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ..	261
<u>Сумаренко А.А., Рязанов В.А., Манегин Д.С., Туманов Н.А.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ДАТЧИКА ИНВЕРСНО-МАГНЕТРОННОГО ВАКУУММЕТРА.....	263
<u>Ахмадеев Ю.Х., Иванов Ю.Ф., Лопатин И.В., Петрикова Е.А., Гончаренко И.М., Григорьев С.В., Москвин П.В.</u> ВЛИЯНИЕ АЛИТИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА.....	265
<u>Гаджиев М.Х., Саргсян М.А., Ильичев М.В., Юсупов Д.И., Тюфтяев А.С.</u> ВЛИЯНИЕ МАЛОЙ ДОБАВКИ ПРОПАН-БУТАНА НА ГАФНИЕВЫЙ КАТОД ГЕНЕРАТОРА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АЗОТА И ВОЗДУХА.....	267
<u>Шакиров А.М., Гайсин Ал.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Мирханов Д.Н.</u> ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНОЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ.....	269
<u>Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Сафронов А.А., Васильева О.Б., Ширяев В.Н., Субботин Д.И., Корнеев Д.В., Павлова Е.А.</u> ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА.....	271
<u>Некрасов И.К., Сагитова Ф.Р., Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С.</u> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ.....	273
<u>Ершов И.П., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С.</u> МОДИФИКАЦИЯ СТЕКЛОВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЧ-ПЛАЗМЕ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ.....	275
<u>Зверев С.Г., Иванов Д.В., Грачев С.Ю.</u> РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	277
<u>Лисенков В.В., Огородников А.И., Подкин А.В., Тихонов И.Н.</u> СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ НАНОПОРОШКОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПЛАЗМОТРОНЕ..	279
<u>Лубин А.А., Чистолинов А.В., Якушин Р.В., Перфильева А.В.</u> ИЗУЧЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ РАЗРЯДЕ.....	281
<u>Мартьянов Д.Э., Субботин Д.И., Попов С.Д.</u> АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО В ХОДЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА.....	283
<u>Мартьянов Д.Э., Субботин Д.И., Попов С.Д.</u> ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	285

<u>Саубанов Р.Р., Рахимов Р.Р., Исрафилов И.Х.</u> СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ МИКРОСФЕР С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ В СРЕДЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ.....	287
<u>Торбин А.П., Демьянов А.В., Кочетов И.В., Михеев П.А.</u> НАРАБОТКА ОЗОНА В ДБР В СМЕСИ ВОЗДУХ-МЕТАН.....	289
<u>Чебыкин Е.О., Володин Л.Ю., Полевой Д.Е., Егошин Д.А., Чувашев С.Н.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНОГО МАГНИТО-ПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	291
<u>Чекмарев Н.В., Мансфельд Д.А., Преображенский Е.И., Синцов С.В., Ремез М.А., Водопьянов А.В.</u> ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ КОНВЕРСИИ CO ₂ В СВЧ ПЛАЗМЕ ПУТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСТРАЗЯДНОЙ ОБЛАСТИ.....	293
<u>Шакиров Р.И., Шарифуллин Ф. С., Сагитова Ф.Р.</u> МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ.....	295
Секции 9 и 10. ПЛАЗМА В АТМОСФЕРЕ, ИОНОСФЕРЕ, АСТРОФИЗИКЕ. ПЛАЗМА В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ.....	297
<u>Русских А.Г., Жигалин А.С., Орешкин В.И., Кузьминых А.М.</u> ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....	298
<u>Корнев Р.А., Шабарова Л.В., Ермаков А.А., Шкрунин В. Е., Горнушкин И.Б.</u> ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА СИНТЕЗ ОЗОНА И СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПРОБОЕМ.....	300
<u>Аникеев С.Г., Артюхова Н.В., Кафтаранова М.И., Шабалина А.В.</u> РАЗРАБОТКА ПОРИСТО-МОНОЛИТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНДОПРОТЕЗОВ РЕБЕР.....	302
<u>Артюхова Н.В., Аникеев С.Г., Кафтаранова М.И., Пахолкина С.А.</u> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА.....	304
<u>Павлик Т.И., Костюкова Н.М., Павлова М.И.</u> ВЛИЯНИЕ РАСТВОРА ХЕНКСА, ОБРАБОТАННОГО ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ, СОВМЕСТНО С ДОКСОРУБИЦИНОМ И МЕДРОКСИПРОГЕСТЕРОНА АЦЕТАТОМ НА ЦИТОКИНОВУЮ АКТИВНОСТЬ ЛЕЙКОЦИТОВ ЧЕЛОВЕКА РАЗНЫХ ВОЗРАСТОВ.....	306
<u>Чиликина П.А., Новиков Д.О.</u> РАДИКАЛ-ПРОДУЦИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ НЕЙТРОФИЛОВ КРОВИ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПОЙ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ CeO ₂	308
<u>Багров В.В., Володин Л.Ю., Камруков А.С., Кондратьев А.В.</u> ОБРАБОТКА РАН ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ШИРОКОГО СПЕКТРА.....	310
<u>Нафиков М.М., Смирнов С.Г., Хузина Р.Р., Нафиков Ман. Мак.</u> ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ НА ИХ ФИЗИОЛОГИЮ И СТЕПЕНЬ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ.....	312

Багров В.В., Володин Л.Ю., Камруков А.С., Кондратьев А.В., <u>Полевой Д.Е.</u> , Федоров А.Д. ФУНГИЦИДНАЯ ОБРАБОТКА УПАКОВАННЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	314
<u>Чудинов В.С.</u> , Шардаков И.Н., Солодников С.Ю., Литвинов В.В., Кондюрин А.В. ВЛИЯНИЕ ПОТОКА ИОНОВ АЗОТА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ НА БИОСОВМЕСТИМОСТЬ МЕДИЦИНСКОГО ПОЛИУРЕТАНА.....	316
Секция 11. ПЛАЗМОДИНАМИКА, ПЛАЗМЕННЫЕ И ИОННЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ.....	318
<u>Дудин В.С.</u> , Задириев И.И., Кралькина Е.А., Швыдкий Г.В., Вавилин К.В., Никонов А.М., Маринин С.Ю., Бондаренко Д.А. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОТИПА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ.....	319
<u>Ойлер А.П.</u> , Усманов Р.А., Гавриков А.В., Смирнов В.П. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ: ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.....	321
<u>Федянин Н.К.</u> , Кравченко Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СО СДВОЕННЫМ ПОЛЮСОМ.....	323
<u>Шумейко А.И.</u> , Телех В.Д. РЕЖИМЫ ЗАПУСКА ДВУНАПРАВЛЕННОГО ВОЛНОВОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ, РАБОТАЮЩЕГО НА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ.....	324
<u>Дьяков А.А.</u> , Амосов М.П., Лобастов И.А., Артемов В.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБОЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕКЦИОННОЙ ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ.....	326
<u>Подлосинская А.П.</u> , Полевой Д.Е., Павлов А.В., Володин Л.Ю., Телех В.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ.....	328
<u>Федорова Д.К.</u> , Егошин Д.А., Скорняков В.М., Телех В.Д. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ.....	330
Секция 12. ПЛАЗМА В СИНТЕЗЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ.....	332
Ахмадуллина Н.С., Борзосексов В.Д., <u>Гаянова Т.Э.</u> , Гусейн-заде Н.Г., Князев А.В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Скворцова Н.Н., Соколов А.С., Степахин В.Д., Шишилов О.Н. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ПЛАТИНЫ НА ОКСИДНЫХ НОСИТЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ПОДПОРОГОВОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА.....	333
<u>Кудряшов М.А.</u> , Мочалов Л.А., Прохоров И.О., Вшивцев М.А., Кудряшова Ю.П., Слаповская Е.А. ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК GaS НА РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПОДЛОЖЕК С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ.....	335
<u>Курявый В.Г.</u> , Зверев Г.А., Бузник В.М. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОРОШКОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА.....	337

<u>Мочалов Л.А.</u> , Кудряшов М.А., Прохоров И.О., Вшивцев М.А. СИНТЕЗ ПРОЗРАЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ.....	339
<u>Прокопенко Н.А.</u> , Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Крысина О.В., Петрикова Е.А., Толкачев О.С., Шугуров В.В., Ахмадеев Ю.Х., Углов В.В., Шмаков А.Н. ВАКУУМНО-ДУГОВОЕ ПЛАЗМЕННО-АССИСТИРОВАННОЕ НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ВЭС И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИ.....	341
Кудряшов М.А., Мочалов Л.А., <u>Прохоров И.О.</u> , Вшивцев М.А., Кудряшова Ю.П., Слаповская Е.А., Князев А.А ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ GaO-GaN В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ.....	343
<u>Смирнова К.В.</u> , Иванова П.А., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Рыбкин В.В. ПЛАЗМЕННО-РАСТВОРНЫЙ СИНТЕЗ ФЕРИТОВ КОБАЛЬТА С СТРУКТУРОЙ ТИПА ШПИНЕЛЬ.....	345
<u>Филимонова Е.А.</u> , Шавелкина М.Б., Амиров Р.Х., Иванов П.П. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНВЕРСИЮ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ПРИ СИНТЕЗЕ ГРАФЕНА.....	347
<u>Шутов Д.А.</u> , Карташов С.И., Иванов А.Н., Рыбкин В.В. СПЕКАНИЕ НИТРАТОВ ЦИНКА И ЖЕЛЕЗА ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	349
<u>Иванов Ю.Ф.</u> , Прокопенко Н.А., Петрикова Е.А., Шугуров В.В., Толкачев О.С. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛЕНОК ВЭС, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ.....	351
<u>Макарова С.В.</u> , Субботин Д.И., Снетов В.Н., Коликов В.А., Пинчук М.Э. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ ДИСПЕРСИЙ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА.....	353
<u>Сироткин Н.А.</u> , Хлюстова А.В. ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИАНИЛИН+WO ₃ И ИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	355
<u>Хлюстова А.В.</u> , Шибеева В.Д., Сироткин Н.А., Евдокимова А.В. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЗОЛЕЙ WO ₃ И MoO ₃	357
<u>Пискарев М.С.</u> , Скрылева Е.А., Сенатулин Б.Р., Зиновьев А.В., Гильман А.Б., Кузнецов А.А ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, ОБРАБОТАННЫХ В РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	359
Алфавитный указатель.....	361

Пленарные доклады

СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЁМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В РАЗРЯДАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

CREATION AND APPLICATION OF VOLUME PLASMA FORMATIONS IN LOW PRESSURE DISCHARGE

Коваль Н.Н.
Koval N.N.

*ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН,
634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3*

Рассмотрены принципы действия, основные характеристики, особенности конструкций и примеры применения большеобъемных плазменных образований, создаваемых в дуговых и тлеющих несамостоятельных разрядах низкого давления. Показано, что плазма таких разрядов может использоваться как для непосредственной обработки помещённых в неё материалов и изделий, так и в качестве эмиттера электронов при создании эффективных источников электронов с пучками большого сечения для использования в научных и технологических целях.

The principles of operation, main characteristics, design features and examples of the use of large-volume plasma formations created in arc and glow non-self-sustaining low-pressure discharges are considered. It is shown that the plasma of such discharges can be used both for direct processing of materials and products placed in it, and as an electron emitter in the creation of efficient electron sources with large beams for scientific and technological purposes.

Использование плазмы в качестве рабочего инструмента для осуществления эффективных плазмохимических процессов получения нужных химических соединений, утилизации экологически вредных отходов производства, обработки и модификации поверхности материалов и изделий, а также в качестве плазменных эмиссионных структур подразумевает создание значительных (до нескольких м³) её объёмов в основном с однородным распределением концентрации в рабочих областях, занимаемых плазменными образованиями. Для создания таких плазменных образований целесообразно использовать разряды, тип которых будет определять параметры генерируемой плазмы и, соответственно, её технологические возможности.

Одним из эффективных способов создания однородной низкотемпературной плазмы в значительных объёмах при относительно низких (0,01-1) Па давлениях является использование несамостоятельного разряда низкого давления с комбинированным накалённым и полым катодом, который зажигается и горит в стационарном режиме при токах от единиц до сотен ампер и напряжениях горения десятки вольт, генерируя в объёмах до ≈ 1 м³ плазму с концентрацией 10^9 - 10^{10} см⁻³ и удовлетворительным (не хуже ± 20 %) распределением плотности по объёму. Рассмотрен принцип действия, основные конструктивные особенности

плазмогенераторов как аксиально симметричного, так и протяженного типа на основе несамостоятельного дугового разряда низкого давления, а также их основные характеристики и параметры генерируемой плазмы. Созданные на этой основе ионно-плазменные установки позволили реализовать ряд комплексных технологических процессов обработки поверхности материалов и изделий, включая ионно-плазменную очистку, азотирование и плазменно-ассистированное электродуговое напыление функциональных покрытий с целью упрочнения и повышения износостойкости поверхности. Планируется использование созданных плазмогенераторов для реализации процессов упрочнения материалов при *in situ* диагностике создаваемых слоёв и покрытий с использованием методов синхротронных исследований.

Ещё одним из эффективных способов генерации плазмы в больших объёмах является использование несамостоятельной формы тлеющего разряда с полым катодом при низком давлении. Инжекция в катодную полость потока электронов от специального источника позволяет кардинально изменять характеристики разряда, позволяя в квазистационарном режиме достигать токов в сотни ампер при низком ≈ 100 В напряжении горения разряда. Генерируемые при этом пучково-плазменные образования с концентрацией заряженных частиц до $\approx 10^{12}$ см⁻³ в объёмах $\approx 0,2$ м³ при давлении ≈ 1 Па обеспечивают среднюю плотность ионного тока насыщения на полый анод в несколько мА/см² с неоднородностью не хуже ± 20 %. Созданные на этой основе источники плазмы используются для реализации технологий упрочнения поверхности материалов и изделий.

Рассмотрены также примеры генерации импульсной плазмы в дуговых разрядах низкого давления, которая используется как эффективный эмиттер электронов в электронных источниках для получения пучков большого сечения. Разработанные и созданные источники электронов на энергию до 200 кэВ и среднюю мощность в несколько киловатт с выводом пучка с сечением ≈ 10 см² в атмосферу через фольговое выпускное окно используется для реализации радиационно-химических процессов и в экспериментах по электронно-пучковой обработке сельхозпродукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 3.2.6.

СВОЙСТВА РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

DC DISCHARGE PROPERTIES IN A SUPERSONIC FLOW: NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENT

Фирсов А.А., Тарасов Д.А., Добровольская А.С., Трошкин Р.С.,
Перевощиков Е.Е., Битюрин В.А., Бочаров А.Н.
Firsov A.A., Tarasov D.A., Dobrovolskaya A.S., Troshkin R.S.,
Perevoshchikov E.E., Bityurin V.A., Vocharov A.N.

*ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13.
e-mail: af@jih.org*

В докладе представлены подходы по управлению сверхзвуковым течением в каналах и на поверхностях с механическими элементами с помощью разряда постоянного тока, а также примеры применения такого разряда для организации воспламенения и стабилизации пламени в сверхзвуковом потоке. Несмотря на значительный объем прикладных исследований, свойства разряда описаны не полностью. В работе рассмотрены свойства разряда с током 0,5-7 А и напряжением до 2 кВ в продольной и продольно-поперечной конфигурациях в потоке с числом Маха $M=2$. Экспериментально и с помощью численного моделирования в программных комплексах Plasmaero и FlowVision определены температура и диаметр плазменного канала, а также поля газодинамических величин в области взаимодействия разряда с потоком. Для продольно-поперечной конфигурации определены зависимости длины петли и частоты переполюсов от тока и межэлектродного расстояния, описан процесс переполюсов.

The report presents approaches to controlling supersonic flow in channels and near surfaces with mechanical elements using a direct current discharge, as well as examples of the use of such a discharge to organize ignition and flame stabilization in a supersonic flow. Despite a significant amount of applied research, the properties of the discharge are not fully described. The paper considers the properties of a discharge with a current of 0.5-7 A and a voltage of up to 2 kV in longitudinal and longitudinal-transverse configurations in a flow with Mach number $M=2$. Experimentally and with the help of numerical simulation in Plasmaero and FlowVision software packages the temperature and diameter of the plasma channel, as well as the fields of gas-dynamic quantities in the region of interaction between the discharge and the flow, are determined. For the longitudinal-transverse configuration, the dependences of the loop length and the re-breakdown frequency on the current and interelectrode distance are determined, the process of re-breakdown is described.

Разряд постоянного тока рассматривается как удобный элемент для управления течением в сверхзвуковом потоке. Так, например, показана возможность управления структурой скачков уплотнения в сверхзвуковом воздухозаборнике [1] и сверхзвуковом канале, а также силой, действующей в потоке на элемент управления около плоской стенки [2]. Ведутся работы по совершенствованию концепции плазменно-стимулированного горения, которая представляет собой перспективный подход к организации стабильного воспламенения и горения в сверхзвуковом потоке [3].

Широкий спектр прикладных задач поддерживает интерес к свойствам разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке, которые еще не полностью опи-

саны. Для получения подробной информации о локальных характеристиках разряда и течения газа вблизи разряда было решено рассматривать разряд постоянного тока в простейшей постановке: в ядре сверхзвукового потока (т.е. вдали от стенок), в конфигурации между двумя коаксиальными электродами, расположенными параллельно потоку. Такая конфигурация была реализована в эксперименте в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50 ОИВТ РАН для обеспечения отсутствия части канала тока, перпендикулярного потоку. Разряд с током 0,5–7 А зажигался в сверхзвуковом потоке ($M = 2$, $T_g = 167$ К, $P = 22$ кПа) между тонкими электродами ($D \sim 1$ мм) с расстоянием между ними 30 мм.

Параметры течения в расчетах и геометрия модели были идентичны экспериментальной. Эта конфигурация обладала осевой симметрией и была рассчитана в двумерной осесимметричной постановке в программных комплексах PlasmAero и FlowVision. PlasmAero разработан в ОИВТ РАН для решения задач плазменной аэродинамики; используемая в данной работе модель учитывает 11 компонентов (N_2 , O_2 , NO , N , O , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ , N^+ , O^+ , e) и набор из 49 реакций. FlowVision — это коммерческий код, в который недавно разработчики добавили одножидкостную модель (МГД-приближение) электродинамики, этот CFD код включает стандартные модели турбулентности и поддерживает возможность выполнения 3D-расчетов. Сравнение результатов расчетов с использованием этих двух подходов позволит оценить применимость пакета FlowVision для решения задачи моделирования электрического разряда в потоке и последующего моделирования плазменно-стимулированного горения.

В результате исследования экспериментально и численно получены ВАХ, поля температур (4000-7000К в зависимости от тока разряда 1-6А) и других величин, а также сделано сопоставление полученных результатов. Температура разряда падает вдоль разряда; с увеличением тока разряда температура растет медленно из-за процесса диссоциации молекул азота [4].

Эксперименты по исследованию продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом потоке у стенки сверхзвукового канала были выполнены для двух межэлектродных расстояний и нескольких величин разрядного тока. В эксперименте регистрировались зависимости тока и напряжения от времени, а также велась высокоскоростная видеосъемка. Было показано, что при фиксированном токе разряда $\sim 3,6$ А увеличение межэлектродного расстояния с 5 до 6 мм приводит к увеличению максимальной длины разряда на 15-20 мм и уменьшению частоты повторного пробоя с 17,2 кГц до 12,8 кГц. При фиксированном межэлектродном расстоянии, например, 6 мм, увеличение тока разряда с 1,7 А до 3,6 А приводит к уменьшению частоты повторного пробоя с 15,4 кГц до 12,8 кГц, увеличению длины разряда на ~ 20 мм. Падение напряжения на приэлектродных

слоях разряда (катодное плюс анодное падение напряжения) в рассматриваемых условиях составило 100-150 В [5].

Численное моделирование продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха в двумерном приближении, выполненное в Plasmaero, позволило сформулировать качественную модель процесса, включающую фазы начального формирования контрагированного канала, формирования и распада перемычек, квазипериодического вида тока и напряжения, и формирования температурного следа. Установлена роль полевых реакций ионизации и диссоциации, что может быть важно для применения продольно-поперечного разряда в технологиях организации горения или других высокотемпературных процессов в потоках газозвудушных смесей. Показано, что с увеличением тока растет длина токовой петли, а также увеличивается период перепробов. Процесс повторного пробоя происходит, когда приведенное электрическое поле становится достаточно высоким, чтобы обеспечить образование достаточного количества электронов за счет полевых реакций в приэлектродной области. Таким образом, за счет полевых реакций образуется новая перемычка, которая затем нагревается проходящим током, и в перемычке начинает преобладать термическая ионизация, обеспечивается прохождение всего тока по этому каналу и гибель старого длинного канала [6].

Численное моделирование продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха в трехмерной постановке было выполнено во FlowVision. Получена трехмерная динамика разряда в потоке (поля температуры, плотности, скорости, плотности тока и до.), сделаны выводы о влиянии пограничного слоя на разряд, и о соответствии скорости перемычки скорости потока.

Работа ведется при поддержке гранта РФФ № 21-79-10408.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Falempin F., Firsov A.A., Yarantsev D.A., Goldfeld M.A., Timofeev K., Leonov S.B.* // Experiments in Fluids. – 2015. – Vol. 56. – No. 54.
2. *Watanabe Y., Elliott S., Firsov A., Houpt A., Leonov S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2019. – Vol. 52. – Is. 44. – No. 444003.
3. *Firsov A.A.* // Aerospace. – 2023. – Vol. 10. – No. 204.
4. *Firsov A., Bityurin V., Tarasov D., Dobrovolskaya A., Troshkin R., Bocharov A.* // Energies. – 2022. – Vol. 15. – No. 7015.
5. *Perevoshchikov E.E., Firsov A.A.* // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49. – No. 5. – P. 634–639.
6. *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Dobrovolskaya A.S., Popov N.A., Firsov A.A.* // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49. – No. 5. – P. 575–586.

СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ И ВОЗДУХА

DEVELOPMENT OF POWERFUL HIGH-EFFICIENCY UV RADIATION SOURCES AND THEIR APPLICATION FOR DISINFECTION AND PURIFI- CATION OF WATER AND AIR

Василяк Л.М.¹, Кудрявцев Н.Н.², Костюченко С.В.³
Vasilyak L.M.¹, Kudryavtsev N.N.², Kostyuchenko S.V.³

¹*Объединенный институт высоких температур РАН,
Ижорская ул. 13, с. 2, Москва, 125412, Россия*

²*Московский физико-технический институт, Москва, Россия*

³*НПО "ЛИТ", Москва, Россия*

e-mail: vasilyak@ihed.ras.ru; vasilyak@yandex.ru

Приведен обзор история создания в России мощных УФ-ламп (200-1000 Вт) с высокой эффективностью преобразования (35- 40%) в линию 254 нм и рабочим ресурсом 12 тысяч часов на основе разряда низкого давления в смесях инертных газов и паров ртути. Приведены примеры использования созданных УФ-ламп для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей, а также для очистки воздуха от запахов.

An overview is given of the history of the creation in Russia of powerful UV lamps (200-1000 W) with high conversion efficiency (35-40%) into a 254 nm line and a working life of 12 thousand hours based on a low-pressure discharge in mixtures of inert gases and mercury vapors. Examples of the use of created UV lamps for disinfection of water, air and surfaces, as well as for cleaning the air from odors are given.

Основным стимулом создания мощных источников УФ излучения была проблема поиска методов обеззараживания воды, альтернативных методу хлорирования. Наиболее эффективным источником бактерицидного УФ излучения является электрический разряд в парах ртути низкого давления. УФ-излучение состоит из двух резонансных линий с длинами волн 185 нм и 254 нм. Доля УФ излучения на линиях 185 и 254 нм составляет 90-98% от всего излучения разряда. Оптимальное давление паров ртути составляет 0,7-1,5 Па, а давление инертных газов (чаще всего неона или аргона, или их смеси) 10-500 Па. При таких условиях 30-50% от электрической мощности разряда переходит в излучение на резонансной линии ртути с длиной волны 254 нм, которая лежит вблизи максимума кривой бактерицидной эффективности. При увеличении мощности разряда низкого давления в аргоне с парами ртути мощность генерации линии 254 нм растет, однако к.п.д. быстро падает. Именно по этой причине наиболее мощная из серийно выпускаемых УФ-ламп имела электрическую мощность 75 Вт при КПД около 33%. Резкое падение КПД связано с падением напряженности электрического

поля в положительном столбе разряда, что приводит к падению энергии электронов и падению эффективности генерации УФ-излучения. Для решения задачи по увеличению погонной УФ-мощности при сохранении эффективности генерации нами были сделаны следующие принципиальные и технические улучшения: Изменен состав буферного газа, вместо чистого аргона смесь Ar-Ne; Уменьшили давление буферного газа; Решили проблему эмиссии щелочных металлов из оксидных электродов; Увеличили частоту тока разряда от 50 Гц до 30-50 кГц; Заменяли металлическую ртуть на амальгаму; Впервые стали использовать защитный слой на внутренней поверхности кварцевой трубки; Решили проблему разрушения катодов мощных ламп при зажигании лампы; Для предотвращения образования озона в воздухе исключили выход озonoобразующей линии 185 нм, для чего использовали безозоновый кварц с добавкой TiO₂; Были созданы специальные электронные источники запуска и питания лампы с переменным стабилизированным током с частотой 30-50 кГц. Полезный срок службы определяется временем поддержания достаточного уровня мощности УФ излучения. Исследования показали, что падение мощности УФ-излучения связано с потемнением внутренней стенки колбы, что вызвано внедрением атомов ртути в кварц. Поскольку линия 254 нм является резонансной, то внедренные атомы ртути поглощают эту линию, и затем сбрасывают возбуждение без переизлучения. Для защиты кварцевой стенки были созданы защитные покрытия из оксида иттрия и оксида алюминия. Наличие защитного слоя существенно снижает спад мощности УФ излучения и уменьшение коэффициента пропускания коррелирует со спадом мощности УФ излучения. Спад мощности излучения линии 254 составляет около 15% после 12 тысяч час работы лампы и около 25% после 21 тысячи час. В России создано производство разработанных УФ ламп разных модификаций. На основе созданных УФ ламп были разработаны УФ оборудование и построены крупнейшие в мире станции по обеззараживанию питьевых и сточных вод. Разработаны и выпускаются в России различные открытые и закрытые мощные УФ-облучатели для обеззараживания воздуха и поверхностей. Проведены исследования и создано оборудование для очистки воздуха от примесей и запахов путем обработки потока воздуха излучением двух линий 185 и 254 нм, что приводит к образованию активных окислительных центров, прежде всего радикалов OH[·], O[·], озона O₃ и др., которые реагируют с примесями.

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЭЦР ИСТОЧНИКИ ПРОТОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

HIGH-CURRENT ECR PROTON SOURCES FOR LINEAR ACCELERATORS

Скалыга В.А., Голубев С.В., Изотов И.В., Выбин С.С., Киселёва Е.М.,
Поляков А.В., Разин С.В.¹

Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Vybin S.S., Kiseleva E.M., Polyakov A.V.,
Razin S.V.

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,
г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 4б.
e-mail: skalyga@ipfran.ru*

Источники ионов являются одним из ключевых элементов любых ускорителей тяжелых заряженных частиц. С повышением характеристик ускорительных систем растут и требования к инжекторам ионов. В наиболее крупных проектах, таких как “The International Fusion Materials Irradiation Facility” (IFMIF), “Large Hadron Collider” (LHC), “European Spallation Source” (ESS) требуются пучки ионов водорода и дейтерия с током на уровне 100 мА при нормализованном эмиттансе не более 0.2 π ·мм·мрад. Одним из перспективных источников ионов является источник на основе разряда, поддерживаемого в открытых магнитных ловушках мощным излучением гиротронов в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Использование мощного миллиметрового излучения современных гиротронов обеспечивает поддержание разряда с рекордно высоким для ЭЦР ионных источников удельным энергозатратом (до 200 Вт/см³), что позволяет поддерживать плотную плазму (до 10¹⁴ см⁻³) с оптимальной для диссоциации и ионизации водорода температурой 50-100 эВ. В экспериментах были получены непрерывные и импульсные протонные и дейтронные пучки с током до 100 - 500 мА и RMS нормализованным эмиттансом на уровне 0.2 π ·мм·мрад. Продемонстрирована возможность генерации чистого протонного пучка без молекулярных ионов (доля примесных ионов менее 0,1%).

Ion sources are one of the key elements of any heavy particle accelerator. As the characteristics of accelerator systems improve, so do the requirements for ion injectors. In the largest projects, such as “The International Fusion Materials Irradiation Facility” (IFMIF), “Large Hadron Collider” (LHC), “European Spallation Source” (ESS), hydrogen and deuterium ion beams with a current of 100 mA at normalized emittance not more than 0.2 π ·mm·mrad are needed. One of the promising sources of ions is a source based on a discharge maintained in open magnetic traps by powerful radiation of gyrotrons under conditions of electron cyclotron resonance (ECR). The use of powerful millimeter radiation from modern gyrotrons ensures the maintenance of a discharge with a record high specific energy input for ECR ion sources (up to 200 W/cm³), which makes it possible to maintain a dense plasma (up to 10¹⁴ cm⁻³) with an optimum temperature of 50–100 eV for hydrogen dissociation and ionization. In experiments, continuous and pulsed proton and deuteron beams were obtained with a current of up to 100 - 500 mA and an RMS normalized emittance of 0.2 π ·mm·mrad. The possibility of generating a pure proton beam without molecular ions (the fraction of impurity ions is less than 0.1%) is demonstrated.

A distinctive feature of gasdynamic ECR ion sources being under development at IAP RAS is a confinement regime of a high density plasma. It was demonstrated [1–3] that the use of high-frequency gyrotrons is very beneficial for a dense plasma production and high-current ion beams formation. Previously, ion beams of both light (hydrogen) and heavy (nitrogen, argon) elements were extracted from the plasma of ECR discharge sustained by 37.5 [1] and 75 GHz [3] radiation, demonstrating ion beam currents on the level of 100–500 mA with normalized RMS emittance below 0.2π mm mrad in a pulsed operation mode. This success stimulated the construction of the facility named GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) [4] at IAP RAS, which main application is a powerful neutron generator [5]. The scheme of the facility is shown in Fig. 1. 28 GHz/10 kW and 37.5 GHz/20 kW CW gyrotrons are used for the plasma heating, manufactured by Gycom. These microwave generators are equipped with power supplies suitable for CW or pulsed operation. The plasma trap has an all-permanent magnet design. To ensure sufficient plasma confinement, the magnetic field configuration is designed to be similar to a simple mirror trap close to the system axis, and the magnetic field strength is 1.5 T at plugs and 0.25 T at the trap centre, yielding the mirror ratio of 6. The distance between magnetic mirrors is 12 cm. The magnet bore is 50 mm, thus allowing the use of a water-cooled plasma chamber with a vacuum bore of 32 mm. An ion beam extraction system has been designed to use the acceleration voltage of up to 100 kV. A high source potential requires a development of an appropriate high-voltage insulation of the plasma chamber from unbiased components of the facility. A quasi-optical system is implemented instead of a convenient waveguide DC-break. The electromagnetic radiation of the gyrotron is converted to the Gaussian beam, which then propagates in open air through the gap of 15 cm, acting as a DC-break. The radiation is received by the horn antenna, converted into a TE₁₁ mode of a circular waveguide, and then focused to the plasma with a microwave-to-plasma coupling system embedded into the vacuum chamber. Overall transmission efficiency of the beam line is 95%, (estimated when no reflection from the plasma is present).

The latest experiments showed that hydrogen plasma emissivity of >1 A/cm² could be reached. A new type of extraction system geometry able to handle beam current densities of >1 A/cm² has been developed and experimentally tested. Proton beams with current of 130 mA were successfully obtained using 4 mm extraction aperture and extraction voltage of 40 kV. Developed ion source will be used as a proton injector for the DARIA project (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications) is the development and prototyping of a compact neutron source as a ready-to-mass production research complex, which includes an ion source, a high-current low-energy proton accelerator, a target assembly, and a set of neutron instruments. Proton injector will generate a low-energy primary ion beam with the following parameters:

proton current 100 mA, pulse repetition rate up to 100 Hz, pulse duration 100 μ s, normalized RMS emittance less than 0.4π mm mrad, the fraction of molecular ions in the beam less than 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Golubev S., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. – 2007. – Vol. 256. – No. 537.
2. *Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Vodopyanov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T.* // Rev. Sci. Instrum. – 2016. – Vol. 87. – No. 02A716.
3. *Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Golubev S., Razin S.* // Rev. Sci. Instrum. – 2017. – Vol. 88 – No. 033503.
4. *Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Razin S., Bokhanov A., Kazakov M., Lapin R., Shaposhnikov R., Mironov E., Voitovich A., Palashov O., Denisov G., Belousov V., Sobolev D., Shmelev M., Glyavin M., Tsvetkov A., Morozkin M., Proyavin M.* // AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 2011. – No. 030013.
5. *Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Strelkov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T.* // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 118. – No. 093301.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

CURRENT STATUS OF HIGH-FREQUENCY PLASMA MODIFICATION OF MATERIALS AT REDUCED PRESSURE

Абдуллин И.Ш.¹, Некрасов И.К.^{1,2}, Сагитова Ф.Р.³
Abdullin I.Sh.¹, Nekrasov I.K.^{1,2}, Sagitova F.R.³

¹ООО «Плазма-ВСТ», Россия, 420081

²ФГАОУ ВО КФУ, Россия, 423604

³ФГАОУ ВО КНИТУ, Россия, 420015

e-mail: *plasma.vst@gmail.com*

Рассмотрены основные механизмы обработки в ВЧ разряда пониженного давления.

The basic mechanisms of low-pressure HF discharge processing.

Одним из зарекомендовавших себя плазменных способов является метод обработки в ВЧ разрядах пониженного давления [1]. Широкое распространение данный метод получил при обработке полимеров [2], кожи и меха [3], волокнистых материалов, металлических изделий [4,5]. Главным механизмом обработки в ВЧ разрядах пониженного давления является низкоэнергетическая ионная бомбардировка поверхности обрабатываемого материала. Ионы, бомбардирующие поверхность, достигают энергий W_i до 100 эВ, что позволяет разрывать межатомные связи и инжектировать эти ионы вглубь материала [1].

При обработке в ВЧ разрядах пониженного давления комбинируются следующие механизмы модификации: ионная имплантация при энергиях до 100 эВ, термическое воздействие, плазмохимические процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашипов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Издательство Казанского университета, 2000.
2. Abdullin I.S., Zheltuhin V.S., Nekrasov I.K., Sagitova F.R. // PFOR. – 2022. – Vol. 23. – No. 4. – P. 525–543.
3. Абдуллин И.Ш., Шаехов М.Ф., Кудинов В.В. // Материаловедение. – 2004. – № 6. – С. 52–56.
4. Абдуллин И.Ш., Хубатхузин А.А. // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 11. – С. 625–627.
5. Хубатхузин А.А., Абдуллин И.Ш., Христюлова В.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 23. – С. 25–28.

ДИНАМИКА ОБЪЕМНОЙ И ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ СТРУКТУРЫ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА ПРИ УСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ ФОРМИРУЕМОЙ ИМ ПЛАЗМЫ В РЕЛЬСОВОЙ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ

DYNAMICS OF THE VOLUME AND NEAR-ELECTRODE STRUCTURE OF A HIGH-CURRENT DISCHARGE DURING THE ACCELERATED MOVEMENT OF PLASMA IN THE RAIL GEOMETRY OF ELECTRODES

Акишев Ю.С.^{1,2}, Петряков А.В.¹, Фефелова Е.А.¹
Akishev Yu.S.^{1,2}, Petryakov A.V.¹, Fefelova E.A.¹

¹ АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия, Москва, Троицк, ул.Пушковых владение 12

² НИЯУ МИФИ, Россия, Москва, Каширское шоссе 31

e-mail: petryakov@triniti.ru

Плазменные ускорители (ПУ), формирующие высокоскоростные плазменные струи за счет силового воздействия собственным магнитным полем, работают при больших токах. Из-за этого на электродах могут возникать токовые пятна (ТП) с высокой плотностью тока, которые приводят к эрозии электродов и ограничивают срок их службы. В работе исследуются токовые режимы ПУ с импульсным разрядом между двумя длинными ($L=30$ см) и параллельными электродами цилиндрической формы диаметром 10 мм при двух расстояниях между осями цилиндров $h=30$ и 22 мм.

Plasma accelerators, which form high-speed plasma jets due to the force effect of their own magnetic field, operate at high currents. Because of this, current spots with high current density can occur on their electrodes, which lead to erosion of the electrodes and limit their service life. In this paper, we study the current regimes of a plasma accelerator with a pulsed discharge between two long ($L=30$ cm) and parallel cylindrical electrodes 10 mm in diameter at two distances between the cylinders' axes $h=30$ and 22 mm respectively.

Большой ток (до 25 кА) был обеспечен за счет разряда конденсаторной батареи $C=1000$ мкФ с напряжением зарядки U_0 до 5 кВ. Разряд инициировался локально на одном конце электродов. Затем образовавшееся облако плазмы быстро перемещалось к противоположному концу за счет силового воздействия собственным магнитным полем и вылетало с большой скоростью из зоны разряда. Сильноточный разряд исследовался в азоте и гелии при давлениях от 4 до 50 Торр как без токовых пятен, так и с токовыми пятнами на электродах. Токовые пятна возникали только в азоте при давлении 50 Торр. При меньших давлениях токовые пятна отсутствовали как в разряде в гелии, так и в азоте.

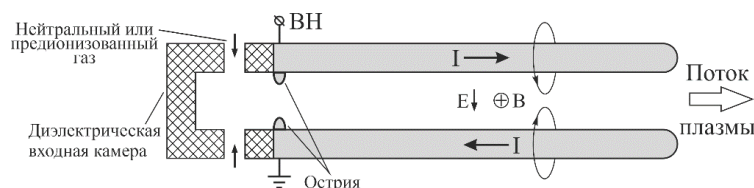


Рис. 1. Эскиз плазменного ускорителя с рельсовой геометрией электродов

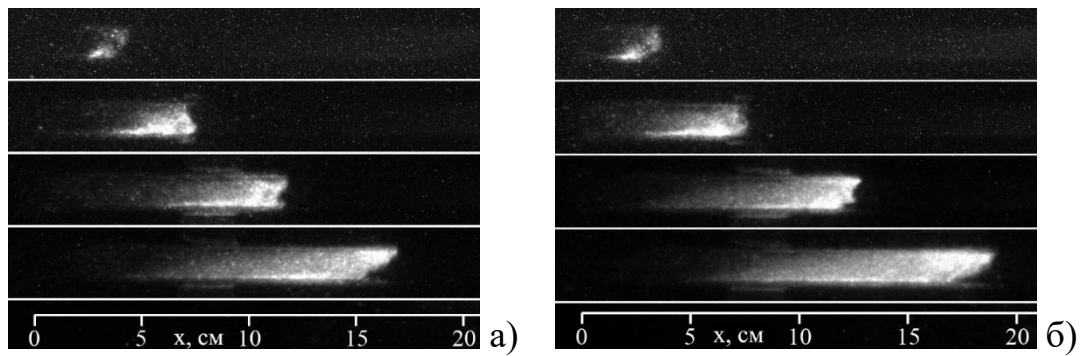


Рис.2. Два набора из четырех изображений разряда, показывающих эволюцию формы сгустка плазмы при движении вдоль электродов. Токовых пятен нет. Гелий, $P = 20$ Торр, $h = 22$ мм. а) $U_0 = 4$ кВ; б) $U_0 = 5$ кВ. Катод снизу, анод сверху. Интервал между кадрами 5 мкс. $X = 0$ - место инициирования разряда

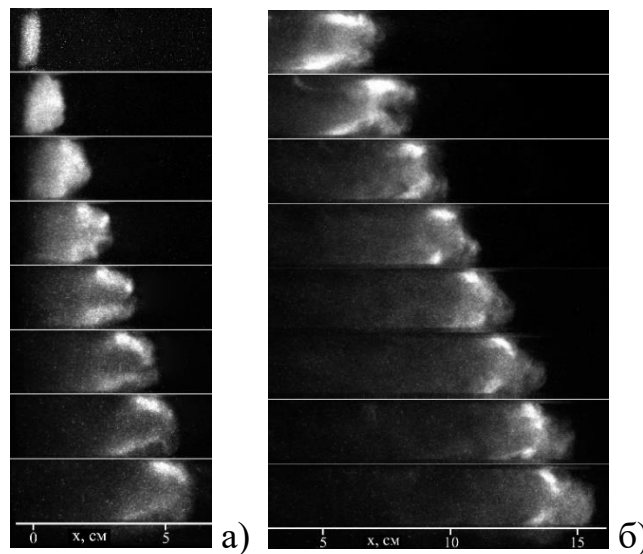


Рис. 3. Два набора (а и б) из 8 изображений разряда, показывающих эволюцию плазменного облака, движущегося вдоль электродов. Токовые пятна есть. Катод снизу, анод сверху. Азот, $P=50$ Торр, $h=30$ мм, $U_0=5$ кВ. Интервал между кадрами – 5 мкс (а) и 10 мкс (б). $X = 0$ - место инициирования разряда

Как показал эксперимент, ТП на электродах и исходящие из них нити тока возникают в процессе движения сгустка плазмы только в азоте при низких скоростях плазмы ($V < 5,0$ км/с) и давлениях, превышающих 50 Торр. Плотность тока в ТП не превышает 10^6 А/см². В режиме с ТП анодные пятна движутся вдоль электродов непрерывно, а катодные – скачками, поскольку скорость их движения по катоду меньше скорости анодных пятен по аноду. Данный эффект может влиять на скорость движения плазмы вдоль электродов. В отсутствие ТП передний фронт плазмы по мере увеличения скорости все больше наклоняется в сторону катода. Возможно, это связано с конечностью времени формирования катодного слоя в движущейся плазме. В таком случае изучение катодных процессов в сильноточных ПУ является актуальной задачей.

Работа выполнялась в рамках Государственного контракта № Н.4ф.241.09.22.1127 от 25.08.2022.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

POSSIBILITIES OF PLASMA APPLICATION FOR THE PRODUCTION AND POSTHARVEST PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTS

Титов В.А.¹, Наумова И.К.²
Titov V.A.¹, Naumova I.K.²

¹*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, Россия, 153045, г. Иваново, ул Академическая, 1, email: tva@isc-ras.ru*

²*Ивановский государственный университет, Россия, 153025, г. Иваново, ул. Ермака, 39 e-mail: titov25@gmail.com*

Представлен обзор приложений низкотемпературной плазмы в области производства, хранения и первичной переработки сельскохозяйственной продукции. Выделены основные задачи использования плазмы, в том числе, для обработки воды и растворов, применяемых в сельском хозяйстве. Рассмотрены способы генерации плазмы, процессы образования активных частиц, а также влияние плазмохимической обработки на всхожесть семян и развитие растений, на обезвреживание патогенных микроорганизмов. Приведены примеры использования плазмы в системах гидропоники. Отдельно рассмотрены возможности применения плазмы для получения фитостимуляторов и антимикробных препаратов на основе хитозана.

The report presents an overview of low-temperature plasma applications for solving the problems of production, storage and primary processing of agricultural products. The main areas of plasma application are highlighted, including the treatment of water and solutions used in agriculture. The methods and settings for plasma generation, the processes of active species formation, as well as the impact of plasma chemical treatment on germination of seeds and plant development, the neutralization of pathogens are considered. Examples of plasma application in hydroponics systems are given. The possibilities of using plasma for obtaining phytostimulants and antimicrobial agents based on chitosan are considered separately.

В последние годы интенсивно развивается новое направление прикладной плазмохимии, которое получило название «плазменное сельское хозяйство» (“plasma agriculture”) [1-7]. С ним тесно связаны и различные применения плазмы в области производства и хранения пищевых продуктов [8, 9].

В докладе обсуждаются основные задачи, которые могут быть решены с использованием плазмы:

- 1) предпосевная обработка семян с целью улучшения всхожести и ускорения развития растений;
- 2) обезвреживание патогенных микроорганизмов как в почве, так и на поверхности семян или сельскохозяйственных продуктов для повышения их качества, увеличения сроков хранения, улучшения сохранности семенного фонда;

- 3) разрушение токсичных веществ и патогенных микроорганизмов в растворах, циркулирующих в системах гидропоники;
- 4) первичная переработка сельскохозяйственного сырья (например, делигнификация грубых лубяных волокон и др.);
- 5) плазмохимическое получение (или модификация) стимуляторов всхожести и роста растений;
- 6) плазмохимическое получение (или модификация) материалов для хранения продуктов.

Рассмотрены способы генерации плазмы и используемые установки, в том числе, для обработки жидких сред, приведены физические характеристики плазмы при различных способах генерации. Представлены данные о концентрациях азот- и кислородсодержащих активных частиц, выделены основные процессы их образования и дальнейших превращений в плазме и в контактирующей с плазмой жидкости. Именно активные формы азота и кислорода рассматриваются в литературе как главные агенты, обеспечивающие биологическую активность плазмы или воды после плазменной обработки.

На ряде примеров показано влияние как непосредственной обработки плазмой атмосферного давления на всхожесть семян, раннее развитие растений и на обезвреживание патогенных микроорганизмов, так и использование для этих целей воды или водных растворов, подвергнутых плазменной обработке. Рассмотрены примеры использования плазмы в рециркуляционных системах гидропоники. Показаны возможности применения плазмы для получения фитостимуляторов и антимикробных препаратов на основе хитозана, в том числе, модифицированного наночастицами металлов или оксидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Panka D.* // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12. – No. 841.
2. *Guo D., Liu H., Zhou L., Xie J., He C.* // *J Sci Food Agric*. – 2021. – Vol. 101. – No. 4891.
3. *Gao Y., Francis K., Zhang X.* // *Food Res Int*. – Vol. 157. – No. 111246.
4. *Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M.* // *Processes*. – 2020. – Vol. 8. – No. 1002.
5. *Bradu C.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2020. – Vol. 53. – No. 223001.
6. *Ito M., Oh J.S., Ohta T., Shiratani M., Hori M.* // *Plasma Process. Polym.* – 2018. – Vol. 15. – No. 1700073.
7. *Puač N., Gherardi M., Shiratani M.* // *Plasma Process. Polym.* – 2018. – Vol.15. – No. 1700174.
8. *Han Q.Y., Wen X., Gao J.Y., Zhong C.S., Ni Y.Y.* // *Food Chem.* – 2023. – Vol. 405 (Pt. A). – No. 134797.
9. *Zhao Y.-M., Patange A., Sun D.-W., Tiwari B.* // *Compr Rev Food Sci Food Saf.* – 2020. – Vol. 19. – No. 3951.

Секция 1

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ (ТЕРМОДИНАМИКА, ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА, ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ)

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТА ДВУХАТОМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРГОНА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF DIATOMIC ARGON COMPOUNDS IN LOW TEMPERATURE PLASMA

Мальцев М.А.^{1,2}, Морозов И.В.^{1,2}, Осина Е.Л.², Миненков Ю.В.^{2,3}
Maltsev M.A.^{1,2}, Morozov I.V.^{1,2}, Osina E.L.², Minenkov Y.V.^{2,3}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9., 141701

²Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, почтовый адрес г. Москва, ул. Ижорская, д.13, 125412

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Россия, Москва, ул. Косыгина, 4, 119991
e-mail: maksim.malcev@phystech.edu

В данном исследовании представлены результаты расчета термодинамических функций для ряда двухатомных соединений аргона, а также термодинамического моделирования равновесной низкотемпературной плазмы.

This study presents the results of the calculation of thermodynamic functions for a number of diatomic argon compounds and thermodynamic modeling of equilibrium low-temperature plasma.

Двухатомные соединения аргона являются слабосвязанными молекулами, поэтому их экспериментальное исследование затруднено. В то же время эти соединения встречаются как в астрофизических газах, так и лабораторных условиях, в частности, при использовании аргона в качестве буферного газа для масс-спектрометрии с тлеющим разрядом или индуктивно-связанной плазмой. Учитывая высокую концентрацию аргона в такой плазме, даже небольшое количество соединений Ar с другими компонентами плазмы может существенно влиять на получаемые масс-спектры [1].

Для количественного и качественного анализа распространенности соединений аргона (аргидов) в низкотемпературной плазме необходимы данные об их термодинамических функциях. Более того, для исследования влияния параметров генерации плазмы на результаты масс-спектрометрического эксперимента необходимы температурные зависимости термодинамических функций в широком диапазоне температур (до 20 000 К). В случаях, когда данные о молекулярных постоянных двухатомных соединений имеют недостаточную точность или они отсутствуют, термодинамические функции могут быть получены на основе расчета энергетического спектра молекулы из потенциала межатомного взаимодействия, который в свою очередь может быть определен на основе квантово-химического моделирования [2-5].

В данной работе представлены результаты расчета термодинамических функций ArCo^+ , ArV^+ , Ar_2 , Ar_2^+ , ArO , ArO^+ , ArH , ArH^+ , ArN , ArN^+ . Полученные функции были использованы для термодинамического моделирования состава плазмы тлеющего разряда, используемой в масс-спектрометре Thermo Scientific ELEMENT GD PLUS GD-MS.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Witte T.M., Houk R.S.* // Spectrochim. Acta Part B. – 2012. – Vol. 69. – No. 25.
2. *Мальцев М.А., Осина Е. Л.* // Вестник ОИВТ РАН. – 2019. – Т. 2. – № 41.
3. *Мальцев М.А., Осина Е.Л., Морозов И.В.* // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57. – № 42.
4. *Мальцев М.А., Осина Е.Л., Морозов И.В.* // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 58. – № 367.
5. *Maltsev M.A., Aksenova S.A., Morozov I.V., Minenkov Y., Osina E.L.* // J. Comput. Chem. – 2023. – Vol. 44. – No. 1189.

ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ ИОНОВ СИЛЬНО НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В РАМКАХ САМОСОГЛАСОВАННОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕОРИИ

DESCRIPTION OF COLLECTIVE ION DYNAMICS IN THE STRONGLY COUPLED PLASMAS WITHIN THE SELF-CONSISTENT RELAXATION THEORY

Файрушин И.И., Мокшин А.В.
Fairushin I.I., Mokshin A.V.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420008 г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: fairushin_ilnaz@mail.ru*

В данной работе развивается теоретический формализм, который позволяет описывать коллективную динамику сильно неидеальной классической однокомпонентной плазмы с юкавовским межчастичным взаимодействием. Подход основан на самосогласованной релаксационной теории коллективной динамики частиц сильно коррелированных неупорядоченных систем.

In this paper we developed theoretical formalism, which allows to describe of collective ion dynamics in the strongly coupled classical one-component plasmas with Yukawa interaction potential. This approach is based on the self-consistent relaxation theory of the collective dynamics in strongly correlated disordered multiparticle systems.

Развитие теории коллективной динамики неупорядоченных систем, состоящих из сильно взаимодействующих частиц (атомов, молекул, ионов и т. д.) является актуальной проблемой физики плазмы и конденсированных сред [1, 2]. Исчерпывающая информация о коллективном (кооперативном) движении частиц в равновесных системах дается такой ключевой величиной, как динамический структурный фактор (ДСФ) [1]. В данной работе будет представлен теоретический формализм, который позволяет рассчитывать ДСФ сильно неидеальной классической однокомпонентной плазмы. Причем входными величинами являются параметры неидеальности, экранировки и статический структурный фактор системы. Таким образом реализован основной принцип статистической механики конденсированных сред: для теоретического описания коллективной динамики частиц в равновесных жидкостях достаточно знать потенциал межчастичного взаимодействия и структурные характеристики. Результаты расчетов спектров ДСФ и дисперсионных характеристик в рамках предложенного подхода согласуются с данными моделирования и с теорией основанной на методе частотных моментов [2].

Авторы выражают признательность Фонду развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (проект № 20-1-2-38-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mokshin A.V., Fairushin I.I., Tkachenko I.M.* // *Phys. Rev. E.* – 2022. – Vol. 105. – Is. 025204.
2. *Arkhipov Yu.V., Askaruly A., Davletov A.E., Dubovtsev D.Yu., Donkó Z., Hartmann P., Korolov I., Conde L., Tkachenko I.M.* // *Phys. Rev. Lett.* – 2017. – Vol. 119. – Is. 045001.

Секция 2

ФИЗИКА ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ (В ПОСТОЯННЫХ, ПЕРЕМЕННЫХ, ВЧ И СВЧ ПОЛЯХ)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНО-ЯРКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МПК РАЗРЯДА

ELECTRICAL AND SPECTRAL-BRIGHTNESS CHARACTERISTICS OF THE MPC DISCHARGE

РЫЖКОВ С.В., Кузенов В.В., Воронина Е.А., Секачева М.Д.
Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V., Voronina E.A., Sekachyova M.D.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1,
e-mail: svryzhkov@bmstu.ru*

A plasmadynamic discharge of the MPC type implemented on the basis of erosive plasma accelerators is numerically studied (in such discharges, along with ohmic, the plasmadynamic heating mechanism can be predominant). For this class of discharges, a mathematical model has been formulated that adequately, fully and closely reflects the entire complex of non-stationary nonlinearly interconnected thermophysical, gas-dynamic, electromagnetic and radiation processes that take place in the considered discharges. The characteristic spatial structures of the MPC discharge in the ohmic regime, which is most often implemented in practical situations, are presented. The calculations performed in this work (and experimental data) indicate the ability of the MPC discharge to be a powerful emitter in the region of the vacuum UV spectral range with brightness temperatures at the level of 40 kK.

Радиационные процессы играют важную роль в энергобалансе плазмы МПК-разрядов и им подобных систем [1-14]. Энергия излучения, выходящего с ударно-волновой границы плазмы, может составлять значительную долю в подведенной к плазме энергии. Интегральный излучательный КПД (отношение энергии излучения $E_{\text{rad}\Sigma}$ во всем спектральном диапазоне полосы прозрачности газа на момент времени t к энергии, подведенной к плазме) существенно зависит от режима подвода энергии к плазменной нагрузке, т.е. от параметра режима A_m .

При формировании разряда в среде инертного газа (Ar), доля излучения в ВУФ-области спектра ($h\nu > 5,98$ эВ) составляет более 50-60% всей излучательной энергии при переходном и плазмодинамическом режимах ($A_m = 0,6 \div 1$). При этом МПК-разряд в плазмодинамическом режиме является более эффективным ВУФ-излучателем. При переходе к воздуху, доля ВУФ-излучения уменьшается с одновременным увеличением светового выхода в ИК и видимой ($h\nu = 0,1 \div 3,14$ эВ) и ближней УФ-области ($h\nu = 3,14 \div 5,98$ эВ) спектра. Основным механизмом перестройки эмиссионного спектра является экранировка коротковолнового излучения, выходящего из высокотемпературных кумуляционных областей, плазмой в зонах электромагнитного ускорения и внешних ударно-волновых границ разряда с последующим переизлучением в более длинноволновых областях спектра.

Спектральные яркостные температуры плазмы МПК-разряда характеризуют излучательные свойства наиболее плотной и высокотемпературной области, а именно, приосевой (кумуляционной) области и зоны плазмодинамического торможения на газе, и особенности прохождения генерируемых ими потоков излучения через периферийные области разряда и окружающий газ.

Длительность импульсов излучения в УФ- и ВУФ-областях спектра по уровню половинной интенсивности порядка длительности первого полупериода тока. В видимом диапазоне половинная длительность излучения в несколько раз больше, чем для УФ и ВУФ излучения, отражая факт перестройки эмиссионного спектра при уменьшении в течение времени разряда температуры и плотности плазмы. Максимумы потоков излучения практически совпадают с максимумом тока разряда.

В работе проведено моделирование и представлены расчетные данные интегрального излучательного КПД разряда на момент времени t_m первого максимума тока от параметра режима, а также характерные параметры и режимы работы МПК разряда.

Представленные результаты частично получены в рамках выполнения программы “Приоритет-2030” и федерального проекта Минобрнауки России “Передовые инженерные школы” (ПИШ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортков В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. Пылевая плазма: эксперимент и теория. – М.: Физматлит, 2009.
2. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – P. 3610.
3. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В. // Прикладная физика. – 2014. – Т. 3. – С. 22–25.
4. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Computational Thermal Sciences. – 2021. – Vol. 13. – P. 45–56.
5. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Applied Physics. – 2015. – Vol. 2. – P. 37–44.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Symmetry. – 2021. – Vol. 13. – Is. 6. – P. 927.
7. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. // ZAMP. – 2019. – Vol. 70. – Is. 46.
8. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – Vol. 830. – Is. 012049.
9. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. Alternative Fusion Fuels and Systems. – CRC Press; Taylor & Francis Group, 2018.
10. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol. 15. – P. 543.
11. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Vortex Flows with Particles and Droplets (A Review) // Symmetry – 2022. – Vol. 14. – Is. 10. – P. 2016.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Simulation of parameters of plasma dynamics of a magnetoplasma compressor // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Is. 9. – P. 5538.
13. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Turbulence in Two-Phase Flows with Macro-, Micro- and Nanoparticles (A Review) // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – Is. 11. – P. 2433.
14. Batrak N.V., Kopaleishvili N.G. // High Temperature Material Processes. – 2022. – Vol. 26.

HIGH-VOLTAGE NANOSECOND PULSED DISCHARGES IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

Aleksandrov N.L.¹, M.N.Shneider M.N.², Starikovskiy A.Yu.²

¹ *HSE University, Russia, Moscow 101000, Myasnitskaya st. 20*

² *Princeton University, USA, Princeton, 40 Olden St., NJ 08544-5263*

e-mail: aleksandrov.nl@mipt.ru

The effect of longitudinal magnetic field on the development of nanosecond streamer and dielectric barrier discharges was numerically studied in CO₂ and air. We demonstrated streamer self-focusing, which was caused by a sharp deceleration of the radial ionization wave due to a change in the electron energy distribution function in crossed electric and magnetic fields. The development of a pulsed dielectric barrier discharge in a strong magnetic field led to the formation of bulk ionization at the center of the magnetohydrodynamic generator channel without any ionization in near-wall regions of the gas, in qualitative agreement with observations in air.

The application of a longitudinal magnetic field to the discharge gap has been shown to be useful for nanosecond discharge plasma technologies, including surface modification, electrostatic precipitators, ozone production, and gaseous pollutant purification [1]. Nanosecond discharges in magnetic field also can be utilized in plasma aerodynamics for a direct magnetohydrodynamic (MGD) electric power generation from a high-speed flow of combustion products and for plasma steering, plasma-assisted drag reduction, combustion control, and suppression of shock induced separation [2]. Application of high-voltage nanosecond pulses to maintain uniform volumetric ionization in a supersonic flow is promising for MHD generators. Thus, the development of nanosecond pulsed discharges in a strong magnetic field is of interest for energy generation in the MHD cycle (for example, when burning natural coal in oxygen). For successful operation of the MHD generator, the homogeneous plasma production in the flow is required.

An example of a pulsed nanosecond discharge is a streamer characterized by fast-propagating ionization fronts with self-organized electric field enhancement at its tip. Streamer discharges have been much studied over the last decades. However, little is known about the effect of magnetic field on streamer properties. In the present work, a numerical characterization of nanosecond pulsed discharges has been conducted in a strong magnetic field environment. Streamer discharge development and plasma generation in pure CO₂ (50 Torr) were analyzed when magnetic field (up to 3 T) was directed along the axis of the discharge cell. Numerical simulations were based on a two-dimensional fluid model of the discharge plasma.

It was shown that a strong magnetic field affects dramatically the plasma formation. The streamer diameter decreased significantly (self-focusing effect), whereas the plasma density increased with increasing the magnetic field amplitude [3]. Based on the results of numerical simulation of the development of a streamer discharge in CO₂ in a gap with an external longitudinal magnetic field, the possibility of self-focusing of such discharges was demonstrated. The self-focusing was caused by a sharp

deceleration of the radial ionization wave due to a change in the electron energy distribution leading to a decrease in the average electron energy, electron mobility, and the rate of electron impact ionization in the crossed electric and magnetic fields as compared with the case of the discharge development without magnetic field. Simultaneously with the deceleration of the radial ionization wave, the ionization wave accelerated along the axis of the discharge gap due to a decrease in the radius of the streamer head and an increase in the electric field on it. The effect of magnetic field on the electron properties was determined by the Hall parameter and turned out to be different for electrons belonging to different parts of their energy distribution function. The self-focusing effect of a streamer discharge in an external longitudinal magnetic field was observed for both polarities of the discharge.

A numerical model of the development of a repetitively pulsed barrier nanosecond discharge in the MHD channel has been elaborated and tested for air and CO₂ at 10 Torr [4]. An external magnetic field (up to 5 T) directed along the discharge development significantly affected its dynamics and the shape and homogeneity of the produced plasma. As shown in [3], the main role in the interaction of the discharge with an external magnetic field is played by a decrease in the gas ionization rate when the ionization wave develops across the lines of the external magnetic field and the electric field is perpendicular to the magnetic field. As a result of this interaction, the rate of development of the ionization wave across the channel decreased. With an increase in the reduced magnetic field up to $B/N \sim 3 \cdot 10^{-24} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ in a molecular gas, the interaction of the ionization waves and the external magnetic field became significant and changed the spatial distributions of discharge parameters including the distribution of electric field at the front of the ionization wave and the electron density behind the front.

Due to the influence of magnetic field on the electron impact ionization rate and other electron properties, the propagation of the ionization wave across the magnetic field lines slowed down significantly, while along it, on the contrary, it increased. An increase in the discharge propagation velocity along the magnetic field lines occurred due to a change in the geometry of the ionization fronts and a local enhancement of the electric field. Thus, the development of a pulsed discharge in a strong external magnetic field led to the formation of bulk ionization at the center of the MHD channel without ionization in near-wall regions of the gas. This distribution of gas ionization made it possible to avoid short circuiting of MHD current in boundary layers and to significantly increase the overall efficiency of the MHD cycle.

REFERENCES

1. Nan Jiang, Xiaoling Lu, Bangfa Peng, Jie Li, Kefeng Shang, Na Lu, Yan Wu. *J. // Phys. D: Appl. Phys.* – 2021. – V. 54. – I. 245203.
2. R.C. Murray, S.H. Zaidi, M.R. Carraro, L.M. Vasilyak, S.O. Macheret, M.N. Shneider, R.B. Miles // *AIAA J.* – 2006. – V. 44. – I. 119.
3. A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov, M.N. Shneider // *Phys. Rev. E* – 2021. – V. 103. – I. 063201.
4. A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov, M.N. Shneider // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2023. – V. 32. – I. 035005.

МИКРОВОЛНОВЫЙ РАЗРЯД В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ С БАРБОТИРОВАНИЕМ АРГОНА И СО₂

Батукаев Т.С.¹, Билера И.В.¹, Крашевская Г.В.^{1,2}, Лебедев Ю.А.¹

¹ *Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия, 119991*

² *Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ), Москва, Россия, 115409*

E-mail: batukaev@ips.ac.ru

Задача разложения СО₂ является одной из составляющих проблем, связанных с глобальным потеплением. Одним из перспективных направлений ее решения является использование низкотемпературной плазмы. Для этих целей используются разные виды разрядов. СВЧ-разряд в жидких углеводородах в этих задачах не изучался. В данной работе представлены результаты исследования продуктов СВЧ-разряда в жидком Нефрасе С2 80/120 (смесь углеводородов с температурой кипения от 80 до 120 °С) при введении СО₂ в зону разряда, а также результаты исследования разряда методами оптической эмиссионной спектроскопии и теневой фотографии. Основными газообразными продуктами являются Н₂, С₂Н₂, С₂Н₄, СН₄, СО₂, СО. Кислород в продуктах не обнаружен. Рассмотрены механизмы разложения СО₂ в разряде. Образование Н₂ происходит одновременно с разложением СО₂ в разряде с объемной скоростью до 475 мл/мин и энергозатратами до 81,4 л/кВтч.

В последние годы большое внимание уделяется проблеме глобального потепления. Одна часть этой проблемы связана с выбросами СО₂ в атмосферу Земли. Выбросы СО₂ в результате сжигания ископаемого топлива (уголь, природный газ и нефть) в энергетике и на транспорте оказывают негативное влияние на жизнь человека. Актуальной проблемой, решаемой многими исследователями, является проблема снижения выбросов и утилизации СО₂. Одним из путей решения проблемы является использование СО₂ в качестве сырья для получения полезных продуктов, в частности, для промышленного производства синтетических топлив и химических продуктов [1].

Экспериментальная установка описана в [2-6]. Методами газовой хроматографии, оптической эмиссионной спектроскопии и теневой фотографии исследовано разложение СО₂ в СВЧ-разряде в жидком нефтяном растворителе с барботированием смеси аргона и СО₂ через канал в антенне. Давление в реакторе равнялось атмосферному, падающая мощность СВЧ варьировалась от 200 до 350 Вт. Расход газовой смеси поддерживался постоянным и равнялся 0,6 л/мин, расход СО₂ составлял 10 и 4,7. % от общей скорости потока (60 и 28,2 мл/мин).

Показано, что основными газообразными продуктами являются Н₂, С₂Н₂, С₂Н₄, СН₄, СО₂, СО. Кислород в продуктах не обнаружен, степень разложения СО₂ достигает 60%. Сделан вывод, что при содержании СО₂ 4,7 % на всех падающих мощностях и при содержании СО₂ 10 % на более низком уровне падающей мощности основным каналом разложения СО₂ является реакция $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ [6].

Одновременно с разложением CO_2 в разряде образуется водород. Результаты исследования показали, что содержание водорода в газовой смеси на выходе из реактора составляет 50-60 %, объемная скорость образования водорода находится в пределах 220-475 мл/мин, энергетическая эффективность образования водорода, рассчитанная от падающей мощности, находится в пределах 65-81 л/кВт*ч. Зависимости скоростей образования продуктов от падающей мощности представлены на рисунке 1 а,b,c,d,f. Степень разложения CO_2 представлена на рисунке 1 е.

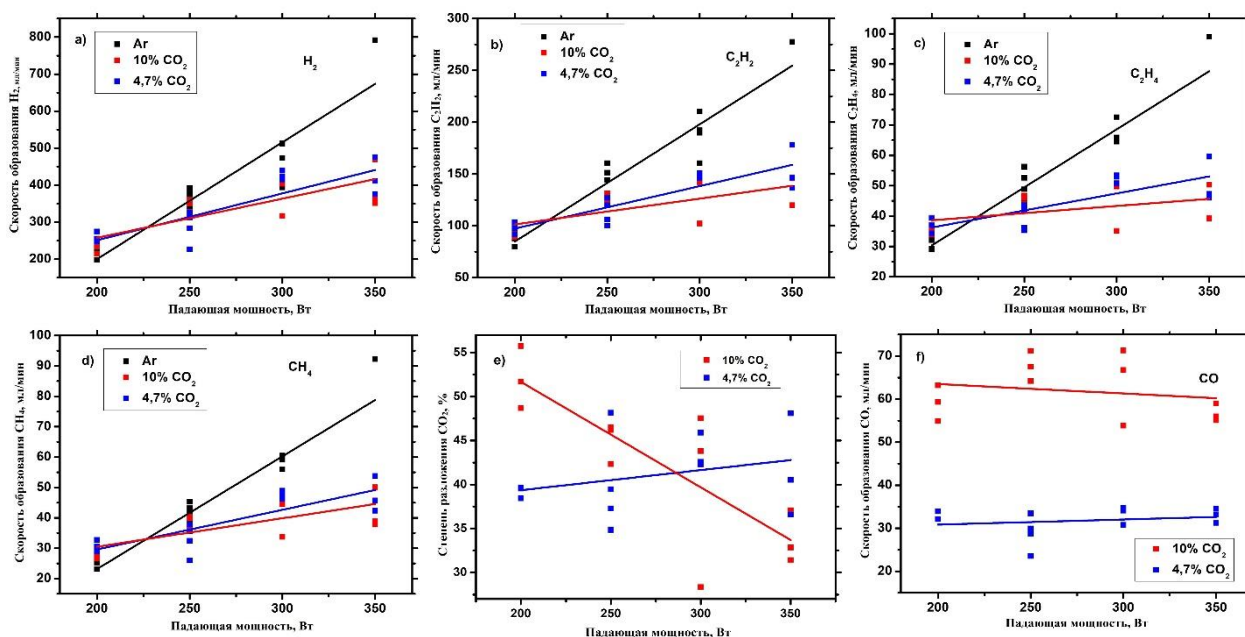


Рис. 1. Скорости образования газовых продуктов на выходе из реактора и степень разложения CO_2

Полученные результаты показывают эффективность использования плазмы в жидких углеводородах для разложения CO_2 с одновременным получением водорода.

Работа выполнена в рамках исследований по гранту РФФИ № 17-73-30046.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dimitriou I., García-Gutiérrez P., Elder R.H., Cuéllar-Franca R.M., Azapagic A., Allen R.W.K. // Energy & Environmental Science. – 2015. – Vol. 8.
2. Lebedev Yu.A., Krashevskaya G.V., Batukaev T.S., Epstein I.L. // Plasma Processes and Polymers. – 2021. – Vol. 18. – Is. 10.
3. Batukaev T.S., Krashevskaya G.V., Lebedev Yu.A., Mikhailyuk A.V. // Plasma Processes and Polymers. – 2022. – Vol. 19. – Is. 5.
4. Batukaev T.S., Krashevskaya G.V., Lebedev Yu.A., Mikhailyuk A.V. // Plasma Processes and Polymers. – 2022. – Vol. 48. – Is. 4.
5. Batukaev T.S., Bilera I.V., Krashevskaya G.V., Lebedev Yu.A., Epstein I.L. // Plasma Processes and Polymers. – 2023. – No. e2300015.
6. Batukaev T.S., Bilera I.V., Krashevskaya G.V., Lebedev Yu.A., Nazarov N.A. // Plasma. – 2023. – Vol. 6. – Is. 1.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННОГО ТОКА,
СОЗДАВАЕМОГО ИЗ ПЛАЗМЫ ВСТРЕЧНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ
КАНАЛОВ ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА**

**STUDY OF THE ION CURRENT DISTRIBUTION GENERATED FROM
THE COUNTER-DEVELOPING SURFACE DIELECTRIC BARRIER DIS-
CHARGE PLASMA CHANNELS**

Воеводин В.В.^{1,2}, Коржова О.И.², Хомич В.Ю.¹, Ямщиков В.А.¹
Voevodin V.V.^{1,2}, Korzhova O.I.², Khomich V.Yu.¹, Yamshchikov V.A.¹

¹ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186,*

г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, д. 18

² *ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Россия, 11250, г. Москва,*

ул. Красноказарменная, д.17

e-mail: voevodinvv@gmail.com

В работе проведено исследование пространственно-временного распределения ионного тока, создаваемого из плазмы импульсного поверхностного барьерного разряда при использовании двух параллельных электродов, создающих разряд. Показана возможность увеличения однородности распределения ионного тока, а также влияние расстояния между электродами на его характер.

The paper studies the spatial and temporal distribution of the ion current generated from the pulsed surface dielectric barrier discharge plasma using two parallel electrodes to create the discharge. The possibility of increasing the homogeneity of the ion current distribution is shown, as well as the influence of the distance between the electrodes on the character of the current distribution.

На сегодняшний день поверхностный барьерный разряд (ПБР) исследуется для применения в различных плазменных технологиях для генерации озона, плазменной модификации материалов, обработки биологических объектов и во многих других задачах. В случае, когда необходимо обеспечить воздействие на обрабатываемый объект продуктов разряда без прямого контакта объекта с плазмой и элементами электродной системы, используются электродные системы ПБР с дополнительным третьим электродом, который создает внешнее (вытягивающее) электрическое поле между объектом и плазмой ПБР, что приводит к возникновению дрейфа заряженных частиц из нее [1]. Важным фактором в этом случае является однородность распределения заряженных частиц по третьему электроду, степень которой до недавнего времени исследователями определялась лишь косвенно [2-3]. Проведенные прямые измерения тока с использованием разработанного наноамперного датчика и секционированного третьего электрода показали [4], что при расстоянии барьер-третий электрод 1 см ионный ток оказывается распределен по третьему электроду значительно неравномерно

и сделано предположение, что для повышения его однородности необходимо использовать несколько параллельных плазмогенерирующих электродов с различным расстоянием L между ними.

В данной работе были проведены измерения распределения ионного тока, создаваемого встречно развивающимися каналами ПБР при $L = 10$ и 5 мм и амплитуде импульсного и вытягивающего напряжений $U = \pm 6 \div 10$ кВ, которые показали, что при $L = 10$ мм форма пространственно-временного распределения тока от каждого электрода совпадает с картиной, полученной ранее для одиночного электрода [4] во всем диапазоне рассматриваемых напряжений (рис. 1). При этом совокупное распределение ионного тока по третьему электроду оказывается более равномерным. Сокращение межэлектродного расстояния L до 5 мм приводит к появлению эффекта самоограничения каналов импульсного ПБР, в результате чего картина распределения тока искажается. Полученные результаты демонстрируют возможность воздействия на степень однородности распределения потока заряженных частиц на третий электрод, что может быть важно в случае наличия на нем объектов обработки.

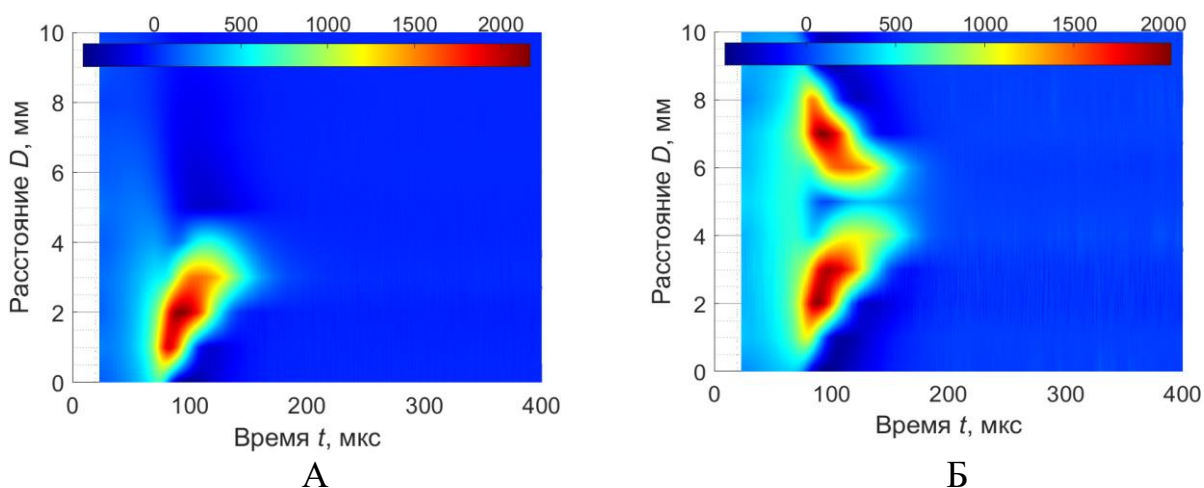


Рис. 1. Картины пространственно-временного распределения вытягиваемого ионного тока (приведен в нА) по секционированному третьему электроду для одиночного (А) и двух плазмогенерирующих электродов (Б). $U = +8$ кВ, D – расстояние по горизонтали от измерительных секций до края первого плазмогенерирующего электрода

ЛИТЕРАТУРА

1. *Brandenburg R.* // Plasma Sources Sci. Technol. – 2018. – Vol. 27. – Is. 079501.
2. *Krivov S.A., Moralev I.A., Lazukin A.V., Selivonin I.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2020. – Vol. 48. – Is. 2442.
3. *Ricchiuto A.C., Borghi C.A., Cristofolini A., Neretti G.* // J. Electrostat. – 2020. – Vol. 107. – Is. 103501.
4. *Khomich V.Y., Rebrov I.E., Voevodin V.V., Yamshchikov V.A., Zharkov Y.E.* // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2022. – Vol. 55. – Is. 275204.

**ИЗУЧЕНИЕ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ВЛИЯНИЯ
ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТРИМЕРОВ В ВОЗДУХЕ
НА НАКОПЛЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
В ПЛАЗМЕ ИХ КАНАЛОВ**

**STUDY IN COMPUTATIONAL EXPERIMENTS OF THE EFFECT
OF THE PARALLEL DEVELOPMENT OF STREAMERS IN AIR
ON THE ACCUMULATION OF FREE ELECTRONS
IN THE PLASMA OF THEIR CHANNELS**

Галимова А.В., Белогловский А.А.
Galimova A.V., Beloglovsky A.A.

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
11250, г. Москва, Красноказарменная улица, кафедра ТЭВН
e-mail: BeloglovskyAA@mpei.ru*

Представлены результаты вычислительных экспериментов, проведённых в рамках дрейфово-диффузионной математической модели стримерного разряда. В них изучено влияние расстояния между параллельно развивающимися стримерами на значения максимальной концентрации электронов и количество накопившихся электронов. Показано, что чем дальше стримеры друг от друга, тем больше эти значения. Для максимальной концентрации электронов эта зависимость выражена сильнее.

The results of computational experiments conducted in the framework of a drift-diffusion mathematical model of a streamer discharge are presented. They studied the effect of the distance between parallel streamers on the values of the maximum electron concentration and the number of accumulated electrons. It is shown that the farther the streamers are from each other, the greater these values are. For the maximum electron concentration, this dependence is more pronounced.

Стримерный разряд в воздухе применяется в природоохранных электротехнологиях, медицине, сельском хозяйстве [1]. Его использование основано на взаимодействии генерируемых в нём активных частиц (радикалов) с молекулами газа. Радикалы образуются в сильном электрическом поле (ЭП) стримерных головок в результате взаимодействия электронов с нейтральными молекулами. Радикалов тем больше, чем сильнее ЭП и выше концентрация N_e электронов в головках. Поэтому одна из задач математического моделирования стримеров – это определение значений и распределений N_e в них.

В литературе представлен богатый опыт исследования в вычислительных экспериментах одиночных [2] и параллельно развивающихся [3, 4] стримеров, их ветвления [5, 6]. Однако, чаще всего, в подобных работах внимание в первую очередь уделяется не анализу накопления электронов и ионов в плазме стримерных каналов, а формированию и перераспределению объёмного заряда в них и головках стримеров. Это обусловлено тем, что основная цель подобных работ состоит в изучении ветвления стримеров, распространения стримеров и ветвей в пространстве, взаимодействия и возможности слияния их головок.

В докладе показаны некоторые результаты расчётов изменения во времени t максимальной концентрации электронов $N_{e\max}$ (а) и их количества n_e (б) в паре стримеров, распространяющихся параллельно на расстоянии, близком к диаметру самих стримеров. Была применена дрейфово-диффузионная модель стримера [1] в реализации [6], предложенной на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ».

На рис. 1 приведены примеры зависимостей $N_{e\max}(t)$ (рис. 1.а) и $n_e(t)$ (рис. 1.б) для одиночного и двух параллельных стримеров, развивающихся в заполненном сухим воздухом разрядном промежутке длиной 0,25 см с однородным ЭП напряжённостью $7 \cdot 10^4$ В/см. Атмосферные условия нормальные. Развитие разряда начиналось с появления соответственно одной или двух начальных неоднородностей в распределении электронов на удалении 0,05 см от анода и 0,02...0,04 см друг от друга.

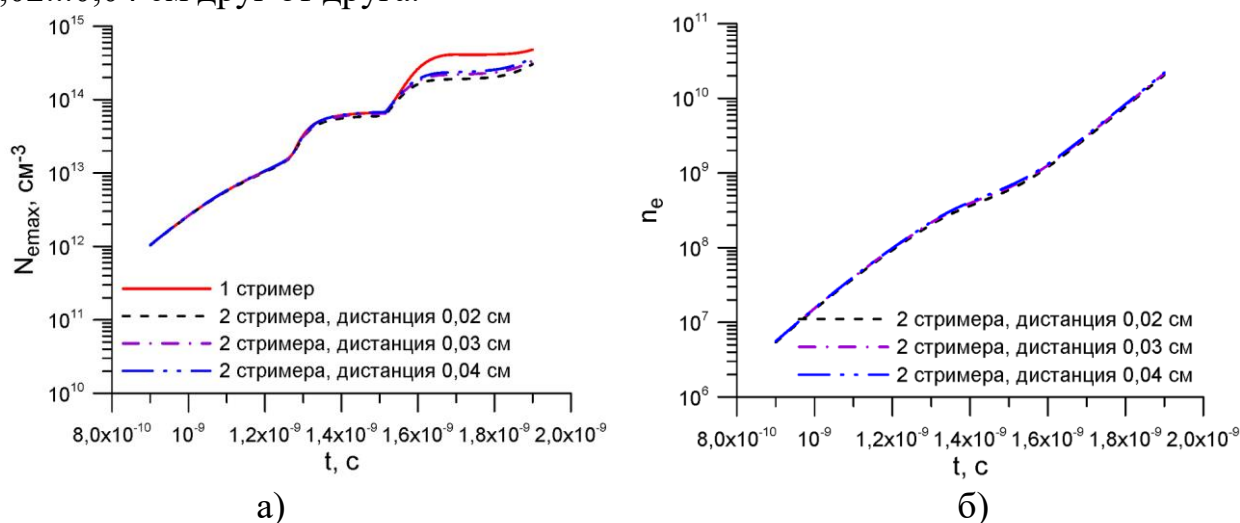


Рис. 1. Примеры расчётных зависимостей $N_{e\max}(t)$ (а) и $n_e(t)$ (б) в стримерах, развивающихся в воздухе в однородном ЭП с напряжённостью $7 \cdot 10^4$ В/см

Оказалось, что наибольшие значения $N_{e\max}$ (около $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, рис. 1.а) достигаются в одиночном стримере, а в параллельно распространяющихся стримерах они примерно вдвое ниже. Чем дальше они друг от друга, тем выше наибольшая концентрация электронов в них. Зависимость количества электронов в стримерах от дистанции между ними качественно имеет такой же характер (рис. 1.б), но она слабее: увеличение начального расстояния между стримерами в 2 раза ведёт к росту количества электронов на 10...15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бортник И.М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник / под ред. И.П. Верещагина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2018.
2. Белогловский А.А. // Вестник МЭИ. – 2016. – Т. 3. – № 29.
3. Верещагин И.П., Белогловский А.А., Колобайцев М.А., Мирзабекян Г.З. // Вестник МЭИ. – 2012. – Т. 2. – № 67.
4. Zhu Y., Zhang X., He J. // Physics of Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – Is. 023513.
5. Bagheri B., Teunissen J. // Plasma Sources Science and Technology. – 2019. – Vol. 28. – Is. 045013.
6. Белогловский А.А., Верещагин И.П. // Электричество. – 2011. – Т. 11. – № 17.

ИЗЛУЧАТЕЛИ НЕЙТРОНОВ С ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНЬЮ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

NEUTRON EMITTING SYSTEMS WITH GAS-PLASMA TARGET FOR SCIENTIFIC RESEARCH AND INDUSTRIAL PROCESSES

Дулатов А.К.¹, Андреев Д.А.¹, Голиков А.В.¹, Григорьев Т.А.¹,
Ильичев И.В.¹, Лемешко Б.Д.¹, Михайлов Ю.В.¹, Прокуратов И.А.¹
Dulatov A.K.¹, Andreev D.A.¹, Golikov A.V.¹, Grigorev T.A.¹,
Il'ichev I.V.¹, Lemeshko B.D.¹, Mikhailov Yu.V.¹, Prokuratov I.A.¹

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Россия, 127030, г. Москва, ул. Суцневская, д. 22
e-mail: akdulatov@vniia.ru

В настоящей работе приведено описание источников нейтронов с газоплазменной мишенью разработки ФГУП «ВНИИА». Преимуществом таких устройств является повышенный ресурс работы за счёт отсутствия твердотельной мишени, которая относительно быстро деградирует вследствие тепловых и механических нагрузок.

This work represents the description of neutron emitting systems with gas-plasma target developed by FSUE VNIIA. The main advantage of such devices is heightened lifetime because of absence of solid target that degrades relatively fast because of thermal and mechanic influences.

Камеры плазменного фокуса (ПФ) (рисунок 1а) являются электровакуумными приборами, в которых источником нейтронного излучения является нецилиндрический z-пинчевой разряд. Камеры ПФ в составе импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) разработки ФГУП «ВНИИА» позволяют генерировать мощные, короткие импульсы нейтронов длительностью от 15 до 60 нс и нейтронным выходом $10^5 \div 10^{12}$ нейтр./имп. [1]. За счёт газоплазменной мишени и использовании отпаянной, герметичной конструкции камер ПФ, ресурс работы таких камер в ИНГ составляет сотни последовательных срабатываний. ИНГ на камерах ПФ используются в широком спектре научных задач в области мощной импульсной электрофизики и электротехники, физики плазмы, вакуумной техники, регистрации быстропротекающих процессов, материаловедения, физики ионизирующих излучений, газодинамики и др., а также в практических задачах по нейтронографии, калибровки детекторов ядерных частиц, исследованиях по радиационной стойкости материалов и по электромагнитной совместимости.

Также в работе описаны источники нейтронного излучения на основе эффекта инерциального электростатического удержания плазмы (ИЭУП). В таких устройствах (рисунок 1б) реакции синтеза $D(d,n)^3He$ и $D(t,n)^4He$ протекают вследствие многократной осцилляции ионов через газоплазменную мишень в

СТРИМЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОГО ГАЗА

STREAMER MECHANISM OF PLASMA FILAMENT FORMATION DURING DISCHARGE IN ELECTRIC-NEGATIVE GAS MEDIUM

Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Коковин А.О., Семенюк Н.С.
Kozhevnikov V.Y., Kozyrev A.V., Kokovin A.O., Semeniuk N.S.

*Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3
e-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru*

В докладе исследуется механизм формирования тонких светящихся филаментов, вырастающих от изгиба плазменного канала импульсно-периодического сильноточного разряда (явление апокампического разряда). Методами теоретического моделирования показано, что рост светящегося филамента происходит за счет старта и последующего распространения стримера в сравнительно слабом внешнем электрическом поле. Получены пространственно-временные структуры филаментов при разряде в среде кислорода и хлора.

The report investigates the mechanism of thin luminous filaments growing from the bending of the plasma channel of a pulsed-repetitive high-current discharge (apokampic discharge phenomenon). Theoretical simulation has shown that the growth of the luminous filament occurs due to the start and subsequent propagation of the streamer in a relatively weak external electric field. Spatial-temporal structures of filaments are obtained for discharges in oxygen and chlorine environment.

Сравнительно недавно в лабораторных условиях была получена необычная форма разряда [1]. Она представляет собой светящуюся протяженную структуру, которая вырастает на изгибе канала импульсного разряда почти ортогонально к направлению канала. Этот тип разряда был назван апокампическим (от греческого $\alpha\lambda\acute{o}$ “от” и $\kappa\alpha\mu\pi\eta$ “изгиб”).

В последующие годы были проведены обширные экспериментальные и теоретические исследования этой формы разряда, которые выявили физическую природу роста подобного вида плазменных объектов [2–4]. Изгиб канала обеспечивает локальное усиление поля, задающее стартовую ориентацию прорастающего стримерного канала. Частотно-импульсный режим питания разряда воспроизводит стримерный канал в каждом импульсе, но предшествующий остов ион-ионной плазмы обеспечивают воспроизводство формы канала от импульса к импульсу.

В целом сложилось однозначное мнение о стримерной природе формирования светящегося филамента, но оставался открытым вопрос о влиянии электроотрицательности газа на структуру растущих филаментов. Для дальнейшего анализа были проведены сравнительные расчеты применительно к разряду в чистом кислороде и чистом хлоре. Оба газа имеют ярко выраженное свойство электроотрицательности, то есть их молекулы имеют высокое сродство к электрону и с

высокой скоростью образуют отрицательные ионы. Но хлор в этом отношении намного «отрицательней» кислорода, поэтому можно было ожидать сильно различающиеся структуры при разряде в таких газах. Теоретические расчеты полностью подтвердили эти предположения.

В теоретическую модель плазмохимических процессов были включены основные типы элементарных процессов: ударная ионизация молекул и отрицательных ионов, электрон-ионная и ион-ионная рекомбинации, диссоциация и электронное прилипание. Поскольку апокампиическая структура образуется только при положительной полярности импульса, то в теоретическую модель пришлось вводить описание процессов фотоионизации.

На Рис. 1 показан пример рассчитанной апокампиической структуры при разряде в хлоре атмосферного давления по истечении 700 нс после приложения высоковольтного импульса 50 кВ.

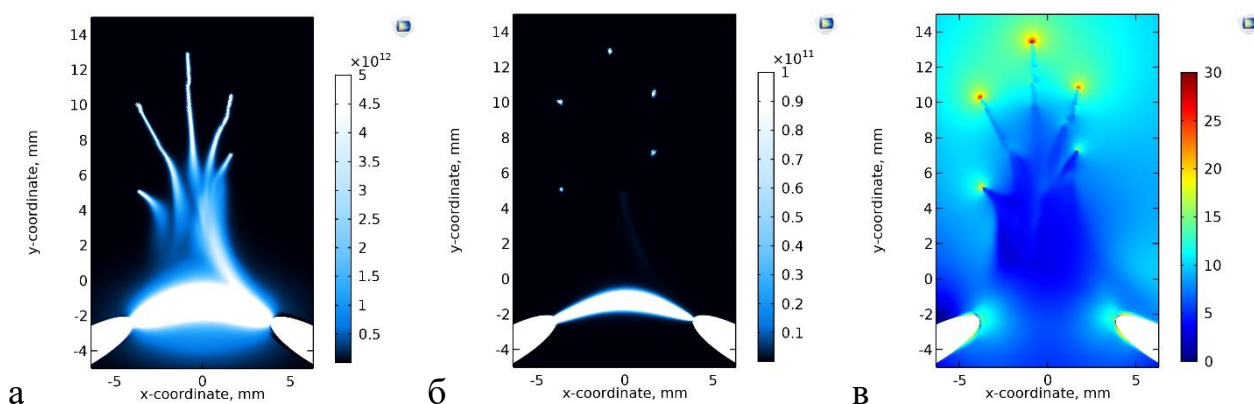


Рис. 1. Пространственные распределения к концу импульса напряжения 50 кВ: (а) концентрации положительных ионов хлора (Cl_2^+ , см^{-3}); (б) концентрации свободных электронов (см^{-3}); (в) напряженности электрического поля (кВ/см)

Вариации начальных параметров выявили сильную зависимость скорости роста ветвей структуры от амплитуды приложенного напряжения и давления газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соснин Э.А. // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 103. – № 857.
2. Соснин Э.А. // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 103. – № 85.
3. Соснин Э.А. // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 152. – № 1081.
4. Kozhevnikov V.Y. // EPL (Europhysics Letters). – 2020. – Vol. 129. – No. 15002.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ВОЗДУХЕ

SIMULATION OF RADIATION OF A NANOSECOND DISCHARGE INTERACTING WITH A SHOCK WAVE IN AIR

Кузнецов А.Ю.¹, Мурсенкова И.В.^{1,2}
Kuznetsov A.Yu.¹, Mursenkova I.V.^{1,2}

¹*МГУ им. Ломоносова; Россия, Москва, 119991 Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет*

²*НИУ МЭИ; Россия, Москва, 111250 Красноказарменная улица, дом 14
e-mail: alexanderkuznetsov15@gmail.com*

Экспериментально исследована динамика излучения наносекундного комбинированного объемного разряда в воздухе при взаимодействии с плоскими ударными волнами с числами Маха 1.9-5.5. Определен ступенчатый характер затухания излучения, зависящий от числа Маха ударной волны и ее положения в разрядном объеме. Моделирование послесвечения разряда в предположении ударного сжатия плазменного объема показало хорошее соответствие экспериментальным зависимостям.

The radiation dynamics of a nanosecond combined volume discharge in air upon interaction with a plane shock wave with Mach number of 1.9–5.5 is experimentally studied. A stepwise character of radiation damping is found, which depends on the Mach number of the shock wave and its position in the discharge volume. The simulation of the discharge afterglow showed good agreement with the experimental dependences under the assumption of shock compression of the plasma volume.

Изучение режимов развития разрядов в высокоскоростных потоках газа, определение механизма их взаимодействия с ударными волнами необходимо для разработки методов воздействия на течения с ударными волнами [1, 2]. В работе экспериментально исследовано пространственно-временное распределение излучения комбинированного объемного разряда в воздухе при взаимодействии с плоскими ударными волнами с числами Маха 1.9-5.5. Эксперименты проведены на ударной трубе с разрядной камерой [2, 3], где при импульсном напряжении 25 кВ формировался объемный разряд с поперечным сечением 30×24 мм², протяженностью 100 мм в направлении потока. Амплитуда тока составляла ~1 кА, длительность не превышала 500 нс. Через кварцевые стекла разрядной камеры регистрировались эмиссионные спектры и свечение с наносекундным разрешением (электронно-оптическими камерами БИФО К008, К011 в режимах развертки и 9-кадровой съемки).

В присутствии плоской ударной волны в разрядном объеме ток протекает перед фронтом, в области низкой плотности и высоких значений приведенного электрического поля (рис. 1, [3]). Это приводит к формированию сложной

ударно-волновой конфигурации, движущейся по плазменной области [3]. Электронно-оптическая регистрация показала ступенчатый характер затухания послесвечения разряда при взаимодействии с ударной волной. После прекращения тока разряда в течение 200-500 нс интенсивность свечения возрастала, и затем уменьшалась (рис. 1 б) с временем затухания $\sim 600-1200$ нс, зависящим от числа Маха ударной волны и ее положения в разрядном объеме. Спектры излучения разряда определялись преимущественно полосами второй положительной системы азота. Для модельного описания послесвечения разряда рассматривалось заселение излучающего уровня $N_2(C^3\Pi_u)$ в реакциях с участием молекул в метастабильных состояниях $A^3\Sigma_u^+$ и $B^3\Pi_g$. Уравнение, полученное с учетом ударного сжатия плазменной области движущейся ударной волной, решалось аналитически. В качестве начального условия задавалась временная зависимость заселенности состояния $A^3\Sigma_u^+$ и константы скоростей [4, 5]. Полученные при различных числах Маха исходных ударных волн модельные зависимости показали хорошее соответствие экспериментальным.

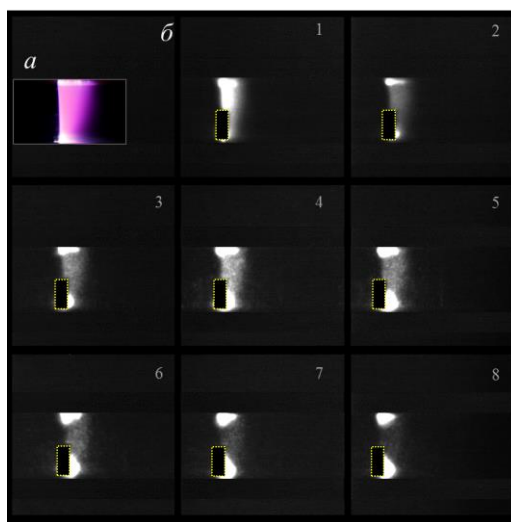


Рис. 1. (а) фотоизображение и (б) 9-кадровое изображение свечения разряда с ударной волной (экспозиция/пауза – 100/100 нс). Ударная волна с числом Маха 4.50 движется слева направо, давление воздуха перед фронтом 6 Торр

ЛИТЕРАТУРА

1. Стариковский А.Ю., Александров Н.Л. // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47. – № 126.
2. Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88. – Вып. 5. – № 684.
3. Znamenskaya I., Kuznetsov A., Mursenkova I., Doroschenko I. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1112. – No. 012006.
4. Mintousov E.I., Pendleton S.J., Gerbault F.G., Popov N.A., Starikovskaia S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44. – Is. 28. – No. 285202.
5. Nagaraja S., Yang V., Adamovich I. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46 – Is. 15. – No. 155205.

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ФРОНТА ИОНИЗАЦИИ И ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ПОДПОРОГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА

CHANGES IN THE IONIZATION FRONT VELOCITY AND IN THE PROPAGATION FORM OF A MICROWAVE SUBTHRESHOLD DISCHARGE WHEN APPROACH TO THE DIELECTRIC SURFACE

Артемяев К.В., Борзосеков В.Д., Заклецкий З.А., Малахов Д.В.
Artem'ev K.V., Borzosekov V.D., Zakletskii Z.A., Malakhov D.V.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Россия, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38
e-mail: malakhov@fpl.gpi.ru*

Экспериментально обнаружено уменьшение скорости распространения фронта ионизации микроволнового подпорогового разряда в атмосферном воздухе при приближении к поверхности порошка диэлектрика. Наблюдаемая на высокоскоростной видеосъемке структура разряда вблизи поверхности порошка характерна для теплопроводностного механизма распространения подпорогового разряда, а структура вдали от поверхности соответствует ожидаемой для фотоионизационного механизма. По мере приближения микроволнового подпорогового разряда к поверхности порошка диэлектрика (Al_2O_3) в эксперименте наблюдалось развитие разряда в верхнем слое порошка, который начинал поглощать энергию микроволнового пучка. Выдвинута гипотеза, что образование разряда в порошке диэлектрика связано с созданием наведенной проводимости под действием ультрафиолетового излучения микроволнового подпорогового разряда.

A decrease in the propagation velocity of the ionization front of a microwave subthreshold discharge in atmospheric air was experimentally found when approaching the surface of a dielectric powder. The structure of the discharge near the powder surface observed on high-speed video recording is characteristic of the thermal mechanism of subthreshold discharge propagation, while the structure far from the surface corresponds to that expected for the photoionization mechanism. As the microwave subthreshold discharge approached the surface of the dielectric powder (Al_2O_3), the experiment observed the development of a discharge in the upper layer of the powder, which began to absorb the energy of the microwave beam. It is hypothesized that the formation of a discharge in a dielectric powder is associated with the creation of induced conductivity under the action of ultraviolet radiation from a microwave subthreshold discharge.

Микроволновый подпороговый разряд (МПР) в пучках электромагнитных волн является интересным объектом для изучения, как для фундаментальной науки (распространение разряда представляет собой чередование стадий самостоятельного и несамостоятельного разрядов с развитием ионизационно-перегревной неустойчивости [1]), так и для прикладной (благодаря достижению температур газа 6000 К и плотностей плазмы до 10^{17} см⁻³ разряд интересен для разрушения экологически вредных примесей в воздухе [2]). Одно из новых направлений прикладного использования МПР — возбуждение разряда в смесях порошков различных веществ для целей модификации поверхности частиц и син-

теза новых частиц микро и нано размеров [3].

Фронт ионизации МПР в газах атмосферного давления движется вдоль микроволнового пучка в сторону источника излучения со скоростями пропорциональными квадрату интенсивности волны (фотоионизационный механизм распространения [4] при интенсивностях волны больше 3 кВт/см^2). В эксперименте при использовании гауссова пучка микроволнового излучения гиротрона с частотой 75 ГГц и интенсивностях волны больше 3 кВт/см^2 на всей его трассе, мы наблюдали парадоксальную картину: МПР двигаясь к перетяжке пучка (в сторону увеличивающейся интенсивности волны) не ускорялся, а замедлялся, причем до скоростей характерных для теплопроводностного механизма распространения (интенсивности волны меньше 3 кВт/см^2). Данный эффект происходил из-за установленного образца порошка диэлектрика (Al_2O_3) вблизи перетяжки пучка в перпендикулярной направлению волнового вектора плоскости. При приближении МПР к открытой поверхности порошка на расстояние порядка 5 см с помощью высокоскоростной видеосъемки и локационного метода измерения скорости фронта разряда [5] было зарегистрировано существенное снижение скорости фронта разряда (рис.1) и изменение его структуры с сильно контрагированной к мелкоячеистой. Дополнительные эксперименты позволили нам предположить, что наблюдаемое замедление разряда в первую очередь связано с возбуждением микроволнового разряда в самом порошке диэлектрика, происходящим под действием ультрафиолетового излучения МПР. По мере развития разряда в порошке диэлектрика он начинает поглощать все больше мощности микроволнового пучка, поэтому на фронт МПР попадает все меньшая интенсивность волны.

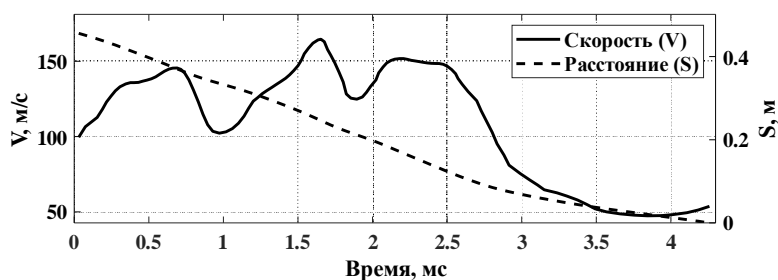


Рис. 1. Скорость фронта МПР в зависимости от расстояния до поверхности порошка диэлектрика

ЛИТЕРАТУРА

1. *Artem'ev K.V.* // Plasma Physics Reports. – 2018. – Vol. 44. – P. 1146.
2. *Батанов Г.М.* // Прикладная физика. – 2017. – Т. 5. – С. 10.
3. *Skvortsova N.N.* // Ceramics International. – 2020. – Vol. 47. – P. 3978.
4. *Бродский Ю.Я.* // ЖЭТФ. – 1983. – Т. 84. – С. 1695.
5. *Artem'ev K.V.* // Plasma Physics Reports. – 2019. – Vol. 45. – P. 965.

**РАЗЛОЖЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СВЧ РАЗРЯДЕ,
ПОДДЕРЖИВАЕМОМ В ВОЛНОВОДНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ
ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 24 ГГц**

**DECOMPOSITION OF CARBON DIOXIDE IN THE MICROWAVE
DISCHARGE SUPPORTED IN THE WAVEGUIDE PLASMATRON
BY GYROTRON RADIATION AT A FREQUENCY OF 24 GHz**

Мансфельд Д.А., Чекмарев Н.В., Синцов С.В., Преображенский Е.И.,
Ремез М.А., Водопьянов А.В.

Mansfeld D.A., Chekmarev N.V., Sintsov S.V., Preobrazhensky E.I.,
Remez M.A., Vodopyanov A.V.

*Институт прикладной физики Российской Академии наук, Россия, 603950
e-mail: mda1981@ipfran.ru*

В разработанном волноводном плазматроне впервые получен и исследован разряд, поддерживаемый в потоке углекислого газа при атмосферном давлении непрерывным СВЧ-излучением гиротрона с частотой 24 ГГц. Экспериментально продемонстрировано, что по сравнению с квазиоптическим вводом излучения, в волноводной реализации коэффициент поглощения СВЧ излучения в плазме увеличился как минимум в два раза, что позволило существенно увеличить степень конверсии и энергоэффективность процесса разложения углекислого газа.

In the developed waveguide plasmatron for the first time obtained and studied the discharge maintained in the flow of carbon dioxide at atmospheric pressure by continuous microwave radiation of gyrotron with a frequency of 24 GHz. It has been experimentally demonstrated that, compared with the quasi-optical radiation input, in the waveguide realization the absorption coefficient of microwave radiation in the plasma increased at least twofold, which allowed to significantly increase the degree of conversion and energy efficiency of the carbon dioxide decomposition process.

Увеличение частоты греющего СВЧ излучения является одним из наиболее перспективных способов создания неравновесной плазмы СВЧ разрядов, привлекаемых разложения и конверсии высокостабильных молекул. В работе описывается волноводный плазматрон, в котором СВЧ нагрев осуществлялся с помощью непрерывного электромагнитного излучения технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью в диапазоне 20–5000 Вт [1]. Плазматрон является продолжением сверхразмерного волноводного тракта гиротрона с внутренним диаметром 32.6 мм, к которому он присоединен через вакуумное окно из нитрида бора. С целью увеличения плотности мощности излучения волноводный тракт плавно сужался с помощью рупора, представляющего собой усеченный медный конус. Кроме того, сужающие стенки рупора способствуют торможению потока газа, и, как следствие, его более эффективному прогреву. Плазмообразующий газ (углекислый газ, аргон) поступает в плазматрон через три симметрично расположенные трубки, составляющие угол 30° с образующей цилиндра

плазмотрона. Тангенциальный ввод газа позволяет формировать закрученные газовые потоки, тем самым ограничивая область контакта горячей плазмы со стенами волновода.

В разработанном волноводном плазмотроне проведена серия экспериментов по измерению степени конверсии углекислого газа при разряде в чистом CO_2 и в смеси с аргоном. Измерения химического состава продуктов реакции проводились с помощью газоанализатора с оптическими ячейками CO_2 , CO , а также отбирался ряд проб для контроля методом хромато-масс-спектрометрии. Экспериментально показано, что при разряде в волноводном плазмотроне в чистом углекислом газе степень его конверсии и энергоэффективность растут с увеличением потока газа. При этом степень конверсии практически не растет с увеличением мощности, что обусловлено высокой скоростью обратных реакций при высокой температуре газа. Показано, что степень конверсии существенно увеличивается при добавлении аргона: с 10–11% в чистом CO_2 до 13–15% при потоке аргона 4.25 л/мин и до 18–20% при потоке аргона 8.5 л/мин. Характер зависимостей конверсии CO_2 от мощности и потоков в разработанном плазмотроне во многом схож с аналогичными зависимостями, полученными ранее в квазиоптической схеме организации разряда, однако, стоит отметить, что в последних экспериментах сравнимые значения конверсии получены при существенно меньших мощностях СВЧ нагрева (~300 Вт против 1.5–2.5 кВт), что даже с учетом меньших значений потоков газа, привело к существенно более высокой энергоэффективности процесса (30% и более).

Проведенные эксперименты позволяют говорить о перспективности применения СВЧ разряда в волноводном плазмотроне для решения современных плазмохимических задач, таких как разложение и конверсия высокостабильных молекул.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-12-00376)

ЛИТЕРАТУРА

1. Мансфельд Д.А., Водопьянов А.В., Синцов С.В., Чекмарев Н.В., Преображенский Е.И., Викторов М.Е. Разряд атмосферного давления, поддерживаемый миллиметровым излучением в волноводном плазмотроне // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т. 49. – Вып. 1.

ВАКУУМНАЯ ДУГА КАК ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ ДЛЯ МЕТОДА ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ВЕЩЕСТВ

PLASMA SOURCE BASED ON VACUUM ARC DISCHARGE FOR PLASMA SEPARATION METHOD

Мельников А.Д.^{1,2}, Усманов Р.А.¹, Полищук П.В.¹, Гавриков А.В.¹

Melnikov A.D.^{1,2}, Usmanov R.A.¹, Polistchok P.V.¹, Gavrikov A.V.¹

¹ *ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Россия*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия
e-mail: antonmelnikoff@yandex.ru*

Исследовались параметры плазмы, генерируемой вакуумным дуговым разрядом с горячим катодом, стабильность горения разряда и тип катодной привязки в зависимости от материала катода и величины внешнего магнитного поля. В ходе экспериментов измерялись средний заряд потока плазмы, ионный состав, колебания напряжения разряда, эмиссионные спектры плазмы. Измерения проводились для нескольких материалов катода (гадолиний, диоксид церия CeO₂, смесь диоксида церия и хрома), в условия присутствия или отсутствия внешнего магнитного поля величиной до 100 Гс. Ток дуги лежал в диапазоне 10-100 А, напряжение разряда 5-15 В без магнитного поля, температура катода 1900-2300 К.

The parameters of the plasma generated by a vacuum arc discharge with a hot cathode, the stability of the discharge and the type of cathode binding depending on the cathode material and the magnitude of the external magnetic field were investigated. During the experiments, the average charge of plasma flow, ionic composition, discharge voltage fluctuations and plasma emission spectra were measured for several cathode materials (gadolinium, cerium dioxide CeO₂, a mixture of cerium dioxide and chromium), in the presence or absence of an external magnetic field of up to 100 Gs. The arc current ranged from 10 to 100 A, the discharge voltage 5-15 V (in the absence of a magnetic field), the cathode temperature 1900-2300 K.

Разработка источников плазмы, генерирующих плазму как металлических, так и диэлектрических материалов актуальна для многих прикладных задач, например, задачи плазменной сепарации [1]. Источники плазмы на основе вакуумного дугового разряда с горячим катодом позволяют переводить в плазменное состояние широкий класс веществ [2]. Свойства генерируемой плазмы в таких источниках зависят от типа катодной привязки, реализующейся в конкретных экспериментальных условиях. Реализация диффузного типа дуги зависит в первую очередь от температуры катода и атом-электронного соотношения материала катода. Данная работа посвящена исследованию параметров плазмы, стабильности горения разряда и типа катодной привязки в зависимости от матери-

ала катода и величины внешнего магнитного поля. В ходе экспериментов измерялись средний заряд потока плазмы, концентрации отдельных компонент плазмы (ионный состав), колебания напряжения разряда, эмиссионные спектры плазмы. Измерения проводились для нескольких материалов катода (гадолиний, диоксид церия CeO_2 , смесь диоксида церия и хрома), в условия присутствия или отсутствия внешнего магнитного поля величиной до 100 Гс. Экспериментальная установка подробно описана в работе [2]. В данной работе для изучения ионного состава использовался масс-спектрометр. Средний заряд измерялся методом конденсационного зонда. В течении эксперимента велась регистрация напряжения, масс-спектра ионов плазмы, температуры катода и интенсивности излучения. Режим работы источника задавался тремя параметрами: ток (в диапазоне 10-100 А) и напряжение разряда (5-15 В без магнитного поля), температура катода (1900-2300 К).

При исследовании различных материалов характер горения дуги качественно отличался для металлического и диэлектрического. В результате экспериментов с диоксидом церия были обнаружены флуктуации напряжения (относительная амплитуда от 2 % до 10 % в различных режимах дуги. Наблюдались нестабильные режимы горения, длившиеся от нескольких секунд, до нескольких минут, в которых вырастала амплитуда флуктуаций, регистрировались ионы 2 и 3 кратности и колебания плазменного столба. При проведении видеозаписи поверхности катода было обнаружено, что имеют место как режимы без катодных пятен, так и с пятнами 2-го типа. Эксперименты с металлическим катодом из гадолиния продемонстрировали возможность контролировать напряжение разряда, варьируя мощность ЭЛП. Было изучено, как зависит ионный состав плазмы от напряжения дуги. Обнаружены режимы с высокой степенью ионизации потока плазмы выходящего в заанодное пространство. В экспериментах со смешанным катодом из хрома и диоксида церия были измерены средний заряд, скорость эрозии катода, зависимости напряжения разряда от мощности ЭЛП для смешанных соотношений. Обнаружено, что в составе плазменного потока преобладал хром.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00716, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00716/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Liziakin G.* // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – Vol. 54. – No. 414005.
2. *Полищук В.П.* // ТВТ. – 2020. – Т. 58. – № 4. – С. 515–535.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА В ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

SPECIFIC FEATURES OF GAS DISCHARGE IN PULSED INERTIAL ELECTROSTATIC CONFINEMENT PLASMA SYSTEM

Андреев Д.А., Голиков А.В., Григорьев Т.А., Дулатов А.К., Ильичев И.В.,
Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А.
Andreev D.A., Golikov A.V., Grigorev T.A., Dulatov A.K., Il'ichev I.V.,
Lemeshko B.D., Mikhailov Yu.V., Prokuratov I.A.

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им.
Н.Л. Духова», Россия, 127030, г. Москва, ул. Суцневская, д. 22
e-mail: akdulatov@vniia.ru*

В работе рассмотрены особенности зажигания и горения разряда в системах инерциального электростатического удержания плазмы (ИЭУП) при подаче импульсов высокого напряжения амплитудой до 100 кВ и длительностью 0,5–1,0 мкс. Импульсный режим работы в системах ИЭУП имеет ряд преимуществ, которые связаны с большими токами разряда, недоступными для непрерывных режимов работы.

This work represents specific features of ignition and burning gas discharge in inertial electrostatic confinement (IEC) plasma systems when the high voltage pulses with amplitude up to 100 kV and 0,5 – 1,0 μ s width are supplied. The pulsed regime has some advantages in IEC systems that are associated with high discharge current values, which are unavailable in direct current modes.

Системы инерциального электростатического удержания плазмы (ИЭУП) являются газоразрядными электровакуумными приборами, работа которых основана на многократных осцилляциях ионов в газоразрядном промежутке [1]. За годы исследований в данном направлении было получено большое количество теоретических и экспериментальных результатов, позволяющих найти применение данным системам в различных областях науки и техники – элементный анализ, досмотровое и поисковое оборудование, отработка детекторов слабодействующих частиц, ионная имплантация, наработка медицинских изотопов и другие. Наибольшее распространение системы ИЭУП получили в качестве источников нейтронного излучения за счет реализации в них реакций синтеза изотопов водорода (реакций $D(d,n)^3He$ и $D(t,n)^4He$).

Настоящая работа посвящена изучению импульсного режима работы систем ИЭУП, особенностям процессов зажигания и поддержания в них высоковольтного газового разряда в дейтерии низкого давления.

В работе описан разработанный лабораторный стенд импульсного ИЭУП с газоразрядной камерой со сферической двухэлектродной системой (сплошной

анод, внутри которого concentрично расположен сферический сетчатый катод). Показаны особенности развития газового разряда при подаче на сетчатый катод постоянного напряжения и импульсов напряжения отрицательной полярности длительностью 0,5 – 1,0 мкс и амплитудой до 100 кВ в диапазоне давлений $10^{-3} \div 10^{-1}$ торр. В продолжение ранее проводимых исследований в данном направлении [2] получен ряд экспериментальных зависимостей, позволивших подобрать рабочие режимы стенда, а также реализованы режимы с разной частотой следования высоковольтных импульсов в диапазоне от 10 до 640 Гц с потребляемыми электрическими мощностями до 1 кВт. Полученные результаты показали существенную зависимость амплитудных и временных параметров импульсов напряжения, тока и внешнего вида разряда (рисунок 1), от давления рабочего газа. В результате реализации выбранных режимов работы лабораторного стенда проведены измерения, экспериментально подтвердившие возможность получения нейтронного выхода на уровне существующих промышленных нейтронных генераторов – 10^6 нейтр./с (2,5 МэВ) в системах ИЭУП при работе в импульсных режимах с субмикросекундными импульсами напряжения.

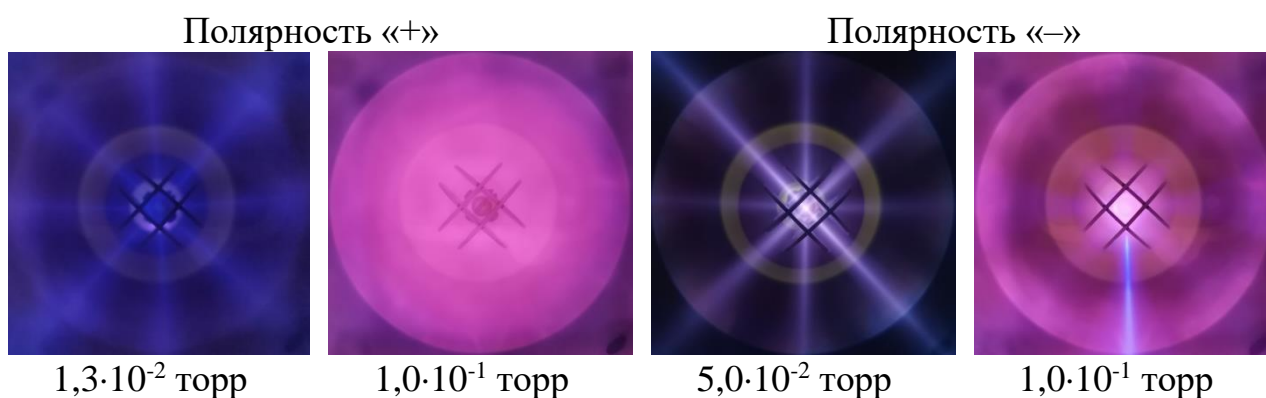


Рис. 1. Внешний вид разряда при разном давлении и полярности напряжения, прикладываемого к центральному сетчатому электроду

ЛИТЕРАТУРА

1. *Miley G.H., Murali S.K. Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion: Fundamentals and Applications.* – N.Y.: Springer, 2014.
2. *Лемешко Б.Д., Прокуратов И.А., Дулатов А.К., Михайлов Ю.В. Система на встречных ионных пучках на основе инерциального электростатического удержания плазмы для генерации нейтронного излучения // Лазерные, плазменные исследования и технологии (ЛаПлаз-2022): сборник тезисов VIII Международной конференции.* – М., 2022.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ТУГОПЛАВКИМИ И НЕТУГОПЛАВКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

SIMULATION OF ATMOSPHERIC PRESSURE ARC DISCHARGES IN INERT GASES WITH REFRACTORY AND NON-REFRACTORY ELECTRODES

Сайфутдинов А.И., Германов Н.П., Сорокина А.Р., Сайфутдинова А.А.
Saifutdinov A.I., Germanov N.P., Sorokina A.R., Saifutdinova A.A.

*Казанский национальный исследовательский технический университет,
Россия, г.Казань, ул. К.Маркса, 10
e-mail: as.uav@bk.ru*

В работе в рамках численных расчетов проведено исследование влияния испарения материала электродов на характеристики дугового разряда в аргоне и гелии. Представлены результаты численных исследований для дуг с тугоплавкими (графитовыми) и нетугоплавкими (медными) электродами. Впервые продемонстрирована смена плазмообразующего газа в разрядном промежутке и переход от дугового режима разряда, инициированного в буферном инертном газе к дуге в парах испаренного материала электродов. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, а также правительства РТ в рамках проекта № 22-22-2009.

In this work, within the framework of numerical calculations, a study was made of the effect of evaporation of the electrode material on the characteristics of an arc discharge in argon and helium. The results of numerical studies for arcs with refractory (graphite) and non-refractory (copper) electrodes are presented. For the first time, a change in the plasma-forming gas in the discharge gap and a transition from the arc mode of the discharge initiated in a buffer inert gas to an arc in vapors of the evaporated electrode material has been demonstrated for the first time. The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Government of the Republic of Tatarstan under project No. 22-22-2009.

В работе получили развитие самосогласованные модели газовых разрядов постоянного тока, описывающие процессы, протекающие в газоразрядном промежутке и в электродах [1-4]. В представленной работе произведен учет влияния испарения материала электродов на распределения основных параметров плазмы в дуговых разрядах атмосферного давления в аргоне с графитовыми (тугоплавкими) электродами и медными (нетугоплавкими) электродами, поддержание тока в которых обеспечивается термоэлектронной эмиссией и термоавтоэлектронной эмиссией, соответственно.

Помимо плазмохимических процессов в аргоне [1] для разряда с графитовыми электродами был составлен достаточно подробный набор плазмохимических реакций, учитывающий формирование нейтральных частиц углерода C, C₂, C₃, их ионов C⁺, C₂⁺, C₃⁺ и возбужденных состояний C*, C₂*, C₃*. Для разряда с медными электродами учитывался набор элементарных процессов с участием

атомов меди, взятый из работ [3], в которых учитывались процессы с образование атомарных ионов меди.

В результате численных экспериментов в широком диапазоне вкладываемой мощности в рамках одномерной геометрии было исследовано влияние испарения материала электродов на характеристики дугового разряда. Показано, что при достижении критического значения плотности тока наблюдается скачкообразное изменение параметров плазмы: на вольт-амперной характеристике разряда и на усредненных по газоразрядному промежутку значениях концентраций заряженных частиц. Наблюдается переход от дугового разряда в атмосфере аргона к дуге в парах углерода или в парах меди.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, а также правительства РТ в рамках проекта № 22-22-2009.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Saifutdinov I.* // JETP Lett. – 2016. – Vol. 104. – No. 180.
2. *Saifutdinov I.* // J. Appl. Phys. – 2021. – Vol. 129. – No. 093302.
3. *Baeva M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2021. – Vol. 54. – No. 025203.
4. *Saifutdinov I.* // Plasma Sources Sci. Technol. – 2022. – Vol. 31. – No. 094008.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-РАЗРЯДА В АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ

SIMULATION OF A MICROWAVE DISCHARGE IN ATOMIC AND MOLECULAR GASES

Сайфутдинов А.И.¹, Сайфутдинова А.А.¹, Кустова Е.В.²
Saifutdinov A.I.¹, Saifutdinova A.A.¹, Kustova E.V.²

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет,
Россия, г.Казань, ул. К.Маркса, 10*

²*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург
e-mail: aliya_2007@list.ru*

В работе в рамках численных расчетов проведены исследования динамики формирования плазмы СВЧ-разряда в фокусирующей системе, представляющей собой цилиндрический параболоид, а также в пучности стоячей электромагнитной волны в гелии, азоте и воздухе при давлениях от 20 до 500 Торр. Представлены распределения всех основных параметров плазмы. Работа поддержана РФФ, проект № 23-19-00241.

In the work, within the framework of numerical calculations, the dynamics of the formation of a microwave discharge plasma in a focusing system, which is a cylindrical paraboloid, as well as in the antinode of a standing electromagnetic wave in helium, nitrogen, and air at pressures from 20 to 500 Torr, was studied. The distributions of all the main plasma parameters are presented. The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-19-00241.

В работе сформулирована физико-математическая модель [1], позволяющая описать формирование микроволновых разрядов в фокусирующей установке, разработанной в газодинамической лаборатории СПбГУ и продемонстрировавшей эффективный способ подвода энергии в сверхзвуковые потоки газа [2]. На основе сформулированной модели проведены численные эксперименты в двумерном приближении по формированию активной фазы и фазы послесвечения микроволновых разрядов в азоте в фокусирующей системе. Расчеты были проведены для двух наборов основных каналов быстрого нагрева газа.

В результате численных экспериментов было продемонстрировано, что в предложенной фокусирующей системе в зависимости от давления газа и мощности СВЧ-излучения может формироваться от 1 до 4 плазмоидов, два из которых формируются вдоль оси рупора, а два, симметрично расположенных относительно оси рупора – вблизи отражающей поверхности параболического зеркала. Получена динамика основных параметров плазмы этих разрядов. В частности, представлены распределения концентраций электронов, напряженности электрического поля. Получена динамика нагрева нейтрального газа, колебательной

температуры азота, представлены распределения плотности газа в области формирования плазмоидов. Показано, что максимальный нагрев газа наблюдается в плазмоиде, сформированном в главном фокусе системы, и достигает значения 420 К и 505 К, соответственно, для первого и второго наборов механизмов нагрева газа при давлении 40 Торр и значении падающей СВЧ электромагнитной волны с амплитудой $E_0 = 3$ кВ/см. Причем максимальные значения температуры газа достигаются в фазе послесвечения импульсного микроволнового разряда, соответственно, на временах 70 мкс и 100 мкс в зависимости от выбора основных каналов нагрева газа.

Проведен сравнительный анализ механизмов нагрева газа. Показана важность учета нагрева газа в реакциях самотушения возбужденных молекул азота, как в активной фазе, так и в первые микросекунды фазы послесвечения (до 6 мкс). На длительных временах фазы послесвечения (после 10 мкс) основным механизмом является выделение энергии в реакциях колебательно-поступательной релаксации. Аналогичные исследования были проведены для разряда в воздухе, а также в атомарных газах, а на примере гелия.

Дополнительные численные расчеты были проведены для СВЧ-разряда в пучности стоячей электромагнитной волны для двумерной плоской геометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Saifutdinov A.I., Kustova E.V.* // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129. – No. 023301.
2. *Lashkov V.A.* // Physics of Plasmas. – 2016. – Vol. 23 – No. 052305. – P. 1–6.

ДИНАМИКА ФИЛАМЕНТАЦИИ СВЧ-РАЗРЯДА В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ

DYNAMICS OF FILAMENTATION OF A MW DISCHARGE IN MOLECULAR GASES

Сайфутдинова А.А.¹, Германов Н.П.¹, Сайфутдинов А.И.¹, Кустова Е.В.²
Saifutdinova A.A.¹, Germanov N.P.¹, Saifutdinov A.I.¹, Kustova E.V.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет,
Россия, г.Казань, ул. К.Маркса, 10

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург
e-mail: aliya_2007@list.ru

Представленные в работе исследования были преимущественно стимулированы серией экспериментальных работ, проведенных в газодинамической лаборатории СПбГУ [1] и в институте прикладной физики РАН [2] и направлены на достаточно полное описание СВЧ-разряда в молекулярных газах азоте и воздухе на основе расширенной гидродинамической модели СВЧ-разряда. Работа поддержана РФФ, проект № 23-21-00276.

The studies presented in this paper were mainly stimulated by a series of experimental studies carried out at the Gas Dynamics Laboratory of St. Petersburg State University [1] and at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences [2] and aimed at a fairly complete description of the microwave discharge in molecular gases nitrogen and air based on an extended fluid-dynamic model of the microwave discharge. The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-21-00276.

В работе получила развитие сформулированная нами ранее [3] расширенная гидродинамическая модель СВЧ-разряда, применительно к исследованию динамики одиночного плазмоида в пучности стоячей электромагнитной волны. Чтобы в двумерной (плоской) расчетной области сформировался один плазмоид, мы рассмотрели две падающие идентичные линейно поляризованные волны с обеих сторон двумерной прямоугольной области моделирования в противоположных направлениях для формирования стоячей волны. В этой конфигурации расчетной области и падающих волн в стоячей волне есть только одна пучность. Предполагалось, что с обеих длинных сторон расчетной области падают электромагнитные волны с амплитудой 1.3 кВ/см и частотой 7.5 ГГц и длительностью импульса 15 мкс по условия экспериментов, проведенных в работе [2], то есть максимальное среднеквадратичное значение поля стоячей волны составляет 3.4 кВ/см, что превышает значение критического поля при данных условиях в азоте при давлении 50 Торр. Рассмотрим некоторые результаты расчетов. Так, на

рис. 1 представлены распределения концентраций электронов (слева) газовой температуры (справа) в различные моменты времени.

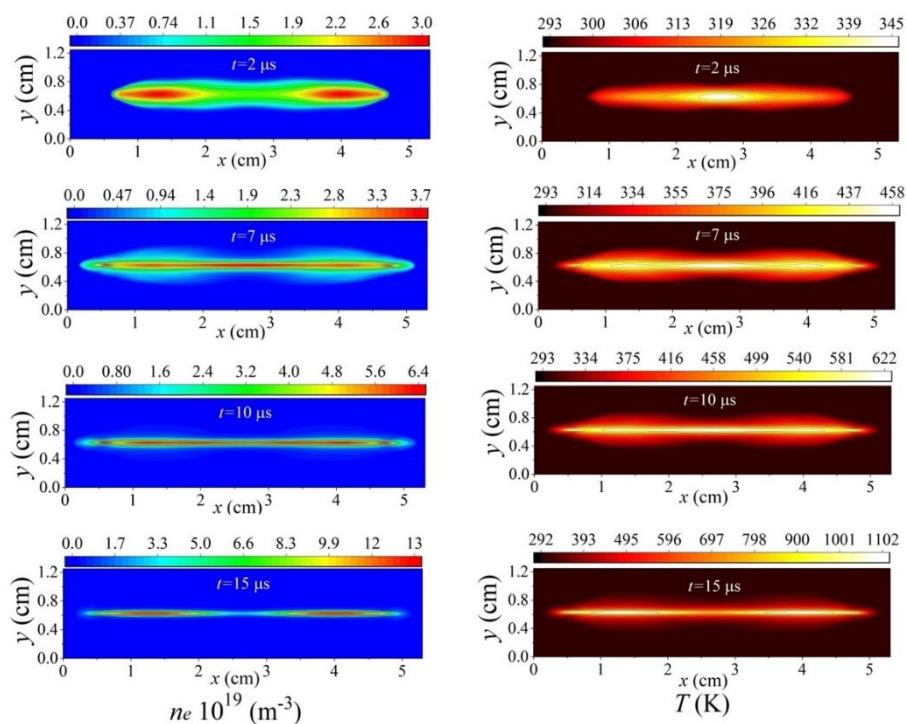


Рис.1. Распределения концентраций электронов (слева) газовой температуры (справа) в различные моменты времени

К моменту времени 2-3 мкс формируется диффузный СВЧ-разряд с двумя максимумами на концах плазмоида. К моменту времени 4 мкс наблюдается стягивание концентрации электронов к оси разряда и к моменту времени 7 мкс наблюдается достаточно тонкий шнур вдоль оси плазмоида с максимумом концентрации электронов $3.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. К этому моменту температура газа в плазмоиде достигает значения 458 К. Далее наблюдается интенсивное поглощение электромагнитной энергии СВЧ-разрядом. Увеличивается концентрация электронов до $6.4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ к моменту времени 10 мкс, а температура газа достигает значения 622 К. Далее вновь наблюдается изменение формы филаментированного плазмоида: формируются два максимума на концах плазмоида, концентрация электронов в которых к моменту времени 15 мкс достигает значения $1.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а температура газа 1102К. Колебательная температура азота достигает $\sim 2000\text{К}$. Результаты численных расчетов сопоставлены с результатами работы [2]. Дополнительные расчеты были проведены для СВЧ-разряда в азоте с малыми примесями кислорода, а также для СВЧ-разряда в воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lashkov V.A. // Physics of Plasmas. – 2016. – Vol. 23. – No. 052305. – P. 1–6.
2. Вухарев А.Л., Горбачев А.М., Ким А.В. // Физика плазмы. – 1992. – Vol. 18. – No. 1064.
3. Saifutdinov A.I., Kustova E.V. // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129. – No. 023301.

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ФИЛАМЕНТАЦИИ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В АЗОТЕ И ВОЗДУХЕ

Соловьев В.Р., Караваяева Н.И., Лисицын Д.А.

Московский физико-технический институт, Долгопрудный 141700, РФ

e-mail: vic_sol@mail.ru

Выполнено численное моделирование развития поверхностного барьерного разряда в азоте и воздухе при его возбуждении ступенчатым импульсом напряжения 40кВ обеих полярностей. Расчеты выполнены для давлений 6 и 8 атм при температуре 300К, когда в экспериментах с наносекундными импульсами напряжения наблюдался эффект филаментации разряда. В разработанной 2D дрейфово-диффузионной модели развития разряда учитывалась кинетика возбужденных состояний N_2 с разделением каналов ступенчатой ионизации по триплетным и синглетным термам. Константы скоростей возбуждения электронных состояний в области резких градиентов плотности электронов скорректированы с использованием баланса энергии электронов. Показано, что и при положительной, и при отрицательной полярности импульса напряжения на временах порядка 0.1нс возможно формирование образования, подобного наблюдаемому в экспериментах филаменту с концентрацией плазмы порядка 10^{18}см^{-3} . Этот процесс происходит в приповерхностной области разряда благодаря дополнительной ступенчатой ионизации высоковозбужденных состояний молекулы N_2 .

В случае возбуждения поверхностного барьерного разряда (ПБР) импульсами высокого напряжения длительностью 20-50 нс в работе [1] было экспериментально обнаружено, что при напряжениях в десятки киловольт и повышенных, более нескольких атмосфер, давлениях азота и воздуха в разряде на временах наносекундного диапазона на фоне квази-однородного горения образуются тонкие ярко светящиеся каналы, названные филаментами. Последовавшее в работах [2-5] экспериментальное исследование свойств плазмы в этих филаментах показало, что плотность электронов в них на 2-3 порядка выше, чем в каналах стримеров, формирующих квази-однородную моду развития разряда, и близка к значению локального термодинамического равновесия.

Попытка объяснить наблюдаемое явление в случае разряда в азоте при положительной полярности импульса приложенного напряжения была предпринята в работе [6], где численным моделированием развития ПБР в 2D приближении было показано, что формирование подобной структуры за времена наносекундного диапазона возможно в зазоре между каналом стримера и поверхностью диэлектрика. Причиной развития приповерхностного слоя плазмы с нарастающей плотностью электронов и ионов является дополнительная ступенчатая ионизация высоковозбужденных термов молекулы азота, происходящая на границе стримера, обращенной к поверхности диэлектрика.

В данной работе предложенный в [6] подход распространяется на случаи развития ПБР в воздухе и азоте как при положительной, так и при отрицательной полярности импульса приложенного напряжения. В модель развития ПБР был внесен ряд изменений, наиболее существенные из которых коррекция констант скорости возбуждения термов молекулы азота электронным ударом в области

резкого градиента плотности электронов, характерного для приповерхностной области разряда, и отдельный учет кинетики синглетных и триплетных термов молекулы азота для более точного описания процесса ступенчатой ионизации.

В ходе численного моделирования и в азоте, и в воздухе была получена начальная фаза формирования филамента в приповерхностной области разряда как для положительной, так и для отрицательной полярности разряда при амплитуде напряжения 40кВ и давлении выше 6 атм (рис.1).

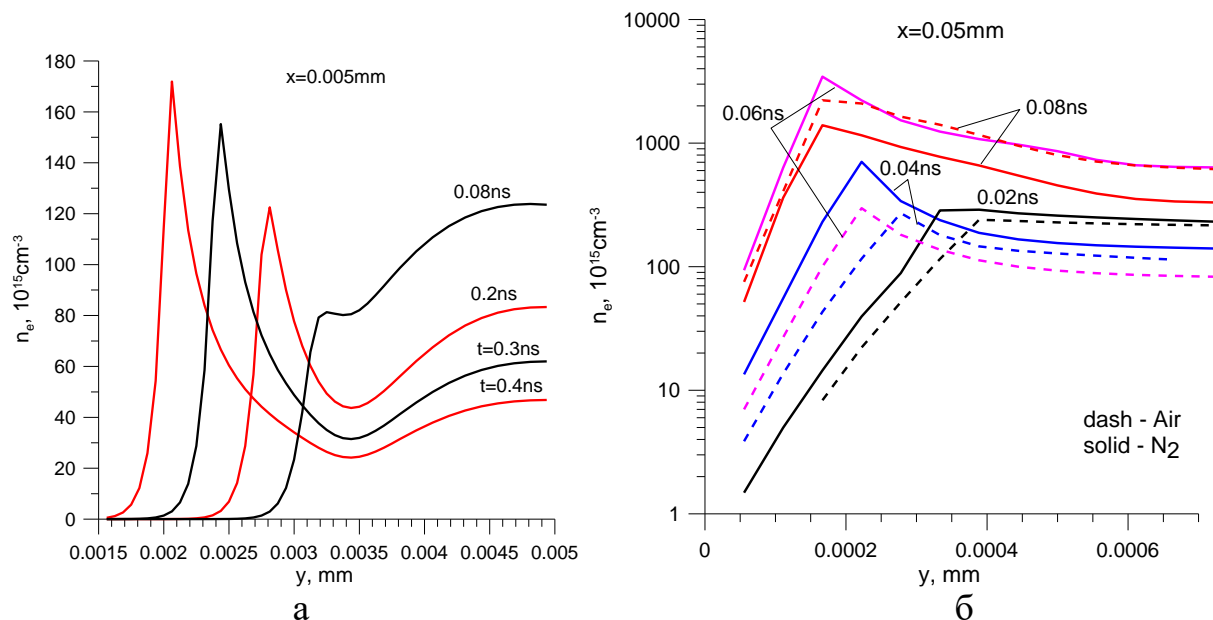


Рис. 1. Профили плотности электронов в случаях (а) - азота при $V=+40\text{kV}$, $p=8\text{ атм}$; и (б) - азота и воздуха при $V=-40\text{kV}$, $p=6\text{ атм}$.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-29-00084.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stepanyan S.A., Starikovskiy A.Yu., Popov N.A., Starikovskaia S.M.* // PSST. – 2014. – Vol. 23. – No. 045003.
2. *Shcherbanev S.A., Khomenko A.Yu., Stepanyan S.A., Popov N.A., Starikovskaia S.M.* // PSST. – 2017. – Vol. 26. – No. 02LT01.
3. *Ding Ch., Khomenko A.Yu., Shcherbanev S.A., Starikovskaia S.M.* // PSST. – 2019. – Vol. 28. – No. 085005.
4. *Shcherbanev S.A., Ding Ch., Starikovskaia S.M., Popov N.A.* // PSST. – 2019. – Vol. 28. – No. 065013.
5. *Ding Ch., Jean A., Popov N.A., Starikovskaia S.M.* // PSST. – 2022. – Vol. 31. – No. 045013.
6. *Соловьев В.Р.* // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – № 552.

РАЗРЯД ПОСТОЯННОГО ТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ, И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ПЛАЗМЕННОЙ АЭРОДИНАМИКИ

DC DISCHARGE IN A SUPERSONIC FLOW AND ITS APPLICATION IN THE PROBLEMS OF PLASMA AERODYNAMICS

Фирсов А.А.*

Firsov A.A.*

*ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13. *
e-mail: af@jiht.org*

В докладе представлен обзор подходов по управлению сверхзвуковым течением в каналах и на поверхностях с механическими элементами с помощью разряда постоянного тока, а также примеры применения такого разряда для организации воспламенения и стабилизации пламени в сверхзвуковом потоке. На основании обзора сделаны выводы о необходимости дальнейшей проработки концепции плазменно-стимулированного горения. В данной работе для организации горения в сверхзвуковом потоке (число Маха $M=2$) предложена и экспериментально исследована модель пилона, на которой расположены инжекторы топлива и плазменный модуль для поджига. Показано, что предложенная модель обеспечивает стабильное воспламенение и удержание пламени в широком диапазоне расходов топлива, а также требует меньшего энергозатрата в разряд по сравнению с рассмотренными ранее конфигурациями.

The report presents an overview of approaches to controlling supersonic flow in channels and near surfaces with mechanical elements using a direct current discharge, as well as examples of the use of such a discharge to organize ignition and flame stabilization in a supersonic flow. Based on the review, conclusions were performed about the need for further fundamental research on the plasma-assisted combustion conception. In this work, for the organization of combustion in a supersonic flow (Mach number $M = 2$), a model of a pylon is proposed and experimentally investigated, on which fuel injectors and a plasma module for ignition are located. It is shown that the proposed model provides stable ignition and flame holding in a wide range of fuel flow rate, and also requires less energy input to the discharge in comparison with the previously considered configurations.

Плазменная аэродинамика включает в себя широкий класс задач по применению плазмы газовых разрядов для управления течением. Однако, для некоторых типов разрядов, в частности для разряда постоянного тока и для импульсно-периодического искрового разряда, круг задач охватывает также вопросы интенсификации смешения и стабилизации фронта пламени. В докладе представлен обзор подходов по управлению сверхзвуковым течением с помощью массива токовых каналов продольно-поперечного разряда. Показана возможность управления структурой скачков уплотнения в сверхзвуковом воздухозаборнике [1] и сверхзвуковом канале, а также силой, действующей в потоке на элемент управления около плоской стенки [2]. Несмотря на работы с прикладным уклоном, фундаментальные исследования разряда постоянного тока продолжаются.

Уточняется температура и химический состав плазмы, вольт-амперная характеристика, и совершенствуются методы математического моделирования этого объекта [3]

Плазменно-стимулированное горение представляет собой перспективный подход к организации стабильного воспламенения и горения в сверхзвуковом потоке. В докладе представлены результаты предыдущих исследований схем плазменно-стимулированного горения на плоской стенке [4], примеры сочетания такого подхода с классическими геометриями типа уступа и каверны [5]. На основании предыдущих экспериментов и рассмотренных работ предложена новая схема организации плазменно-стимулированного горения, которая подробно представлена в докладе.

Эксперименты выполнены на импульсной сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50 ОИВТ РАН Лаборатории плазменной аэродинамики и стимулированного горения. В тестовой секции с поперечным сечением 60*70мм и длиной 600мм установлен пилон высотой 26мм и толщиной 6мм. На боковых плоскостях пилона расположены 4 отверстия для инъекции топлива, а за кормой в поток вынесены два электрода для создания разряда. В качестве топлива используется этилен, массовый расход которого варьировался в диапазоне 0,5-4г/с. Параметры воздушного потока на входе в секцию: скорость 500м/с, статическое давление 200Торр, полная температура 300К. Разряд питается от источника постоянного напряжения 5кВ через балластное сопротивление, ограничивающее ток разряда. Ток разряда варьировался в диапазоне 2-7,5А, мощность энерговыклада в разряд составила порядка 3-5кВт (по сравнению с 10-18кВт в предыдущих работах [4]).

Проведенные эксперименты показали, что разряд стабильно пробивается при указанном напряжении 5кВ, после чего горит в следе за пилоном, образуя плазменную петлю. При этом петля пульсирует: вытягивается в длину, после чего разряд перепробивается около электродов, что приводит к резкому сокращению длины плазменной области. Перепробой имеют случайный характер, интервалам времени между перепробоями соответствуют частоты 10-20кГц, а изменение длины разряда приводит к пульсациям напряжения на разряде в диапазоне 200-2000В.

При подаче топлива в воздушный поток в следе за пилоном в области разряда образуется воздушно-топливная смесь. Подача топлива организована перпендикулярно набегающему потоку, что приводит к некоторому уменьшению скорости потока за пилоном. В результате этого, а также ввиду особенностей горения разряда в топливной смеси, длина плазменной области несколько уменьшается, а место перепробоя наоборот удаляется от электродов, в результате чего

напряжение пульсирует в диапазоне 500-1200В. В следе за разрядом формируется область, в которой идут химические реакции, которые не приводят к существенному тепловыделению. И только ниже по течению формируется зона горения с интенсивным тепловыделением. Т.е. имеет место двухстадийное горение (первая область – т.н. холодное пламя), или задержка воспламенения, которая в случае движения реагирующей смеси с высокой скоростью приводит к пространственному разделению области поджига и интенсивного тепловыделения. По данным скоростной видеосъемки задержку воспламенения можно оценить, как ~ 2 мс. При стабильном горении статическое давление достигало 600 торр при 200 торр в набегающем потоке. При большем значении давления канал запырался, наблюдалось кратковременное движение разряда в обратном направлении, длина разряда уменьшалась и интенсивность горения снижалась.

Таким образом, показано, что предложенная модель пилона с установленным генератором плазмы в сверхзвуковом потоке обеспечивает стабильное воспламенение и удержание пламени в широком диапазоне расходов топлива [6], а также требует меньшего энергозатрата в разряд по сравнению с рассмотренными ранее конфигурациями: 3-5кВт вместо 10-18кВт. Отметим, что при полном сгорании 1 г/с этилена мощность тепловыделения составляет 48кВт. С помощью скоростной видеосъемки и теневой визуализации показано, что при рассмотренных условиях в сверхзвуковом потоке реализуется двухстадийный режим горения этилена. Прямая визуализация двухстадийного воспламенения в сверхзвуковом потоке выполнена впервые. Показано, что задержка воспламенения составляет ~ 2 мс. При горении этилена регистрируется трехкратный рост давления, профиль давления зависит от энергозатрата в разряд. При горении возможна реализация пульсаций фронта пламени с частотами 60-400Гц.

Доклад подготовлен поддержке гранта РФФИ № 21-79-10408.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Falempin F., Firsov A.A., Yarantsev D.A., Goldfeld M.A., Timofeev K., Leonov S.B.* // *Experiments in Fluids*. – 2015. – Vol. 56. – Is. 54.
2. *Watanabe Y., Elliott S., Firsov A., Houpt A., Leonov S.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 52. – Is. 44. – P. 444003.
3. *Firsov A., Bityurin V., Tarasov D., Dobrovolskaya A., Troshkin R., Bocharov A.* // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Is. 7015.
4. *Firsov A.A., Savelkin K.V., Yarantsev D.A., Leonov S.B.* // *Phil. Trans. A*. – 2015. – Vol. 373. – Is. 2048.
5. *Leonov S.B., Elliott S., Carter C., Houpt A., Lax Ph., Ombrello T.* // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2021. – Vol. 124. – P. 110355.
6. *Firsov A.A.* // *Aerospace*. – 2023. – Vol. 10. – Is. 204.

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА
МИКРОВОЛНОВОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

**SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF ATMOSPHERIC-PRESSURE
MICROWAVE GLOW DISCHARGE**

Антипов С.Н., Гаджиев М.Х., Ильичев М.В., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И.
Antipov S.N., Gadzhiev M.Kh., Il'ichev M.V., Tyuftyaev A.S., Yusupov D.I.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва,
Ижорская 13 стр. 2
e-mail: antipov@ihed.ras.ru*

Исследовалась пространственно-временная структура тлеющего СВЧ-разряда атмосферного давления в потоке аргона. С помощью высокоскоростной видеосъемки наблюдалась фрактальная филаментация разрядного канала вблизи сферической поверхности одного из электродов. Предполагается, что фрактальность обусловлена ионизационной неустойчивостью на лавинной стадии разряда.

The spatio-temporal structure of a glow microwave discharge in argon flow at atmospheric pressure was investigated. The fractal filamentation of the discharge channel in the near-electrode regions was detected by high-speed video filming. It was assumed that the fractality of the filaments' structure arises because of the ionization instability at the avalanche stage.

В настоящей работе в геометрии электродов «сфера-плоскость» исследовалась пространственно-временная структура межэлектродного СВЧ-разряда в потоке аргона, представляющего собой новый вид тлеющего разряда при атмосферном давлении [1]. С помощью высокоскоростной видеосъемки наблюдалась фрактальная филаментация разрядного канала вблизи сферической поверхности электрода.

Для возбуждения разряда использовался СВЧ-плазмотрон на базе типового 1 кВт магнетрона и прямоугольного волновода (96×45 мм) с внешней электродной плазменной горелкой [2–4]. СВЧ-плазмотрон работает на частоте 2,45 ГГц, имеет СВЧ-мощность в волноводе до 3 кВт и мощность в горелке ~100 Вт. Плазменная горелка представляет собой цилиндрическую разрядную камеру с внутренним диаметром 2,5 см с расположенными внутри нее шестью стержневыми электродами, образующими в поперечном сечении горелки правильный шестиугольник. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон высокой чистоты (99,998%), расход которого составлял ~1-10 л/мин. После подачи газа в горелку и запуска магнетрона разряд в горелке инициировался посредством заправочной ионизации с помощью кончика тонкой проволоки, вводимого в меж-

электродный промежуток. В результате пробоя газа между стержневыми электродами и внутренней стенкой разрядной камеры возникали яркие каналы, представляющие собой самостоятельные разряды атмосферного давления тлеющего типа.

Пространственно-временная структура разрядных каналов исследовалась с помощью скоростной цветной видеокамеры VS-FAST с частотой кадров до 10^5 кадров/с. Экспериментально выявлена разветвленная микроструктура разрядного канала – близи закругленного конца стержневых электродов наблюдалось отчетливое дендритное расщепление каждого разрядного канала на ветвящиеся филаменты, образующие самоподобную (фрактальную) пространственную структуру. При этом кончики тончайших филаментов образуют на поверхности электрода паттерн из $\cong 10^2$ ярких подвижных микропятен. Мы полагаем, что такая сильная филаментация разряда вблизи концов стержнеобразных электродов обусловлена выпуклой формой концов электродов, что приводит к значительному расширению разрядного канала, вызывая его расщепление на отдельные элементы. На противоположном конце канала, у стенки камеры, филаментация разряда практически не видна; тем не менее на поверхности стенки также наблюдаются хаотично перемещающиеся микропятна. В центральной части разряд более чем в два раза сужается в канал с однородным свечением. Предполагается, что неустойчивость процесса ионизации возникает на лавинной стадии разряда. В этом случае неустойчивость развивается в расширяющейся лавине до тех пор, пока она не распадется на несколько дочерних лавин меньшего сечения. Этот процесс продолжается до тех пор, пока лавины не достигнут поверхности электрода. Таким образом, происходит последовательное расщепление исходной и дочерней лавин с уменьшением поперечных размеров и увеличением числа лавин, что приводит к формированию дендритной (фрактальной) пространственной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antipov S.N., Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Tyuftyaev A.S., Yusupov D.I., Chistolinov A.V., Abramov A.G., Ugryumov A.V. // Phys. Scr. – 2023. – Vol. 98. – P. 025604.
2. Chepelev V.M., Chistolinov A.V., Khromov M.A., Antipov S.N., Gadzhiev M.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1556. – P. 012091.
3. Antipov S.N., Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1698. – P. 012029.
4. Chepelev V.M., Chistolinov A.V., Antipov S.N., Gadzhiev M.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2100. – P. 012029.

ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ РАЗДЕЛЯЕМЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ПЛАЗМЕННОМ МАСС-СЕПАРАТОРЕ

INFLUENCE OF A PLASMA SOURCE OF SEPARATED SUBSTANCES ON THE PLASMA POTENTIAL SPATIAL DISTRIBUTION IN A PLASMA MASS SEPARATOR

Антонов Н.Н., Ойлер А.П.

Antonov N.N., Oiler A.P.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Российская Федерация,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: antonovnickola@gmail.com*

В рамках концепции плазменной масс-сепарации элементов с потенциальной ямой возникает целый ряд задач, связанных с изучением взаимного влияния узлов установки: источника плазмы разделяемых веществ, источника плазмы буферного разряда, системы коллекторов для сбора вещества, элементов зондовой диагностики. При инъекции низкотемпературной плазмы сепарируемых элементов вдоль силовых линий магнитного поля геометрические размеры источника оказывают влияние на радиальное распределение плазменного потенциала сепарационной камеры, что может влиять на эффективность процесса сепарации. Именно эффект взаимного влияния буферной плазмы и плазменной струи разделяемых элементов на радиальное распределение потенциала изучался в данной работе. Было проведено сравнение двух конфигураций полого анода: тора прямоугольного сечения и половины тора прямоугольного сечения.

Within the framework of the concept of plasma mass separation of elements with a potential well, a number of problems arise related to the study of the mutual influence of the installation nodes: the plasma source of the separated substances, the background discharge plasma source, the substance collecting system, and the elements of probe diagnostics. When low-temperature plasma of the separated elements is injected along the magnetic field lines, the geometric dimensions of the source affect the radial distribution of the plasma potential of the separation chamber, which can affect the efficiency of the separation process. The effect of the mutual influence of the background plasma and the plasma jet of the separated elements on the radial distribution of the potential was studied in this work. Two configurations of the hollow anode were compared: a rectangular torus and a half rectangular torus.

В рамках концепции плазменной масс-сепарации элементов с потенциальной ямой [1,2] возникает целый ряд задач, связанных с изучением взаимного влияния узлов установки: источника плазмы разделяемых веществ, источника плазмы буферного разряда, системы коллекторов для сбора вещества, элементов зондовой диагностики. Геометрические параметры источника плазмы, который погружен в плазму буферного разряда (отражательный разряд в аргоне с напряжением на торцевых электродах -550 В, и током до 15 А при наличии магнитного поля 1400 Гс), влияют на пространственное распределение потенциала и могут

приводить к ухудшению эффекта разделения элементов по массам. Источник плазмы представляет собой несамостоятельный дуговой разряд с полостью в аноде, горячим катодом и независимой инъекцией паров рабочего вещества. Инжекция плазмы осуществляется вдоль магнитных силовых линий. В рамках данной работы были изучены две конфигурации полого анода: тор прямоугольного сечения и половина тора прямоугольного сечения. Главной мотивацией являлась необходимость уменьшения влияния анода и других элементов источника плазмы разделяемых элементов на пространственное распределение потенциала плазмы. Было показано, что использование половинчатого анода приводит к увеличению разности потенциалов в разрядном промежутке (25 В против 20 В при токах порядка 50 А) и ухудшению эффекта плазменной масс-сепарации.

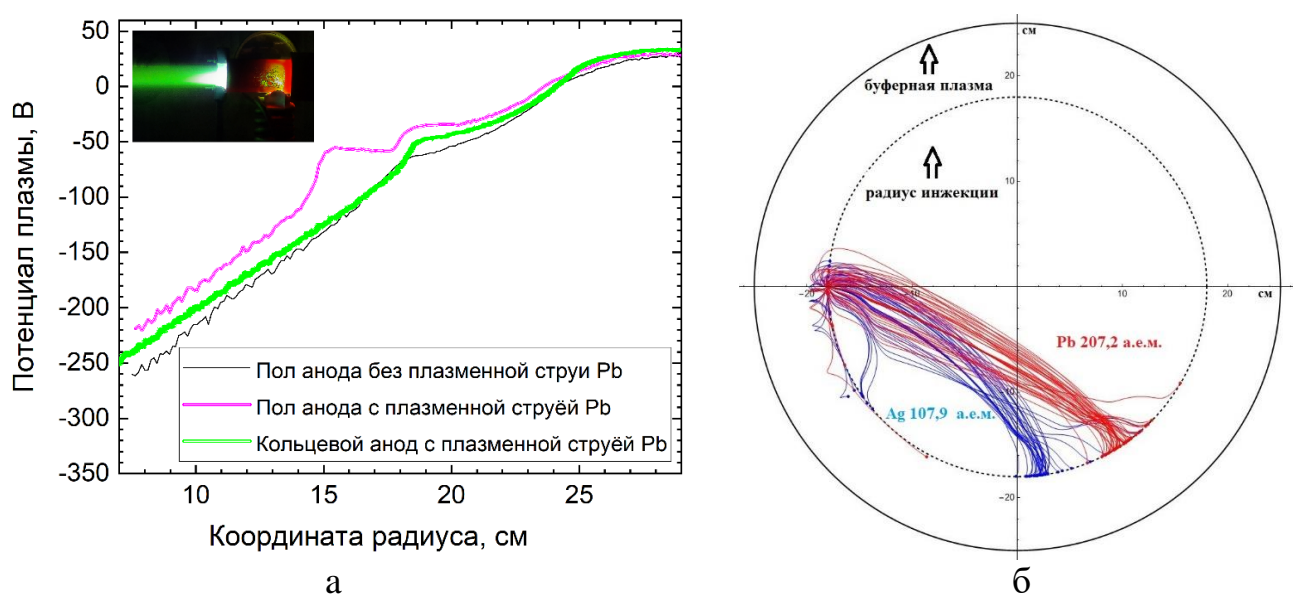


Рис. 1. а - сравнение профилей потенциала плазмы при инъекции струи свинца и без неё, с половинчатым и кольцевым анодами; б - моделирование траекторий движения частиц в потенциале, представленном на рисунке 1(а) с половинчатым анодом

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00716, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00716/>

ЛИТЕРАТУРА

1. *Liziakin G., Antonov N., Smirnov V.S., Timirkhanov R., Oiler A., Usmanov R., Melnikov A., Vorona N., Kislenko S., Gavrikov A., Smirnov V.P.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. – Vol. 54. – P. 414005.
2. *Zweben S.J., Gueroult R., Fisch N.J.* // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – P. 90901.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ С ЖИДКИМИ И ТВЕРДЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ, АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ.

APPLICATION OF ELECTRIC DISCHARGE WITH LIQUID AND SOLID ELECTRODES FOR WELDING PRODUCTS FROM STEEL, ALUMINUM AND ITS ALLOYS.

Гашигуллин К.А., Мастюков К.Ш., Сухих М.Е., Исмагилов Д.М., Гайсин Ал.Ф., Желтухин В.С.
Gashigullin K.A., Mastyukov K.Sh, Sukhikh M.E, Ismagilov D.M, Gaisin Al.F, Zheltukhin V.S.

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия
e-mail: kamil.gashigullin@yandex.ru*

Исследованы процессы сварки изделий из стали и алюминия, и их сплавов с применением разрядов между жидкими и твердыми электродами. Были получены образцы сварных швов при заданных условиях разряда (напряжение $50 \leq U \leq 1000$ В, сила тока $1 \leq I \leq 500$ А)

The processes of welding products made of steel, aluminum, and their alloys using discharges between liquid and solid electrodes is studied. Samples of welds under specified discharge conditions (voltage $50 \leq U \leq 1000$ V, current $1 \leq I \leq 500$ A) were obtained

Сварка стали, алюминия и его сплавов сопровождается сложностями, поскольку данные сплавы быстро окисляются при сварке на воздухе. Процесс сваривания необходимо осуществлять в атмосфере инертного газа, так как на поверхности алюминия в воздухе образуется окисная пленка с температурой плавления $T = 2044$ °С, в то время как температура плавления самого алюминия $T = 660$ °С. Поскольку процесс сваривания необходимо осуществлять при длительном воздействии высоких температурных режимов это приводит к выгоранию легирующих элементов сплава, сварной шов подвергается окислительному воздействию кислорода в воздухе, и корродирует. При сварке тонкостенных деталей также затруднено формирование валика. При сварке тонкостенных изделий из легированных сталей происходит прожег и оплавления кромок [3].

Сегодня для такой сварки применяют флюсы и инертные газы (аргоновая сварка, сварка плавящимся электродом и др.) для защиты участка подвергаемого сварке от агрессивного воздействия окружающей среды и повышения качества сварного шва. Решением задачи является электролитно-плазменная сварка изделий из алюминия, его сплава или стали в парогазовой среде. Отличительной особенностью электролитно-плазменной сварки изделий из алюминия или его

сплава является то, что происходит моментальное катодное распыление оксидной пленки в парогазовом разряде под действием ударов положительных ионов в неинертной (парогазовой) среде, при невысоких температурах электролита $T \approx 350$ °С. Тем самым исключается необходимость в доведении температуры свариваемой зоны до температуры плавления оксидной пленки алюминия, что в свою очередь позволяет сохранить технологические параметры изделий. Предлагаемый способ позволяет сваривать изделия из алюминия, его сплавов или сталей сложной геометрической формы, с развитой внешней и внутренней поверхностью. При этом отсутствует необходимость в использовании инертных газов, а также проволоки присадочного металла для наплавления [1].

Результат в электролитно-плазменной сварке изделий из алюминия, стали или их сплавов достигается совмещением свариваемых изделий зонами сваривания, подачей на них отрицательного потенциала и погружения зоны сваривания в электролит. На погруженную проводящую пластину подают положительный потенциал. Устанавливают напряжение $50 \leq U \leq 1000$ В между катодом и анодом. Катод является свариваемым изделием, анод является электролитом. Ток разряда $1 \leq I \leq 500$ А. Зажигают разряд между свариваемыми изделиями и осуществляют сварку в течении не менее 1 с. В качестве электролита используются водные растворы солей, кислот, щелочей с водородным показателем $2 \leq \text{pH} \leq 11$ [2].

Выбор конкретного значения напряжения, тока, состава и концентрации водного раствора электролита устанавливаются исходя из оптимальных условий для сварки изделий из алюминия или его сплава низкотемпературной плазмой парогазового разряда в электролите.

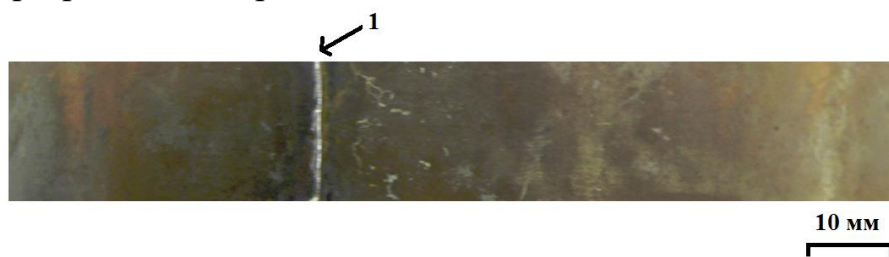


Рис. 1. Сварной шов (1) на изделии из электротехнической стали, сваренном электролитно-плазменной методом.

Сварка изделий из алюминия и тонкостенной стали с помощью парогазового разряда позволяет создавать качественные сварные соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин Ф.М. Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел. – Казань: Издательство Казанского государственного технологического университета, 2006. – 446 с.
2. Гайсин А.Ф. // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – № 71.
3. Масаков В.В. Сварка нержавеющей сталей. – Тольятти: Издательство Тольяттинского государственного университета, 2011.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ, ЛЕВИТИРУЮЩИХ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ РАЗРЯДЕ

DETERMINATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF PARTICLES LEVITATING IN A STRATIFIED DISCHARGE

Голубев М.С., Павлов С.И., Дзलिएва Е.С., Новиков Л.А., Карасев В.Ю.

Golubev M.S., Pavlov S.I., Dzlieva E.S., Novikov L.A., Karasev V.Yu.

*Санкт-Петербургский Государственный Университет,
Россия, СПб, Университетская наб. 7/9
e-mail: Maksider@ya.ru*

Проведена попытка определения трех координат частиц пылевой компоненты комплексной плазмы в тлеющем разряде. Измерение третьей координаты (высоты) проводилось методом перемещения фокусной плоскости микроскопа. Получено статистическое распределение соотношений высот, ширин и длин пылевых частиц.

An attempt was made to determine three coordinates of particles of the dusty component of a complex plasma in a glow discharge. The measurement of the third coordinate (height) was carried out by moving the focal plane of the microscope. The statistical distribution of the ratios of heights, widths and lengths of dust particles is obtained.

При создании пылевой плазмы происходит отбор частиц в соответствии с параметрами пылевой ловушки [1]. В стратифицированном разряде проводились эксперименты по извлечению отобранной разрядом фракции [2-4]. Исследование характеристик отобранных частиц необходимо для создания точной модели сепарации. Геометрические параметры, такие как размеры, являются ключевыми. Исследование сепарации, проведенное в смесях газов [5, 6], дало двумерное распределение левитировавших частиц в зависимости от состава газа. Для оценок необходимо более точно знать параметры, характеризующие форму частиц. Проблема, рассматриваемая в настоящей работе, касается расположения на стеклянной пластинке частиц, упавших после выключения разряда. Использовались полидисперсные частицы кварца неправильной формы.

Измерение длины и ширины отобранных, как и засыпных, частиц в настоящий момент проводится с помощью оптического микроскопа. Высота пылинок является предполагаемой величиной. В данной работе произведена попытка определения высоты каждой частицы при помощи оптического микроскопа.

Метод определения высоты пылинок заключается в помещении каждой из них как в наиниžшую, так и в наивысшую точки высоты предметного столика

микроскопа, в которых ещё наблюдается фокусировка оптической системы микроскопа на этой частице. При этом непосредственно наблюдать нижнюю часть пылинки не удаётся, так что считается, что низ частицы по высоте совпадает с предметным стеклом и мельчайшими объектами на нём, на которых и производится контрольная фокусировка.

Метод показал приемлемую точность около 30% для пылинок с характерным размером 2 – 50 мкм, что как раз попадает в диапазон распределения отсепарированной пыли в наших экспериментах [5,6].

По одному из образцов получено статистическое распределение соотношений высот, ширин и длин пылевых частиц. Использован сбор отсепарированной пылевой компоненты в результате эксперимента в смеси гелия и ксенона в пропорции 99:1 при давлении 1 Торр. Полученное среднее соотношение длины и высоты частиц составило 1,45. Оно экстраполировано на серию экспериментов в смеси гелия и ксенона при других пропорциях [6], где использовались проекционные (двумерные) изображения частиц и сопоставление им среднего размера, используемого в газодинамике потоков частиц [7]. В результате получена более точная оценка массо-габаритных параметров пылевой компоненты.

Работа поддержана РФФ, грант № 22-22-00154.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fortov V.E., Khrapak A.G., Khrapak S.A., Molotkov V.I., Petrov O.F. // Phys. Usp. – 2004. – Vol. 47. – No. 447.
2. Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Yu. // Tech. Phys. – 2012. – Vol. 57. – No. 945.
3. Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Yu. // Tech. Phys. – 2012. – Vol. 57. – No. 145.
4. Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Yu. // Plasma Physics Reports. – 2012. – Vol. 38. – No. 540.
5. Dzlieva E.S., Golubev M.S., Novikov L.A., Pavlov S.I., Gasilov M.A., Karasev V.Yu. // Intern. Conf. PPPT-10. – 2022. – No. 155.
6. Dzlieva E.S., Maiorov S.A., Novikov L.A., Pavlov S.I., Balabas M.V., Krylov I.R., Karasev V.Yu. // Plasma Physics Reports. – 2022. – Vol. 48. – No. 1066.
7. Грин X., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. – Л.: Химия, 1969.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ
ПРИ НАНЕСЕНИИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

**INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF LOW-TEMPERATURE GAS
DISCHARGE PLASMA WITH LIQUID ELECTRODES DURING THE DEP-
OSITION OF CHROMIUM COATINGS**

Дрожжин С.А.¹, Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}
Drozhdzhin S.A.¹, Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}

¹ *Казанский федеральный университет,
Россия, 420008, ул. Кремлевская, д. 18, Казань*

² *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7*

³ *Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: kashlenar@gmail.com*

Работа посвящена исследованию параметров низкотемпературной плазмы газового разряда с жидкими электродами при нанесении хромовых покрытий. Были оценены: характеристическая энергия электронов $\epsilon_{\text{char}} = 3-4$ эВ, скорость дрейфа $0,3-1,3 \cdot 10^7$ см/с, а затем и концентрация электронов в столбе разряда при плотности тока $3-4,5$ А/см² - $n_e = (2-6) \cdot 10^{12}$ см⁻³. Степень ионизации газа составляет $\alpha = 10^{-7}-10^{-6}$.

The work is devoted to research. parameters of low-temperature gas discharge plasma with liquid electrodes during the deposition of chromium coatings. The following were estimated: the characteristic energy of electrons $\epsilon_{\text{char}} = 3-4$ eV, the drift velocity $0.3-1.3 \cdot 10^7$ sm/s, and then the concentration of electrons in the discharge column at a current density of $3-4.5$ A/cm² - $n_e = (2-6) \cdot 10^{12}$ cm⁻³. The degree of gas ionization is $\alpha = 10^{-7}-10^{-6}$.

Плазменно-электролитное формирование хромовых покрытий является перспективной технологией, способной найти применение в различных технологических операциях изготовления изделий машиностроения с повышенными антикоррозионными и эксплуатационными свойствами. Данный метод превосходит классическую технологию электрохимического осаждения по скорости осаждения покрытия и его механическим характеристикам. Потребность в использовании плазменно-электролитного осаждения покрытий возникла в связи с высокой токсичностью раствора на основе шестивалентного хрома, а использование безвредных растворов на основе трёхвалентного хрома показали низкие механические характеристики и требовали дополнительной термической обработки. Свойства получаемого покрытия коррелируют с режимами горения одиночных микрозарядов. В зависимости от их параметров будет по-разному происходить тепловое воздействие на поверхность покрытия, будут наблюдаться

разные скорости охлаждения, что существенно влияет на формируемую микро-структуру [1]. Целью работы являлось исследование параметров низкотемпературной плазмы газового разряда с жидкими электродами при нанесении хромовых покрытий.

Для определения параметров плазмы в условиях использования раствора сульфата хрома, имеющего темно-зеленый цвет и низкую прозрачность, была изготовлена экспериментальная установка, реализующая процесс осаждения в условиях стекания раствора на образец. Это позволило реализовать минимальную толщину раствора в месте горения разряда для диагностики его параметров.

С использованием зависимости параметров электронов от величины приведенного поля для плазмы паров воды, были оценены: характеристическая энергия электронов $\epsilon_{\text{хар}} = 3 - 4$ эВ, скорость дрейфа $0,3 - 1,3 \cdot 10^7$ см/с, а затем и концентрация электронов в столбе разряда при плотности тока $3 - 4,5$ А/см² - $n_e = (2 - 6) \cdot 10^{12}$ см⁻³. Степень ионизации газа составляет $\alpha = 10^{-7} - 10^{-6}$. Функция распределения электронов по энергиям при таких степенях ионизации сильно отличается от равновесной Максвелловской и средние энергии электронов составляют $3,5 - 4,5$ эВ. Параметры плазмы столба разряда при атмосферном давлении близки к параметрам столба тлеющего разряда при пониженных давлениях (менее 10 Па).

Большая величина энергии электронов подтверждается также видом спектров излучения разряда. В спектрах наряду с линиями излучения атомов натрия с энергией возбуждения $E_v = 3,4 - 4,3$ эВ наблюдаются полосы излучения молекул гидроксильной группы ОН.

Увеличение величины прикладываемого напряжения приводит к изменению длины волны излучения в видимом диапазоне, а именно с синего на ярко белый. В спектрах присутствуют несколько линий и полос.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kashapov L., Kashapov N., Kashapov R. // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 479. – No. 012011.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СФЕРОИДИЗАЦИИ ЧАСТИЦ ОКСИДА КРЕМНИЯ В ВЧ-РАЗРЯДЕ

INVESTIGATION OF PROCESSES OF SPHEROIDIZATION OF SILICON OXIDE PARTICLES IN RF-DISCHARGE

Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}
Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}

¹ *Казанский федеральный университет, Россия, 420008, ул. Кремлевская, д. 18,
Казань*

² *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7*

³ *Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: kashlenar@mail.ru*

В работе исследуется процесс сфероидизации частиц оксида кремния размером менее 10 мкм в ВЧ-разряде. Полученные частицы необходимы для создания сорбента колонки ВЭЖХ.

In this work, the process of spheroidization of silicon oxide particles with a size of less than 10 μm in an RF discharge is studied. The obtained particles are necessary for the creation of the sorbent of the HPLC column.

Методы лабораторной диагностики являются ключевым элементом при лечении пациентов. Наиболее быстрым и эффективным методом является высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), который основан на пропускании исследуемого вещества под высоким давлением через сорбент – неподвижную фазу хроматографической колонки. Одним из возможных методов, подходящих для получения носителя неподвижной фазы колонки ВЭЖХ с точки зрения получения сферических частиц оксида кремния размером от 1 до 10 мкм может быть плазменная сфероидизация. Сам процесс будет состоять из двух основных этапов: подготовка сырья, а именно измельчение оксида кремния в атриторе, и сфероидизации в низкотемпературной плазме.

При попадании частичек измельченного порошка в зону ВЧ-разряда под действием температуры происходит нагрев и их плавление. Частицы в жидком состоянии под действием поверхностного натяжения приобретают сферическую или близкую к ней форму, а далее вылетая из зоны разряда охлаждаются и затвердевают. Доля частиц порошка подверженных сфероидизации определяется теплообменом между низкотемпературной плазмой и частицами оксида кремния.

Известны работы [1, 2], посвященные теоретическим исследованиям применения плазменных струй от дугового и ВЧ-разрядов в плазмохимических реакторах для переработки мелкодисперсных порошков. В них представлены расчеты полей температур и газовых потоков, основанные на решении интегральных уравнений пограничного слоя. Траектории одиночных частиц получаются путем решения уравнений Бассе-Одара. Далее представлена модель с несколькими частицами порошка с известным распределением размеров и скоростью впрыска. В работе [1] расчеты реализованы на примере плазменной термической обработки дисульфида молибдена с диаметром частиц от 5 до 30 мкм. Определены параметры скорости плазменной струи, средняя скорость впрыска и условия окружающей среды в плазмохимическом реакторе.

В нашей работе для упрощения расчета были использованы три допущения:

- не учитывается влияние частиц порошка на температуру плазмы ВЧ-ряда;
- предполагается, что плазма оптически тонкая, тепло передается частице порошка от плазмы за счет теплопроводности и конвекции, а тепловые потери частиц происходят за счет излучения;
- температура плазмы составляет 8000 К.

Время, необходимое для процесса сфероидизации, представляет собой сумму времени нагревания твердой частицы до ее температуры плавления и плавления частицы при постоянной температуре. Таким образом время, необходимое для сфероидизации различных исходных материалов, может быть получено с использованием методов Рунге-Кутты четвертого порядка. Установлено, что время сфероидизации частиц оксида кремния разного диаметра составляет: для 10 мкм – 2.44 мкс; для 30 мкм – 18.32 мкс; для 70 мкм – 118.53 мкс; для 100 мкм – 196.26 мкс. Как и следовало ожидать время сфероидизации частиц увеличивается с увеличением диаметра частиц.

Для процесса сфероидизации использовались частицы диаметром меньше 10 мкм, которые были получены с помощью измельчения кварцевого песка в аттригоре и последующего просеивания через сито с размером ячейки сетки 10 мкм. Анализ порошка с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2 показал, что исходные частицы песка представляют из себя кристаллический кварц, который после процесса сфероидизации в основном переходит в аморфное состояние.

На рисунке 1 представлено изменение распределения частиц по размерам до и после плазменной сфероидизации. После плазменной обработки наблюдается появление частиц большего размера. Крупные частицы получаются при столкновении расплавленных частиц, а мелкие – при конденсации испарившихся частиц, поэтому распределение конечных продуктов по размерам становится более

широким. Мелкие частицы попадая в плазменный факел испаряются из-за малого объема вещества, а крупные плавятся и образуют сферы под действием поверхностного натяжения. Данная смесь продвигаясь к концу плазменного факела приводят к тому, что расплавленные частицы затвердевают, а пар от испарившихся мелких частиц переходит в наночастицы. Они в свою очередь попадая на поверхность сферической частицы микронного размера фиксируются на ней. Таким образом должно происходить формирование частиц, покрытых наночастицами.

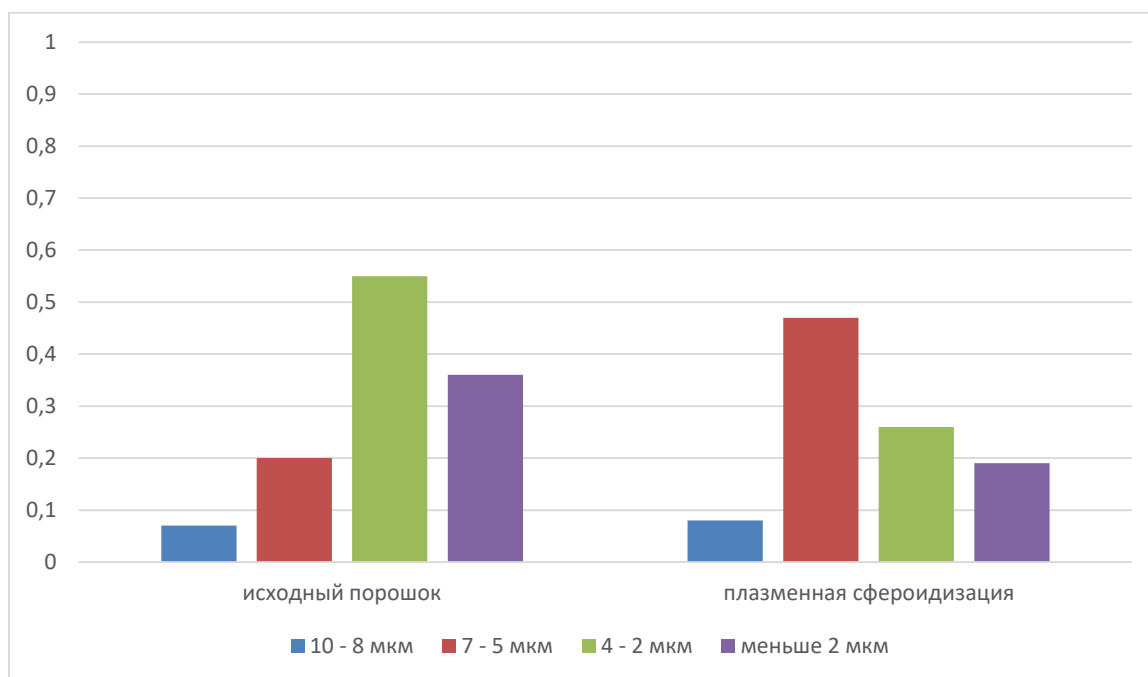


Рис. 1. Распределение частиц порошка по размерам:
а – до сфероидизации, б – после плазменной сфероидизации.

Так как оксид кремния имеет температуру плавления 1986 К, а температуру кипения 3223 К и низкую теплопроводность, то это будет приводить к высокой скорости испарения. А в свою очередь испарившийся оксид кремния в виде наночастиц будет осаждаться на поверхности сферической частицы микронного размера.

Таким образом можно говорить, что данный метод получения носителя неподвижной фазы для колонки ВЭЖХ является достаточно эффективным.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Boulos M.I., Gauvin W.H.* // Can. J. Chem. Eng. – 1974. – Vol. 52. – No. 35.
2. *Boulos M.I.* // IEEE T. Plasma Sci. – 1978. – Vol. PS-6. – No. 93.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЯ ЛЕВИТАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В РАЗЛИЧНЫХ ПЛАЗМОФОРМИРУЮЩИХ ГАЗАХ

INVESTIGATION OF THE CONDITION OF LEVITATION OF DUST PARTICLES IN VARIOUS PLASMA-FORMING GASES

Павлов С.И.¹, Голубев М.С., Дзलिएва Е.С., Новиков Л.А., Карасев В.Ю.

*¹Санкт-Петербургский Государственный Университет,
Россия, СПб, Университетская наб. 7/9
e-mail: sergey_pavlov86@mail.ru, s.i.pavlov@spbu.ru*

В работе представлены экспериментальные данные по отбору пылевых частиц в ловушках в стратах тлеющего разряда. Отбор пылевых частиц проводился в плазме различных инертных газов от гелия до ксенона. Собрана статистика уловленных частиц, определены средние размеры частиц и их форма.

The paper presents experimental data on the selection of dust particles in traps in glow discharge striations. The selection of dust particles was carried out in the plasma of various inert gases from helium to xenon. Collected statistics of trapped particles, determined average particle size and shape.

В пылевой плазме [1-3] при протекании процесса самоорганизации происходит отбор частиц в плазменных ловушках по определенным параметрам. Исследование процесса отбора частиц может экспериментально проводиться либо при использовании широкого диапазона пылевых частиц, либо при варьировании параметров пылевых ловушек, например, при изменении плазмоформирующего газа. В последнем случае одновременно изменяются электронная температура (средняя энергия), удерживающее электрическое поле, а также масса иона, влияющая на ионное увлечение.

Применение калиброванных частиц разных размеров является затратным и, кроме того, использование полидисперсных частиц позволит проводить отбор по форме. Изменение параметров разряда может быть произведено путем сравнения результатов в рабочих газах, существенно различающихся по потенциалу ионизации и массе атомов. Для настоящих исследований выбрано пять инертных газов и полидисперсный порошок кварца.

Для проведения эксперимента по изучению отбора частиц плазмой необходимо уловить отобранные в ловушке частицы, извлечь их из разряда и далее провести их измерения при наблюдении в микроскоп. Конструкция разрядной камеры и способ улавливания частиц, а также метод оценки их параметров был предложен в работах [4,5,6,7]. Для оценки параметров частиц используется представление о разряде малых токов и низкого давления в инертных газах, что соответствует применению условий нелокальной кинетики [8, 9].

В настоящей работе экспериментально изучен отбор характеристик пылевых частиц, левитирующих в страте в тлеющем разряде в наборе инертных газов от гелия до ксенона. В аргоне сам эффект отбора частиц проводился впервые. Для набора газов подобраны ток и давление, при которых существуют пылевые ловушки. Собрана статистика уловленных частиц, определены средние размеры частиц и их форма.

Для физических оценок полученных размеров частиц проведено сопоставление размеров и параметрам плазмы в разрядах. Полученные результаты позволяют выбрать условия, при которых можно управлять параметрами пылевой ловушки и настраивать «плазменный фильтр» на отбор выбранного размера частиц. Переход последовательно от одного инертного газа к другому при одинаковых параметрах позволяет определить роль изменения основного параметра частиц – из заряда – при вариации температуры (средней энергии) электронов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-72-10004.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fortov V.E., Morfill G.E.* Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. – N.Y.: Taylor and Francis, 2010.
2. *Fortov V.E., Khrapak A.G., Khrapak S.A., Molotkov V.I., Petrov O.F.* // Phys. Usp. – 2004. – Vol. 47. – No. 447.
3. *Tsyтович V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M.* Elementary Physics of Complex Plasmas. – N.Y.: Springer, 2008.
4. *Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Y.* // Tech. Phys. – 2012. – Vol. 57. – No. 945.
5. *Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Y.* // Tech. Phys. – 2012. – Vol. 57. – No. 145.
6. *Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Y.* // Plasma Physics Reports. – 2012. – Vol. 57. – No. 540.
7. *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Eikhval'd A.I., Ermolenko M.A., Golubev M.S., Ivanov A.Yu.* // Phys. Rev. E. – 2009. – Vol. 79. – No. 0264061.
8. *Nekuchaev V.O., Kudryavtsev A.A., Golubovskii Yu.B., Tsendin L.D., Porokhova I.A.* Kinetics of Electrons in a Non-Equilibrium Gas-Discharge Plasma. – SPb: SPbSU Publishing House, 2004.
9. *Raizer Y.P.* Gas Discharge Physics. – M.: Nauka, 1987.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ И СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ

PARAMETRIC DEPENDENCIES OF ION DISTRIBUTION BY ENERGIES AND SPECTRA OF RADIATION IN THREE-COMPONENT PLASMA

Ригин А.В., Строкин Н.А.
Rigin A.V., Strokin N.A.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, Иркутск, Лермонтова, 83
e-mail: arseniy.rigin@mail.ru*

Показаны результаты анализа совместных измерений распределений ионов по энергии, интегральных по массам, и спектров излучения трехкомпонентной плазмы холловского разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Обнаружены пороговые значения магнитного поля и скорости напуска газа, при которых происходит изменение режимов горения разряда.

The results of the analysis of joint measurements of ion distributions by energy, integral by mass, and radiation spectra of the three-component plasma of the Hall discharge in crossed electric and magnetic fields are presented. Threshold values of the magnetic field and the gas flow rate were detected, at which the discharge burning modes changed.

Источники многокомпонентных потоков ионов необходимы для реализации масс-сепарации веществ, находящихся в плазменном состоянии. Так, для плазмооптического масс-сепаратора [1,2] предлагается использовать холловский плазменный ускоритель, в том числе, с анодным слоем (его традиционное обозначение УАС, хотя оно и не отражает действительное распределение потенциала в разрядном промежутке). Процесс генерации и разделения ионов идет в широком диапазоне магнитных полей ($100 - 5 \cdot 10^4$ Гс) при различных полных давлениях и скоростях напуска плазмаобразующих газов. Поэтому необходимо знать закономерности образования плазмы и парциальные вклады различных газов. Для однокомпонентного плазмаобразующего газа в УАС такие данные получены [3]. Были обнаружены различные ионные эффекты – «прыжки» анодного слоя, изомагнитные скачки плотности. Выяснено, как изменяется плотность плазмы при росте индукции магнитного поля. Измерение распределений ионов по энергии в [3] проводилось с помощью энергоанализатора с задерживающим потенциалом (ЭЗП). Плотность плазмы вычислялась при интегрировании функции распределения.

В случае многокомпонентной плазмы с широким энергетическим и угловым спектрами ионов использование только корпускулярной диагностики не дает практически приемлемых результатов. В данной работе предлагается обратить внимание на возможность совместного анализа «суммарных» распределений ионов по энергии, полученных с помощью ЭЗП, и спектров излучения плазмы. Такой подход позволяет контролировать зависимости отдельных компонент плазмаобразующей среды от внешних параметров.

На рис. 1 приведен пример изменения интенсивностей линий неона, аргона и криптона – атомарных и однократно заряженных ионов с максимально изменяющейся по амплитуде линией ArI 750.55 нм (измерено спектрометром CCS200; разрешение $\Delta\lambda \approx 1.2$ нм).

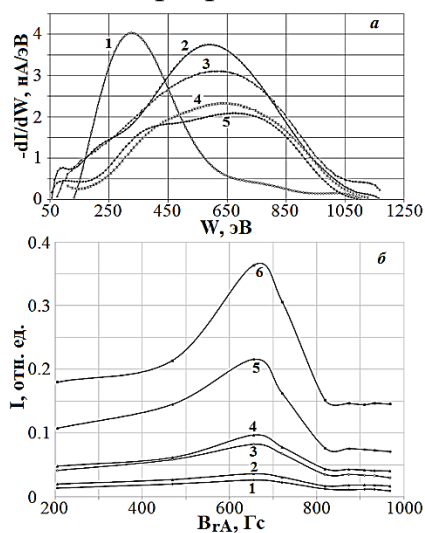


Рис. 1. Разрядное напряжение 1100 В; неон ($q = 8$ см³/мин) + аргон (7) + криптон (7). *а.* Распределения ионов по энергии: 1 – $B_{rA} \approx 205$, 2 – 470, 3 – 720, 4 – 820, 5 – 970 Гс. *б.* Интенсивности линий излучения: 1 – NeII длина волны $\lambda = 626.94$ нм; 2 – KrI 645.40 нм; 3 – ArII 641.73 нм; 4 – KrII 474.10 нм; 5 – NeI 585.51 нм; 6 – ArI 750.55 нм.

Обнаружено «критическое магнитное поле» $B_{rA} \approx 650$ Гс (дана радиальная компонента поля на аноде УАС), выше которого наблюдаются существенные изменения распределений ионов по энергии и спад интенсивности всех регистрируемых линий излучения – изменение режима горения разряда с уменьшением тока разряда; температура электронов при этом заметно не изменяется. Соотношения между интенсивностями линий

сохраняются с точность $\sim 10\%$ во всем диапазоне магнитных полей.

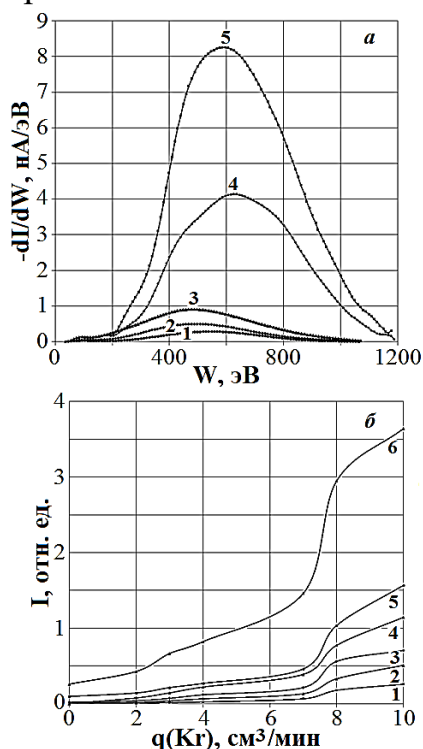


Рис. 2. Разрядное напряжение 1100 В; неон ($q = 2$ см³/мин) + аргон (2) + криптон ($q - \text{var}$). *а.* Распределения ионов по энергии: 1 – $q(\text{Kr}) = 0$; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 7; 5 – 8 см³/мин. *б.* Интенсивности линий излучения: 1 – NeII (626.94 нм); 2 – KrI (645.40); 3 – ArII (641.73); 4 – KrII (474.10); 5 – NeI (585.51); 6 – ArI (750.55).

На рис. 2. видны особенности излучения в отдельных линиях – без основной линии криптона («чтобы не «экранировала» изменение линий других газов). Режим разряда в данном случае – с нелинейным возрастанием тока разряда, изменяется при скорости напуска криптона $q(\text{Kr}) \approx 7-8$ см³/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morozov A.I., Semashko N.N. // Tech. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 28. – No. 1052.
2. Strokin N.A., Bardakov V.M. // Plasma Phys. Rep. – 2019. – Vol. 45. – No. 46.
3. Strokin N.A., Kazantsev A.V., Bardakov V.M., Nguyen T., Kuzmina A.S. // Phys. Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – No. 073501.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ТИТАНА

STUDY OF A GAS DISCHARGE WITH A LIQUID ELECTRODE IN THE PRODUCTION OF TITANIUM OXIDE NANOPARTICLES

Сергеев П.В.¹, Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}
Sergeev P.V.¹, Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}

¹ *Казанский федеральный университет, Россия, 420008, ул. Кремлевская, д. 18,
Казань*

² *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7*

³ *Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: kashlenar@gmail.com*

Работа посвящена исследованию газового разряда с жидким электродом при получении наночастиц оксида титана. Горение разряда имеет два режима, отличающихся друг от друга спектром излучением и тепловыделением. Переход из «стационарного» режима в «дуговой» режим происходит в результате нагрева катода и эффекта термоэмиссии.

The work is devoted to the study of a gas discharge with a liquid electrode in the production of titanium oxide nanoparticles. The discharge burning has two regimes, differing from each other in the spectrum of radiation and heat release. The transition from the "stationary" mode to the "arc" mode occurs as a result of cathode heating and the thermal emission effect.

Особенностью плазменных технологий является сочетание таких свойств как высокая производительность и способность получать чистые с контролируемой структурой материалы. К таким материалам можно отнести сорбенты хроматографических колонок высокоэффективной жидкостной хроматографии, являющимися неподвижной фазой выполняющей функцию разделения компонентов смеси во времени [1]. Для увеличения диапазона возможностей применения хроматографических колонок, а именно возможности эксплуатации в диапазоне рН=1-14 подходящими являются оксид титана и оксид циркония. Одним из эффективных и достаточно простым способом получения частиц порошка (от нанометрового до микронных размеров) является горение разряда с жидкими электродами или же называемого плазменно-электролитным процессом [2]. Целью данной работы являлось исследование газового разряда с жидким электродом при получении наночастиц оксида титана.

Плазменно-электролитный процесс обусловлен переходом из явления электролиза в состояние горения разряда в парогазовой оболочке. Горения разряда

начинает развиваться с торцевой части электрода, что объясняется более высокой напряженностью поля в данном месте. Увеличивая прикладываемое напряжение, мы наблюдаем постепенное увеличение зоны горения разряда. Данная область на кривой ВАХ характеризуется малым углом падения кривой и близка к горизонтальному расположению. Дальнейшее увеличение напряжения может привести к более интенсивному горению разряда с изменением свечения плазмы, что на кривой ВАХ отмечается повышением силы тока, это связано с переходом горения разряда из «стационарного» режима в «дуговой» режим за счет возникновения эффекта термоэмиссии. Отличие «стационарного» от «дугового» визуально отличается цветом свечения и намного меньшей его интенсивностью. Для «стационарного» - фиолетовое свечение, для «дугового» - оранжево-желтое. Уменьшение концентрации раствора приводит к смещению максимума ВАХ в область меньших напряжений и уменьшению его величины. Сравнение кислот и щелочей показало, что для раствора кислоты наблюдаются более высокие значения силы тока, что объясняется большей проводимостью раствора. Установлено, что для раствора гидроксида натрия с концентрации 2% образование газопаровой оболочки происходит при 47 В, 1% - 70 В, 0.3% - 140 В. Для растворов соляной кислоты образование парогазовой оболочки происходило для концентрации 2% - 50 В, 1% - 65 В, 0.3% - 130 В. Как было описано выше горение разряда имеет два режима, отличающихся друг от друга спектром излучением и тепловыделением. На примере 1% раствора NaOH переход из начального «стационарного» режима горения разряда в «дуговой» режим происходил при 120 В, для 2% при 108 В и для 0.3% в экспериментах не наблюдалось. В свою очередь изменяя режимы горения разряда можно управлять степенью термического воздействия на титановый электрод и процесс получения частиц оксида титана.

Проведенные исследования показали, что плазменно-электролитный процесс реализуемый в условии катодной полярности активного металлического электрода и его погружении в электролит может быть применен для получения микро- и наночастиц оксида титана, а также частиц титана размером до 10 мкм, покрытых оксидом титана. Установлено, что режим горения разряда существенно влияет на размеры получаемых частиц оксида титана.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bao B., Wang Z., Thushara D., Liyanage A., Gunawardena S., Yang Z. // Separations. – 2021. – Vol. 8. – No. 3.
2. Kashapov L., Kashapov N., Kashapov R. Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 479. – No. 012011.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО МОЩНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

GAS DISCHARGE PROPOGATION UNDER THE ACTION OF THE POWERFUL TERAHERTZ RADIATION

Сидоров А.В., Веселов А.П., Водопьянов А.В., Глявин М.Ю., Калынов Ю.К.
Sidorov A.V., Veselov A.P., Vodopyanov A.V., Glyavin M.Yu., Kalynov Yu.K.

*Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
e-mail: alexsv@ipfran.ru*

В данной работе приводятся результаты исследований по изучению особенностей распространения газового разряда под действием электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот, проводившихся в ИПФ РАН в течение последних нескольких лет.

This paper presents the results of investigations on the study of the features of the gas discharge propagation under the action of electromagnetic radiation in the terahertz frequency range, carried out at the IAP RAS over the past few years.

Процессы создания и динамики газового разряда в сфокусированных пучках электромагнитного излучения достаточно подробно исследованы в СВЧ и ИК диапазонах. Терагерцовый диапазон частот, лежащий между ними, стал доступен для исследователей физики газового разряда сравнительно недавно в связи с прогрессом в создании мощных источников указанного диапазона частот – лазеров на свободных электронах и гиротронов [1-3].

Газовый разряд имеет свойство распространяться. В случае лазерной искры этот эффект был обнаружен и исследован в одной из самых первых работ, посвященных этому типу разряда. В настоящее время можно сделать вывод, что явление распространения разряда в случае лазерной искры изучено достаточно подробно (см. [4]). В случае СВЧ диапазона распространение разряда в воздухе изучено наиболее подробно [5]. Также имеется ряд работ, посвященных распространению СВЧ-разрядов в благородных газах как в волноводах, так и в сфокусированных пучках СВЧ-излучения [6]. Следует отметить, что интерес к последнему типу разрядов не ослабевает до сих пор [6].

Настоящая работа посвящена исследованию распространения разряда в газах в сфокусированных волновых пучках терагерцового диапазона частот. Представлены результаты по исследованию пространственной динамики разряда как в чистых инертных газах и их смесях (гелий с добавлением аргона), так и в молекулярных газах (азот, кислород, воздух) в широком диапазоне давлений газа (от единиц Торр до нескольких атмосфер).

Греющее электромагнитное излучение направлялось в разрядную камеру с помощью квазиоптической системы зеркал. Разряд зажигался в фокусе электромагнитного излучения и распространялся навстречу ему. Исследования проводились для нескольких частот греющего излучения (в интервале от 250 ГГц до 1 ТГц) в широком диапазоне плотностей мощности в фокальном пятне (от долей кВт/см² до нескольких МВт/см²).

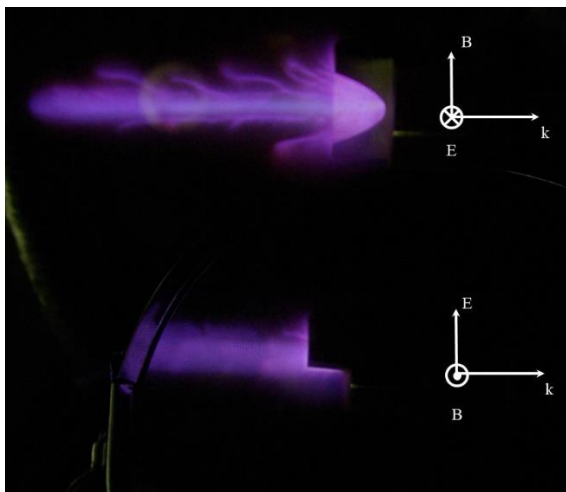


Рис. 1. Фото разряда в струе аргона в двух плоскостях. Фоновое давление – 5 Торр. Частота греющего излучения – 670 ГГц

Динамика свечения разряда исследовалась с помощью фотоэлектронного регистратора, камеры с малой выдержкой кадра (до 20 нс), быстрой камеры с частотой следования кадров в плотность до 1000 fps и фотоаппарата. Измерены скорости распространения как равновесного, так и неравновесного разрядов в различных атомарных и молекулярных газах и их смесях. Равновесный разряд распространялся с дозвуковыми скоростями, в то время как неравновесный – со сверхзвуковыми. Исследована пространственная структура фронта неравновесного разряда. Обсуждаются различные механизмы распространения неравновесного и равновесного разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S., Rodgers J., Kashyn D.G., Romero-Talamas C.A., *Pu R.* // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – No. 153503.
2. Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N. // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 102. – No. 245101.
3. Kulipanov G.N. // *Terahertz Sci. Technol.* – 2008. – Vol. 1. – No. 107.
4. Raizer Yu.P. *Laser-Induced Discharge Phenomena.* – N.Y.: Consultants Bureau, 1977.
5. Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г., Косый И.А., Семенов В.Е. СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн // *Высокочастотный разряд в волновых полях: сборник.* – Горький: ИПФ АН СССР, 1988. – С. 136.
6. Artem'ev K.V. // *Plasma Phys. Rep.* – 2020. – Vol. 46. – P. 1220–1226.

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ТОКА В РАЗРЯДЕ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ: УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

SMALL-SCALE PULSATIONS OF THE CURRENT IN A DISCHARGE WITH A LIQUID ELECTROLYTE CATHODE: CONDITIONS FOR THE APPEARANCE

Тазмеев Г.Х., Тазмеев Х.К.
Tazmeev G.K., Tazmeev K.K.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт, Россия, 423810, Набережные Челны, просп. Мира, 68/19
e-mail: gktazmeev@kpfu.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований разряда с жидким электролитным катодом в диапазоне токов 50-100 мА при межэлектродном расстоянии в пределах 1-12 мм в открытой атмосфере. Возникновение пульсаций тока рассмотрены в предположении капельного переноса вещества и зарядов из водного раствора в плазму.

The results of experimental studies of a discharge with a liquid electrolyte cathode in the current range of 50–100 mA at an interelectrode distance of 1–12 mm in an open atmosphere are presented. The appearance of current ripples is considered under the assumption of a droplet transfer of matter and charges from an aqueous solution into a plasma.

Исследования, проведенные за последние десятилетия, показывают перспективность разрядов с жидкими электродами для многих практических приложений. Взаимодействие плазмы разряда с жидкостью является сложным процессом. В настоящее время отсутствует ясная картина такого взаимодействия. В частности, не в полной мере раскрыт механизм переноса вещества и зарядов на границе «плазма-жидкий катод». Предполагается, что возможен капельный механизм [1-3]. Его суть заключается в том, что раствор распыляется и в виде мелких капелек поступает в плазму. В составе капелек переносятся катионы и анионы электролита. Порционное изменение количества носителей может привести к образованию мелкомасштабных пульсаций тока. Такие пульсации зафиксированы в разряде с водным раствором хлорида натрия в качестве катода [3,4]. В данной работе проведены исследования с целью выявления условий возникновения пульсаций тока. В качестве жидкого электролитного катода использованы водные растворы NaCl, KCl, NaOH, KOH, Na₂SO₄, CuSO₄, MgSO₄ и HCl. Исследования проведены в диапазоне токов 50-100 мА. Анод был выполнен из вольфрамового стержня с диаметром 3 мм. Межэлектродное расстояние менялось в пределах 1-12 мм. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации выходного напряжения сглаживались П-образным ин-

дукционно-емкостным фильтром. Функционирование фильтра проверялось регистрацией осциллограмм напряжения и тока разряда, который был возбужден между металлическими электродами. При этом, в выбранном для исследований диапазоне токов, пульсации отсутствовали.

Номинальное значение тока измерялось стрелочным прибором типа М 2015 класса точности 0,2. Регулирование тока осуществлялось изменением электрического сопротивления балластного резистора. Осциллограммы тока регистрировались цифровым осциллографом АКПП-15/1 (полоса пропускания 25 МГц) при помощи шунта 10 Ом.

На рис. 1 представлены осциллограммы, характерные для разрядов с водными растворами в качестве катода.

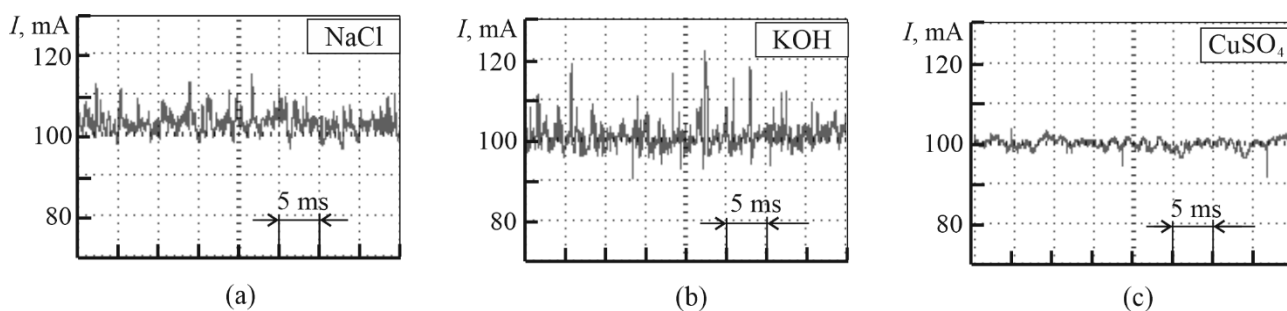


Рис. 1. Осциллограммы тока. Номинальный ток 100 мА. Межэлектродное расстояние 5 мм. Молярная концентрация водного раствора 0,2 моль/л.

Пульсации тока наблюдались при использовании жидких электролитов, в составе которых присутствуют ионы щелочных металлов Na^+ и K^+ (рис. 1а и 1б). В тех случаях, когда такие ионы отсутствовали, пульсации тока были пренебрежительно малы (к примеру, рис. 1с).

При повышении тока амплитуда и частота пульсаций увеличивались. Были установлены и некоторые другие закономерности, связанные с изменением концентрации водного раствора, а также межэлектродного расстояния.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - МК-111.2022.1.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang Z., Kovach Y., Wang Z., Foster J. // Plasma Sources Science and Technology. – 2022. – Vol. 31. – No. 115008.
2. Shirai N., Suga G., Sasaki K. // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – No. 025007.
3. Tazmeev G.K., Timerkaev B.A., Tazmeev K.K. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – Vol. 669. – No. 012057.
4. Tazmeev G.K., Timerkaev B.A., Tazmeev K.K. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1328. – No. 012075.

ВЛИЯНИЕ СЛАБОТОЧНОЙ ДУГИ НА ПОТОК ПЛАЗМЫ ОТ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

INFLUENCE OF THE LOW CURRENT ARC ON THE PLASMA FLOW FROM A DISCHARGE WITH A LIQUID ELECTROLYTE CATHODE

Тазмеев Х.К., Тазмеев Г.Х., Тазмеев А.Х.
Tazmeev K.K., Tazmeev G.K., Tazmeev A.K.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт, Россия, 423810, Набережные Челны, просп. Мира, 68/19
e-mail: tazmeevh@mail.ru*

Представлены результаты скоростной визуализации процессов формирования потока плазмы от разряда с жидким электролитным катодом при воздействии на него слаботочной дуги. Разряд с электролитным катодом и дуга были привязаны на единый металлический анод. Ток дуги менялся в диапазоне 5-10 А, а суммарный ток был в пределах 10-20 А.

The results of high-speed visualization of the processes of formation of a plasma flow from a discharge with a liquid electrolyte cathode when exposed to a low-current arc are presented. The discharge with an electrolyte cathode and the arc were connected to a single metal anode. The arc current varied in the range of 5-10 A, and the total current was in the range of 10-20 A.

Разряды с жидким электролитным катодом представляют интерес как источники объемной плазмы атмосферного давления. Слаботочная дуга в диффузном режиме также горит, образуя объемную плазму. Целью данной работы явилось исследование образования объемной плазмы при совместном горении разряда с жидким электролитным катодом и слаботочной дуги.

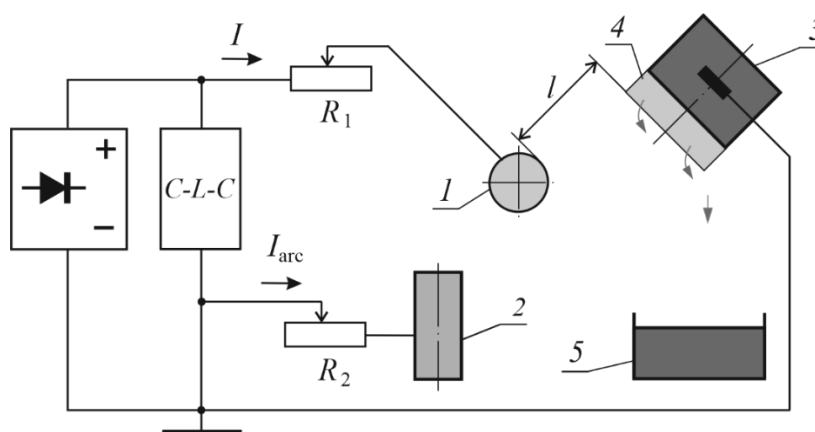


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – анод, 2 – катод металлический, 3 – электролитический узел, 4 – пористая вставка, 5 – емкость для электролита.

На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. Ее разрядный узел содержит три электрода: два катода и анод. Металлические электроды 1 и 2 представляют собой медные стержни диаметром 25 мм. Они выполнены охлаждаемыми водой. Жидкий электролит, служащий катодом, подается через электролитический узел 3 с пористой вставкой 4. Подробное описание этого узла приводится в [1]. В качестве жидкого электролита были использованы водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью 10-15 мСм/см. Стержневой анод 1 устанавливался горизонтально на различных расстояниях l от края пористой вставки 4. Металлический стержневой катод 2 располагался вертикально, занимая различные положения относительно анода 1.

Скоростная визуализация осуществлялась с помощью видеокамеры ВИДИ-ОСКАН-401, которая позволяет регистрировать кадры с минимальной экспозицией 1 мкс. На рис. 2 приведены кадры, относящиеся к одной из комбинаций электродов в пространстве.

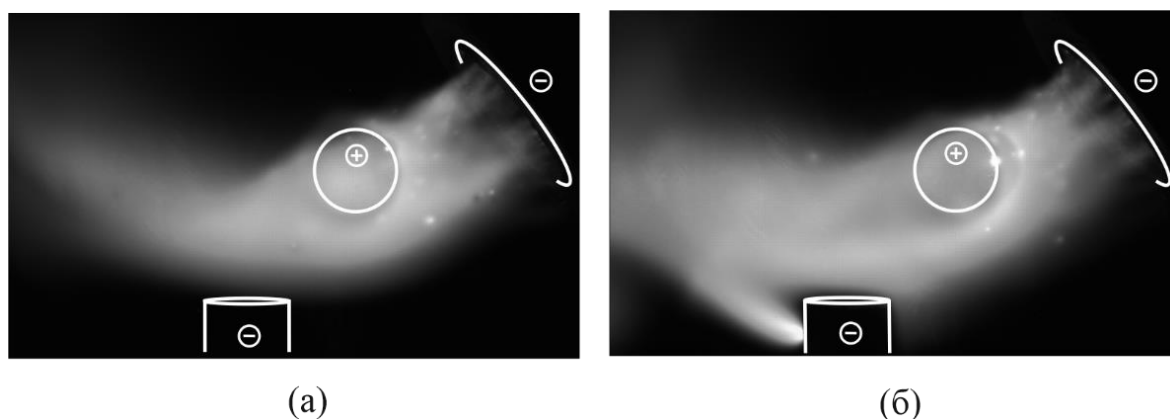


Рис. 2. Мгновенное фото разряда: (а) - между жидким электролитным катодом и металлическим анодом, $I = 12$ А; (б) – между двумя катодами (металлическим и жидким электролитным) и металлическим анодом, $I = 18$ А, $I_{\text{arc}} = 6$ А. $l = 5$ см.

Экспозиция 0,2 мс. Белыми линиями обозначены контуры электродов

В кадре слева (рис. 2а) зарегистрирован разряд с жидким электролитным катодом. В кадре справа (рис. 2б) зафиксирована картина совместного горения разряда с жидким электролитным катодом и дуги. Как видно, дуга способствует существенному удлинению светящейся области в направлении потока плазмы. В опытах установлены различные режимы влияния дуги на поток плазмы.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - МК-111.2022.1.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тазмеев Х.К., Тазмеев Г.Х., Тазмеев А.Х. Патент 2792296 РФ. Б.И. 9 (2023).

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КАНАЛЕ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ ОТ ТОКА РАЗРЯДА

DEPENDENCE OF THE ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE DISCHARGE CHANNEL WITH A LIQUID ELECTROLYTE CATHODE ON THE DISCHARGE CURRENT

Чистолинов А.В., Тюфтяев А.С.
Chistolinov A.V., Tyuftyaev A.S.

*Объединенный институт высоких температур РАН
Российская Федерация 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2
e-mail: a-chi@yandex.ru*

Измерена напряжённость электрического поля в канале разряда с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе в диапазоне токов 20 – 90 мА. Найдены зависимости напряжённости поля от величины разрядного тока для водных растворов с разным составом и с разными значениями рН, но с одной и той же удельной электропроводностью 300 мкСм/см. Показано, что эти зависимости незначительно отличаются друг от друга. Получена усреднённая по составу раствора зависимость напряжённости поля в разряде с жидким катодом от тока разряда.

The electric field strength in the channel of a discharge with a liquid electrolyte cathode at atmospheric pressure in air with the current in range of 20 - 90 mA is measured. The dependences of the electric field strength on the value of the discharge current are found for aqueous solutions with different compositions and with different pH values, but with the same specific conductivity of 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. It is shown that these dependences don't differ by much from each other. The dependence of the electric field strength in a discharge with a liquid cathode on the discharge current, averaged over the composition of the solution, is obtained.

Разряды с жидким катодом имеют перспективы практического применения в новых методах очистки воды, модифицирования высокомолекулярных соединений, стерилизации водных растворов, анализа растворов на содержание металлов, биомедицинских приложениях и многих других [1].

Одним из важнейших параметров электроразрядной плазмы является напряжённость электрического поля в разрядном канале. Определение этого параметра важно, как для построения моделей разряда, так и для практических приложений. Однако, имеющихся в литературе на сегодняшний день данных [2-7] в силу их неполноты и/или недостаточной точности не хватает для определения эмпирической зависимости напряжённости электрического поля от тока разряда. Эта зависимость и была определена в ходе настоящей работы [8].

В ходе выполнения работы использовалась экспериментальная установка, в которой разряд постоянного тока создавался между стержневым металлическим

электродом и поверхностью раствора при атмосферном давлении в воздухе. Использовалась проточная разрядная ячейка. Температура раствора на входе в разрядную ячейку составляла 14 ± 2 °С.

Для проведения экспериментов использовались 3 раствора с электропроводностью 300 мкСм/см (что соответствует электропроводности питьевой воды хорошего качества), но с разными составами и разными значениями рН:

1. Раствор NaNO_3 с рН=5,3.
2. Раствор NaOH с рН=11,3.
3. Раствор HNO_3 с рН=3,6.

Для определения напряжённости электрического поля в разрядном канале для каждого раствора с заданным составом при заданном разрядном токе строилась зависимость падения напряжения на разрядной ячейке от расстояния между электродом и поверхностью раствора. Поскольку эта зависимость с точностью до погрешности измерений совпадает с линейной [2], напряжённость поля в разрядном канале разряда с жидким катодом определяется как тангенс угла наклона этой прямой.

Как показали результаты измерений, напряжённости поля для всех трёх растворов для токов в диапазоне 20-90 мА совпадают с точностью до погрешности определения. Это позволило провести усреднение по всем трём растворам. В результате было получено среднее значение напряжённости поля для разряда с жидким катодом при электропроводности раствора 300 мкСм/см.

Было установлено, что зависимость такой усреднённой напряжённости электрического поля E от разрядного тока I в диапазоне токов 20-90 мА хорошо аппроксимируется следующей квадратичной зависимостью:

$$E = 1140 - 14,5 \cdot I + 0,066 \cdot I^2,$$

где E измеряется в В/см, а I в мА.

Коэффициент достоверности этой аппроксимации составляет 0,9996.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004.
2. Гайсин А.Ф., Сон Э.Е. // ТВТ. – 2005. – Т. 43. – № 5.
3. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A., Degroote J., Malesevic A., Rego R., Vierrendeels J., Leys C. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2008. – Vol. 17. – Is. 2. – No. 025012.
4. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M.G., Vierrendeels J., Leys Ch. // J. Phys. D Appl. Phys. – 2008. – Vol. 41. – No. 215201.
5. Сироткин Н.А., Титов В.А. // Прикладная физика – 2016. – Т. 6. – № 25.
6. Шуаибов А.К., Чучман М.П., Козак Я.Ю. // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – № 41.
7. Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К., Арсланов И.М. // Прикладная физика. – 2016. – Т. 1. – № 72.
8. Чистолинов А.В., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х. // Прикладная физика. – 2021. – Т. 5. – № 5.

СТРАТЫ В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ СТОЛБЕ РАЗРЯДА В ПОТОКЕ КИСЛОРОДА И НАРАБОТКА СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА

STRIATES IN A POSITIVE COLUMN OF A DISCHARGE IN OXYGEN FLOW AND PRODUCTION OF SINGLET OXYGEN

Шепеленко А.А., Курпьев Н.В.
Shepelenko A.A., Kurpyaev N.V.

Физический институт им П.Н. Лебедева РАН Самарский филиал
e-mail: *shepelenko@fian.smr.ru*

Экспериментами определены граничные значения областей параметров, в которых положительный столб (ПС) разряда постоянного тока в потоке кислорода существует в стратифицированной или в однородной форме. Измерены концентрации синглетного дельта кислорода (СК) в потоковом послесвечении разряда, показывающие насколько изменяется эффективность наработки СК разрядом при изменении формы ПС.

Experiments have determined the boundary values of the parameter regions in which the positive column (PC) of a direct current discharge in an oxygen flow exists in a stratified or homogeneous form. The concentrations of singlet delta oxygen (SO) in the flow afterglow of the discharge were measured, showing how much the efficiency of the generation of SO by the discharge changes with a change in the PC form.

ПС разряда в кислороде, как известно, может существовать не только в однородной форме, но и в форме со стратами, стоячими или «бегущими». Границы диапазонов существования этих форм в пространстве параметров определялись в давних работах [1–3], но до давлений 0.75 Тор и ниже. Теория пока не даёт возможности расчетами предсказывать границы областей существования страт даже для наиболее изученных разрядов в инертных газах.

Для задачи получения синглетного дельта кислорода (СК) Т-форма ПС со стратами, как низкоградиентная, могла бы оказаться эффективнее однородной. Но при стратах часть объема на длине каждой страты занимает область с повышенной напряженностью поля. Эффективность наработки СК всем объемом разряда при ПС со стратами неизвестна. Присутствие в разряде страт рассматривалось в работе [4] как возможный механизм снижения концентрации СК в несамостоятельном разряде, делались оценки вероятного влияния страт, но данных о границах областей существования страт не представлено.

В данной работе для самостоятельного разряда постоянного тока в потоке кислорода экспериментами определялись границы областей существования однородного и стратифицированного ПС по значениям основных параметров – давлению P и току разряда I . Кроме того, измерениями концентрации СК показано как разряды с этими формами ПС различаются по наработке СК.

Исследовался DC разряд в потоке кислорода при $P = 0.5 - 4$ Тор в трубке из кварца диаметром ~ 1 см; межэлектродное расстояние 10 см. В трубке создавалось закрученное течение газа со скоростью вдоль оси трубки до ~ 120 м/с. С целью выявления бегущих страт регистрировалась интенсивность излучения

плазмы из малого объёма в виде тонкого диска, вырезаемого щелевой диафрагмой. Излучение по оптоволокну подавалось на ФЭУ. Концентрация СК измерялась по мощности излучения в спектральной полосе 1,27 мкм. До участка диагностики газ протекал за время ~ 1 мс.

Эксперименты показали, что тлеющий разряд в потоке кислорода при P от 2 до 4 Тор при всех токах устойчивого горения существует с однородной формой ПС – без страт. Разряд в форме со стоячими или медленно движущимися стратами может гореть при P ниже ≈ 2 Тор. Но для существования страт в дополнение к P необходимо выполнение и второго условия – ток разряда I должен быть относительно небольшим. Например, от ≈ 100 мА и менее при $P = 1$ Тор, скорости течения газа 110 м/с. Было обнаружено, что стоячие страты могут занимать всю длину ПС или её часть, в зависимости от I . Была также обнаружена форма ПС с хорошо видимыми визуально, медленно движущимися стратами. Их движение весьма необычное – они раздвигаются, увеличивая длину каждой страты, затем сдвигаются, уменьшая эту длину, подобно мехам «гармошки». Скорость движения ~ 5 см/с, то есть на 3 порядка ниже типичной для бегущих страт. Такая форма ПС реализуется при малых токах, от ≈ 45 мА и менее ($P \approx 1$ Тор), она практически не изменяется при варьировании скорости потока газа.

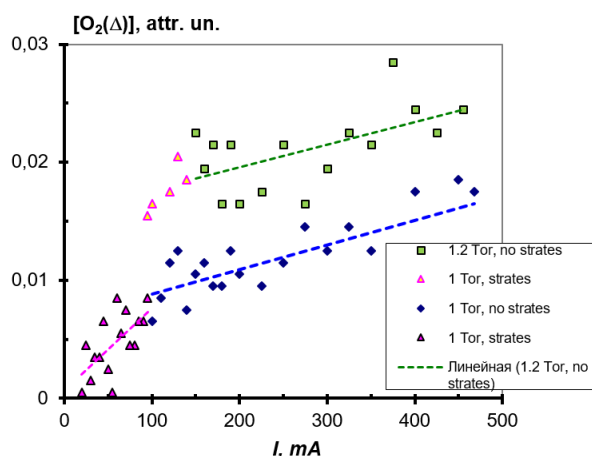


Рис.1. Измеренные концентрации СК в зависимости от тока разряда.

Как видим, концентрация СК увеличивается с ростом тока быстрее при малых I , менее 100 мА ($P = 1$ Тор), чем при больших. Это, вероятно, обусловлено появлением при $I \approx 50$ мА участка ПС без страт. Длина участка без страт увеличивается с ростом тока, и при $I = 110$ мА он занимает всю длину. Концентрация СК возрастает при I до 110 мА в ≈ 3 раза быстрее, чем в диапазоне 110 – 470 мА, где нет эффекта, вызванного увеличением длины участка без страт. При $I \geq 110$ мА проявляется только влияние увеличения тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seeliger R. // Naturforchsh. – 1953. – Vol. 8a. – No. 74.
2. Pekarek L., Sicha M. // Czech. J. Phys. – 1960. – Vol. B10. – No. 749.
3. Sabadil H. // Beitr. Plasmaphys. – 1966. – Vol. 6. – No. 305.
4. Vasiljeva A.N., Klopovskiy K.S. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2004. – Vol. 37. – No. 2455.

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫЕ РАЗРЯДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ ВНУТРИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРУБКИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

ELECTROLYTE-PLASMA D.C. DISCHARGES IN GAS-LIQUID MEDIUM INSIDE DIELECTRIC TUBE AT LOW PRESSURE

Бельгибаев Э.Р.¹, Багаутдинова Л.Н.¹, Гайсин Ф.М.¹, Гайсин Аз.Ф.²
Валиев Р.И.³, Хафизов А.А.³
Belgibaev E.R.¹, Bagautdinova L.N.¹, Gaysin F.M.¹, Gaisin Az.F.²
Valiev R.I.³, Khafizov A.A.³

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н.Туполева-КАИ, Россия, 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10

²Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008,
Казань, ул. Кремлёвская, 18
email: lilup@bk.ru

Исследованы вольт-амперные, вольт-секундные и ампер-секундные характеристики электролитно-плазменного разряда в трубке с 5% и 10% раствором хлорида натрия при понижении давления от 40 до 400 торр. Проведен анализ механизма пробоя и электролиза при различных параметрах разряда.

The volt-ampere, volt-second and ampere-second characteristics of an electrolytic-plasma discharge in a tube with 5% and 10% sodium chloride solution are studied at a pressure decrease from 40 to 400 Torr. The mechanism of breakdown and electrolysis was analyzed for various discharge parameters.

Исследования электролитно-плазменных разрядов в газожидкостной среде имеет большой теоретический и практический интерес. На сегодняшний день имеются некоторые работы, посвященные этой теме [1-5]. В данной работе проведены экспериментальные исследования электрических характеристик электролитно-плазменного разряда.

Сравнение данных (рис. 1) при данной концентрации электролита показывает, что в 5%-ом растворе NaCl в воде с повышением давления от 40 до 400 торр наблюдаются следующие особенности: с ростом межэлектродного расстояния от 50 до 150 мм характер вольт-амперной зависимости меняется от возрастающего до горизонтального. Указанные особенности характерны и для вольт-секундной и ампер-секундной характеристик.

Сравнительный анализ данных для 10% раствора NaCl в воде показал, что с ростом межэлектродного расстояния до 150 мм развитие электролитно-плазмен-

ного разряда существенно зависит от давления. После включения источника питания идет процесс электролиза и величина тока увеличивается от 0 до 1А, а напряжение от 100 до 300В. После достижения тока электролиза в 1А происходит пробой и зажигается электролитно-плазменный разряд. Причем при 40 торрах разряд стабильно горит при высоких напряжениях в диапазоне от 300 до 970В, при 100 торах разряд горит с уменьшением напряжения разряда от 900 до 300В. С увеличением давления от 200 до 400 торр разряд горит нестабильно со скачкообразно меняющимся напряжением от 300 до 900В. При этом с увеличением давления от 40 до 400 торр отмечаются большие скачки тока: так если в диапазоне давления от 40-90 торр скачки тока от 0 до 1.2 А, то при давлении 90-400 торр скачки тока от 0 до 3 А.

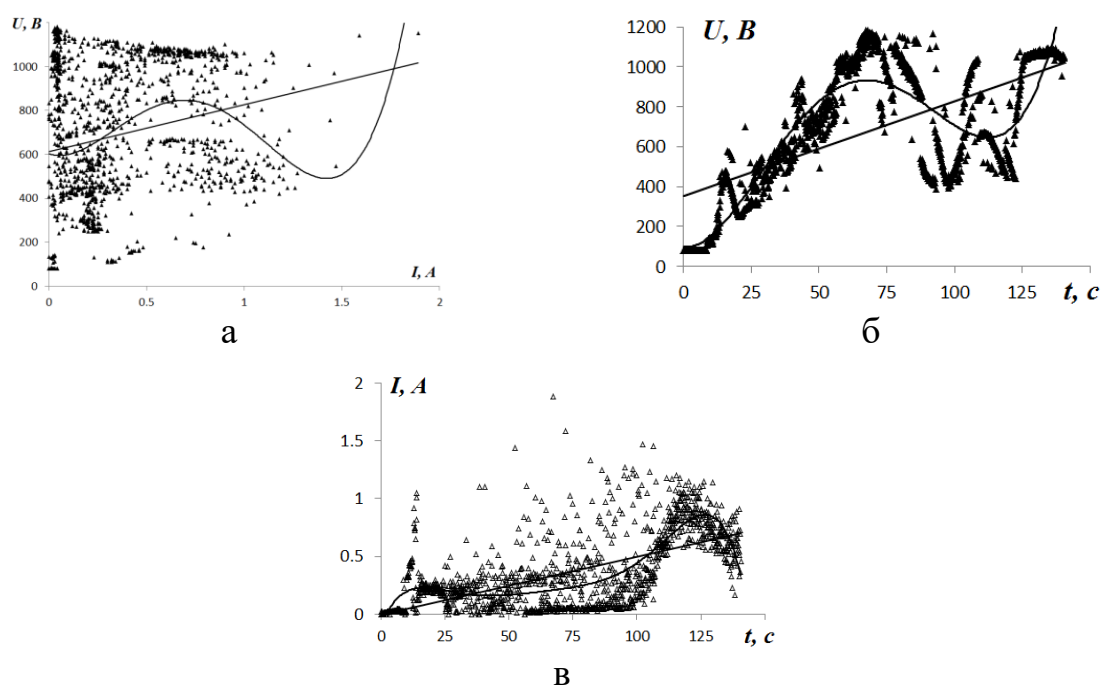


Рис.1. Вольт-амперная (а), вольт-секундная (б), ампер-секундная (в) характеристика разряда постоянного тока в 5% растворе хлорида натрия при межэлектродном расстоянии $l=50$ мм и давлениях от 40 до 400 торр

ЛИТЕРАТУРА

1. Akhatov M.F., Galimova R.K., Mardanov R.R., Nizameev A.A., Loginov N.A. // Journal of Physics: Conf. Series. – 2022. – Vol. 2270. – No. 012004.
2. Akhatov M.F., Kayumov R.R., Mardanov R.R., Saifutdinova I.I. // Journal of Physics: Conf. Series “XI Scientific Technical Conf. on Low Temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings”. – 2020. – Vol. 1588. – No. 012004.
3. Tsareva A.M., Makaeva R.K., Safina D.M., Galimova R.K. // Russian Aeronautics. – 2020. – Vol. 63. – Is. 2. – P. 362–365.
4. Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин А.Ф., Басыров Р.Ш., Кашанов Н.Ф. // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – Вып. 5. – С. 20–32.
5. Купутдинова А.И., Ахмадуллина Л.И., Гайсин А.Ф., Закиров Д.У. // Вестник КГТУ имени А.Н. Туполева. – 2020. – Т. 76. – Вып. 1. – С. 10–15.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF AC IN AN ELECTROLYTE MEDIUM AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Валиев Р.И.¹, Хафизов А.А.¹, Багаутдинова Л.Н.², Гайсин Ф.М.²,
Фахрутдинова И.Т.², Гайсин Аз.Ф.³
Valiev R.I.¹, Khafizov A.A.¹, Bagautdinova L.N.², Gaysin F.M.²,
Fakhrutdinova I.T.², Gaisin Az.F.³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008,
Казань, ул. Кремлёвская, 18

²Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н.Туполева-КАИ, Россия, 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10

²Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
LNBagautdinova@kai.ru

Исследованы вольт-амперные, вольт-секундные и ампер-секундные характеристики электролитно-плазменного разряда в трубке с 1% раствором хлорида натрия при атмосферном давлении. Проведен анализ механизма пробоя, электролиза и развития разряда при различных параметрах.

The volt-ampere, volt-second, and ampere-second characteristics of an electrolytic-plasma discharge in a tube with a 1% sodium chloride solution under atmospheric distribution have been studied. The mechanism of breakdown, electrolysis, and development of the discharge was analyzed for various parameters.

Низкотемпературная плазма электрического разряда с электролитическими электродами привлекает все больше внимания исследователей в связи с расширенной сферой применения [1-6]. В данной работе представлены экспериментальные исследования электрических характеристик разряда переменного тока в электролитно-газовой среде при атмосферном давлении в диапазоне параметров: концентрация электролита хлорида натрия в дистиллированной воде от 1 до 10%, межэлектродное расстояние $l=150$ мм. На основе анализа экспериментальных данных установлена картина развития электрического разряда переменного тока в электролитной среде с пузырьками газов.

Рассмотрим особенности разряда переменного тока в газожидкостной среде при атмосферном давлении. На рис.1 представлены электрические характеристики процесса разряда, которые позволяют представить полную картину развития электрического разряда переменного тока. Как видно из рис. 1 после включения источника питания (точка 1: $I=0.08$ А, $U=100$ В) начинается электролиз, который продолжается в течение 17 секунд (до точки 2: $I=0.32$ А, $U=358$ В). В точке 3 ($I=0.015$ А, $U=497$ В) происходит резкое увеличение напряжения и уменьшение

силы тока и начинает гореть разряд. Во время горения разряда до 130 секунды (точка 4) колебания силы тока составляют от 0.01А до 0.56А, а колебания напряжения от 270В до 523В.

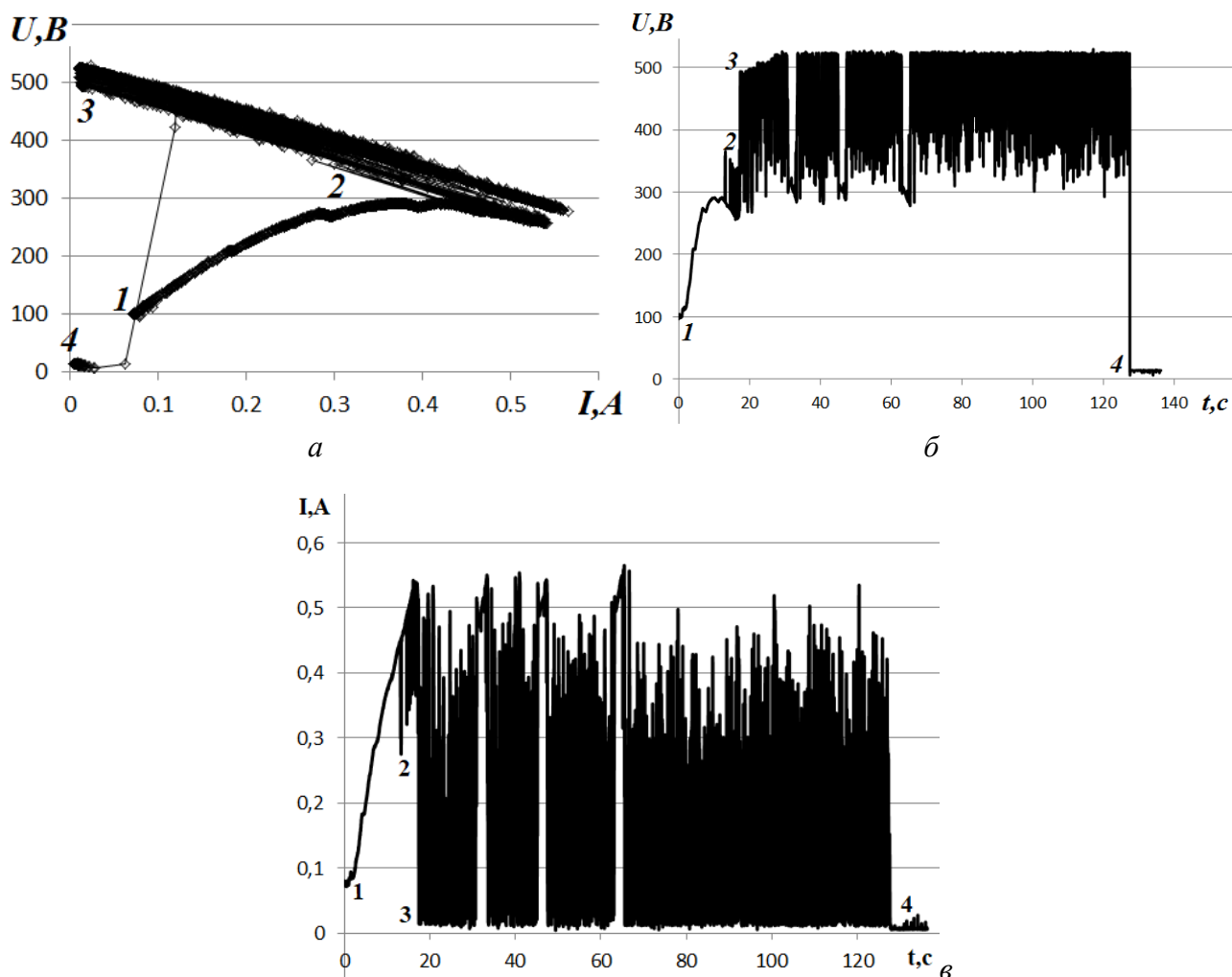


Рис.1. Вольт-амперная (а), вольт-секундная (б), ампер-секундная (в) характеристика разряда переменного тока в 1% растворе хлорида натрия при межэлектродном расстоянии $l=150$ мм и атмосферном давлении

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – С. 71–78.
2. Tsareva A.M., Makaeva R.K., Safina D.M., Galimova R.K. // Russian Aeronautics. – 2020. – Vol. 63. – Is. 2. – P. 362–365.
3. Akhatov M.F., Kayumov R.R., Mardanov R.R., Saifutdinova I.I., Khazeev K.I. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1. – No. 012024.
4. Mardanov R.R., Kayumov R.R., Akhatov M.F., Gazizova A.I., Gaisin A.F. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol.11. – No. 012028.
5. Shaidullin A.I., Kuputdinova A.I., Akhmadullina L.I., Gaysin Al.F., Gaysin F.M., Gaysin Az.F. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 11. – No. 012011.
6. Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин Ал.Ф., Басыров Р.Ш., Каханов Н.Ф. // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – С. 20–32.

ПОЛИРОВКА И УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО МЕТОДА

POLISHING AND HARDENING OF TITANIUM ALLOYS USING THE ELECTROLYTE-PLASMA METHOD

Гашигуллин К.А, Мастюков К.Ш, Сухих М.Е, Исмагилов Д.М, Гайсин Ал.Ф.,
Желтухин В.С.

Gashigullin K.A, Mastyukov K.Sh, Sukhikh M.E, Ismagilov D.M, Gaisin Al.F,
Zheltukhin V.S.

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия
kamil.gashigullin@yandex.ru*

Исследованы процессы полировки и упрочнения изделий из титановых сплавов с помощью разряда с жидкими электродами. Установлено, что показатели прочности медицинских инструментов увеличиваются на 20 – 30%, срок службы увеличивается в 1.5 – 2 раза.

The processes of polishing and hardening of products from titanium alloys by discharge with liquid electrodes is studied. It is established that the strength characteristics of medical instruments are increased by 20 - 30%, the service life is increased by 1.5 - 2 times.

На сегодняшний момент титановые сплавы играют важную роль в высокотехнологичных видах машиностроения и приборостроения. Они применяются в авиации, космической технике, судостроении и специальном приборостроении. Для их обработки применяются механические, лазерные и другие физические методы воздействия. В качестве нового метода обработки, позволяющего качественно обрабатывать детали сложной геометрии, появился метод электролитно-плазменной обработки.

При разработке конструкции и технологии изготовления современной техники вследствие необходимости снижения массы, повышения удельных нагрузок все чаще встает проблема усталостного разрушения деталей. Наиболее часто усталостное разрушение деталей начинается с поверхности, поэтому один из путей повышения усталостной прочности - специальная обработка поверхности.

Одним из эффективных упрочнения конструкционных материалов является электролитно-плазменная обработка [1].

Исследования влияния плазменной обработки различных деталей в разряде с жидким катодом на их усталостную прочность показали, что предел выносливости зависит от начальной и конечной шероховатости, и от остаточных напряжений в поверхностном слое, температуры детали в процессе обработки, способа охлаждения и состава плазмообразующего газа. Установлено, что с помощью можно достичь максимального повышения предела выносливости (на 20%. В

процессе обработки контролировалась температура детали с помощью термопар, прижатых с обратной стороны детали к поверхности.

Плазменному упрочнению подвергались коробчатые замки зажимов медицинских инструментов, ультразвуковые хирургические и стоматологические инструменты. [2]

Режимы упрочнения зависят от материала, размеров и формы деталей. Так, коробчатые замки медицинских зажимов упрочняются при $q = 7,8 \cdot 10^3$ Вт/м², $l = 2$ мм, $\tau = 40$ мин, $T = 250^\circ\text{C}$. Для ультразвуковых хирургических инструментов из сплава ВТ8 режим упрочнения следующий: $q = 8,5 \cdot 10^3$ Вт/м², $l = 1,5$ мм, $\tau = 40$ мин, $T = 350^\circ\text{C}$. Для ультразвуковых стоматологических инструментов из сплава ВТ14: $q = 8,5 \cdot 10^3$ Вт/м², $l = 1,5$ мм, $\tau = 40$ мин, $T = 350^\circ\text{C}$. При этом, в результате осуществления перечисленных режимов упрочнения шероховатость поверхности Ra снижается с 7 класса до 8 класса.

Усталостная прочность коробчатого замка зажимов в результате плазменного упрочнения повышается на 20%, ультразвуковых хирургических инструментов - на 30%, ультразвуковых стоматологических инструментов - на 30%.

За счет повышения выносливости деталей на 20% их служба возросла в 1,5-2 раза, снизилась шероховатость поверхности, улучшился внешний вид, повысилась коррозионная стойкость.

Таким образом, электролитно-плазменная обработка титановых сплавов является эффективным методом их упрочнения и полировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахатов М.Ф. Плазменно-электролитный метод обработки материалов. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2018.
2. Гайсин А.Ф. // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – № 71.

Секция 3

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕ

Секция 4

НЕРАВНОВЕСНАЯ ПЛАЗМА, КИНЕ- ТИКА ПЛАЗМЫ, УБЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОНЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИОНОВ АЗОТА, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ДИОДОМ С ПАССИВНЫМ АНОДОМ

INVESTIGATION OF THE CHARGE EXCHANGE OF NITROGEN IONS, GENERATED BY A DIODE WITH PASSIVE ANODE

Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Полисадов С.С.
Pushkarev A.I., Egorova Y.I., Polisadov S.S.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
e-mail: aipush@mail.ru*

Представлены результаты моделирования генерации быстрых атомов в вакуумном ионном диоде с пассивным анодом (250-300 кэВ, 150 нс). Выполнен анализ различных механизмов генерации быстрых атомов – рекомбинация ускоренных ионов, перезарядка ионов на молекулах остаточного газа и др. Получено, что перезарядка в основном происходит на молекулах, десорбируемых с поверхности сетки, установленной в области транспортировки ионов.

The results of modeling the generation of fast atoms in a vacuum ion diode with a passive anode (250-300 keV, 150 ns) are presented. The analysis of various mechanisms of generation of fast atoms is carried out – recombination of accelerated ions, charge exchange on residual gas molecules, etc. It is found that the charge exchange mainly occurs on the molecules of residual gas desorbed from the surface of the grid installed in the ion transport region.

Представлены результаты моделирования генерации быстрых атомов в вакуумном ионном диоде с пассивным анодом при работе в режиме магнитной самоизоляции электронов (250-300 кВ, 150 нс). Моделирование выполнено для вакуумного ионного диода с металлическим анодом при работе в двухимпульсном режиме и формировании анодной плазмы при взрывной эмиссии электронов в течение первого импульса [1]. Для повышения эффективности перезарядки ионов использовали сетку в области транспортировки ионного пучка от диода до мишени. Давление остаточного газа в диодной камере составляло ≈ 3 мТорр [2].

Выполнен анализ различных механизмов генерации быстрых атомов – перезарядка ионов на десорбированных молекулах в анод-катодном зазоре диода [3]; рекомбинация ионов с электронами, которые обеспечивают зарядовую нейтрализацию ионного пучка; перезарядка ионов на молекулах остаточного газа при транспортировке ионов от диода до мишени; перезарядка ионов на молекулах, десорбированных с сетки, установленной на пути дрейфа ионов от диода до мишени.

В таблице представлены результаты расчета длины пути иона, необходимой для его перезарядки. Расчет выполнен по соотношению $\lambda=1/(n_0 \cdot \sigma)$, где n_0 – концентрация молекул в области движения ионов, σ – сечение перезарядки иона.

Таблица 1. Расчет длины пути перезарядки иона

Реакция	Энергия иона, кэВ	$\sigma, 10^{-16} \text{ см}^2$	$\lambda, \text{ см}$		
			$n_0=10^{12} \text{ см}^{-3}$	$n_0=10^{17} \text{ см}^{-3}$	
$\text{N}^{2+} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}^+$	490	3.7	$1.9 \cdot 10^3$	0.027	[4]
$\text{N}^{3+} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}^+$	490	1.3	$5.5 \cdot 10^3$	0.08	[5]
$\text{N}^{2+} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}^0$	490	0.31	$2.3 \cdot 10^4$	0.3	[5]
$\text{N}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}^0$	200-300	5.5-9.0	$\approx 10^3$	0.01-0.02	[6]
$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}^0$	210-300	5.6-7.0	$\approx 10^3$	0.01-0.02	[6]

Скорость расширения десорбированных молекул составляет $\approx 0.17 \text{ см/мкс}$ [7], поэтому при длительности импульса 100 нс толщина газовой оболочки, прилегающей к сетке, не превышает 0.2 мм, а концентрация газа $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Основным механизмом, обеспечивающим снижение кратности ионизации ионов при использовании металлической сетки в области транспортировки МИП, является перезарядка на молекулах остаточного газа, десорбируемого с поверхности сетки. При работе ионного диода в двухимпульсном режиме десорбция молекул происходит не только в течение генерации ионного пучка, но и в течение первого импульса, что обеспечивает высокую эффективность процесса перезарядки. Рекомбинация ионов и низкоэнергетичных электронов в области дрейфа ионного пучка дает незначительный вклад в перезарядку и снижение кратности ионизации ионов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00016, <https://rscf.ru/project/23-29-00016>

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu X.P., Zhang Z.C., Pushkarev A.I., Lei M.K. // Phys. Plasmas. – 2016. – Vol. 23. – No. 013112.
2. Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Прима А.И., Корусенко П.М., Несов С.Н. Генерация, диагностика и применение мощных ионных пучков с высокой плотностью энергии. – Новосибирск: СибАК, 2019.
3. Pointon T.D. // J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 66. – No. 2879.
4. Nikolaev V.S., Dmitriev I.S., Fateyeva L.N., Teplova Ya.A. // J. Exp. and Theoretical Physics. – 1961. – Vol. 40. – No. 989.
5. Nikolaev V.S., Fateyeva L.N., Dmitriev I.S., Teplova Ya.A. // J. Exp. and Theoretical Physics. – 1961. – Vol. 41. – No. 89.
6. Lo H.H., Fite W.L. // At. Data. – 1970. – Vol. 1. – No. 305.
7. Пушкарев А.И., Полисадов С.С. // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 79.

ДИАГНОСТИКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСП-ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССЕ ВОДОРОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ SiF₄

DIAGNOSIS OF THE PHYSICAL PARAMETERS OF ICP PLASMA IN THE PROCESS OF HYDROGEN REDUCTION OF SiF₄

Корнев Р.А.¹, Назаров В.В.²

Kornev R.A.¹, Nazarov V.V.²

¹*ИХВВ им. Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород,
ул. Тропинина, 49*

²*ИПФ РАН, Россия, 603951, Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
e-mail: romanakornev@gmail.com*

Зондовая диагностика использовалась для определения электронной температуры и плотности электронов в ИСП при давлении 3 Торр, зажигаемой в смесях SiF₄, Ar и H₂. Исследованы эмиссионные спектры смесей с различной стехиометрией компонентов. Показано, что добавка аргона приводит к снижению температуры электронов и увеличению их концентрации, а также степени диссоциации водорода. Это позволяет повысить степень конверсии SiF₄ в кремний до 85% при незначительном количестве SiHF₃.

Probe diagnostics is used to determine the electron temperature and electron number density in a low, 3 Torr pressure ICP ignited in a mixtures of SiF₄, Ar and H₂. Emission spectra of mixtures with different stoichiometry of components are investigated. It is shown that the addition of argon leads to a decrease in the electron temperature and an increase in their concentration, as well as in the degree of hydrogen dissociation. This makes it possible to increase the degree of conversion of SiF₄ to silicon up to 85% with a small amount of SiHF₃.

Интенсификации процессов в низкотемпературной плазме может способствовать добавление в смесь инертных газов (Ar, He), электронное строение атомов которых таково, что в плазме генерируются дополнительные высокоэнергетичные электроны. В работах [1, 2] отмечалась положительная роль избытка аргона в смесях SiH₄ + H₂ + Ar и SiF₄ + H₂ + Ar, а в [3] для SiF₄ + H₂ + He для увеличения скорости осаждения пленок кремния и увеличения степени их кристалличности. Целью данной работы было исследование влияния аргона на механизм водородного восстановления SiF₄ и выход кремния.

Физические параметры плазмы (T_e и N_e), поддерживаемой ВЧИ разрядом при общем давлении 3 Торр в смесях H₂ + SiF₄, Ar + SiF₄ и Ar + H₂ + SiF₄ определялись методом двойного зонда Лэнгмюра. Предварительно T_e и N_e были определены для чистых компонентов и составляли для Ar – 4 эВ; 2·10¹² см⁻³, для H₂ – 10 эВ; 4·10⁸ см⁻³ и для SiF₄ – 8 эВ; 2·10⁹ см⁻³ соответственно. Добавление водорода к SiF₄ приводит к уменьшению T_e до 9,1 эВ и увеличению N_e относительно H₂. Для трехкомпонентных смесей, в которых меняется концентрация водорода

или аргона, температура электронов составляет $7,5 - 7,7$ эВ, а величина $N_e - 10^{11}$ см⁻³.

С целью определения наиболее вероятных промежуточных реакций процесса водородного восстановления SiF₄ методом эмиссионной спектроскопии исследовали состав основных промежуточных частиц в различных экспериментальных условиях. Эмиссионный спектр смеси H₂ + SiF₄ кроме полос радикалов SiF и SiF₂, а так же молекулярного водорода характеризуется линиями атомарного водорода и кремния.

При добавлении аргона полосы молекулярного водорода (α -серия Флухера) в эмиссионных спектрах исчезают, т.е. наблюдается его 100% диссоциация. Кроме того, возрастают интенсивности полосы радикала SiF и линии атома Si, а также появляется полоса радикала SiF₂. В связи с этим, можно полагать, что увеличение концентрации аргона в процессе водородного восстановления SiF₄ сопровождается дополнительным поступлением в область протекания химической реакции свободных электронов плазмы, которые интенсифицируют процессы диссоциации как водорода, так и SiF₄, что приводит к увеличению степени конверсии последнего.

Общая степень конверсии SiF₄ для тройных смесей существенно возрастает и составляет 79 – 90%. При этом осаждение поликристаллического кремния на внутренней поверхности реактора происходит значительно интенсивнее по сравнению со смесью H₂+SiF₄.

Работа выполнена при поддержке государственного задания министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0095-2019-0008.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cicala G., Losurdo M., Capezzuto P., Bruno G. // Plasma Sources Sci.Technol. – 1992. – Vol. 1. – No. 156.
2. Kampas F.J. // Journal of Applied Physics. – 1983. – Vol. 54. – No. 2276.
3. Cicala G., Capezzuto P., Bruno G. // Thin Solid Films. – 2001. – Vol. 383. – No. 203.

ОСОБЕННОСТИ УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВОМ ДИОДЕ С КОНИЧЕСКИМ КАТОДОМ

FEATURES OF ELECTRON RUNAWAY IN A GAS DIODE WITH A CONICAL CATHODE

Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И.
Zubarev N.M., Zubareva O.V., Yalandin M.I.

Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016
e-mail: nick@iep.uran.ru

Исследуются условия и динамика убегания электронов в воздушном промежутке с неоднородным распределением электрического поля, обусловленным использованием конического катода. Выявлены существенные отличия в поведении убегающих электронов при углах конуса больших и меньших порогового значения в 98.6 градусов. Для слабо-неоднородного распределения поля (запороговые углы) быстрые электроны непрерывно ускоряются во всем промежутке. В сильно-неоднородном поле (допороговые углы) электроны ускоряются лишь в прикатодной области, а в прианодной области начинают тормозиться, тем не менее, достигая анода с высокими энергиями. Такое различие приводит к необходимости использования различных критериев убегания.

The conditions and dynamics of electron runaway in an air gap with an inhomogeneous distribution of the electric field due to the use of a conical cathode are studied. Significant differences were revealed in the behavior of runaway electrons at cone angles greater than and less than the threshold value of 98.6 degrees. For a weakly inhomogeneous field distribution (above-threshold angles), fast electrons are continuously accelerated throughout the gap. In a strongly inhomogeneous field (sub-threshold angles), electrons are accelerated only in the near-cathode region, and, in the near-anode region, they begin to slow down, nevertheless, reaching the anode with high energies. This difference leads to the need to use different runaway criteria.

Под убегающими электронами (УЭ) традиционно понимают свободные электроны в газе или плазме, которые теряют в столкновениях с частицами среды меньше энергии, чем получают под действием приложенного электрического поля [1]. Как следствие, они непрерывно ускоряются, достигая высоких, вплоть до релятивистских, энергий [2].

В настоящей работе анализируются особенности убегания электронов в неоднородном электрическом поле, обусловленном использованием конического катода (см., например, эксперименты [3–5]). Считается, что поле спадает с удалением от катода по степенному закону $E \sim z^{-\beta}$, где показатель β относится к диапазону $0 < \beta < 1$ (его значение зависит от угла раствора конуса). Сравнивались два различных критерия убегания. Первый критерий предполагает непрерывное ускорение электрона во всем межэлектродном промежутке. Второй – достижение анода быстрым электроном без требования его непрерывного ускорения, т.е. допускалось его торможение в отдельных областях газового промежутка. По

итогах анализа диапазон допустимых значений показателя β разделен на две части, $0 < \beta < 0.5$ и $0.5 < \beta < 1$, соответствующие случаям слабо- и сильно-неоднородных распределений поля. Для слабо-неоднородного поля (конические катоды с углами раствора, превышающими порог в 98.6 градусов) динамика электронов в целом аналогична ее динамике в однородном поле ($\beta = 0$), а использование различных критериев убегания не приводит к отличиям в пороговых значениях приложенного к промежутку напряжения. Эффекты, приведшие к необходимости уточнения критерия убегания, возникают в условиях сильно-неоднородного поля (конические катоды с допороговыми углами раствора). Здесь для разных критериев наблюдаются существенные, до 2.4 раз, различия в пороговых для убегания значениях напряжения.

Выявленные особенности поведения УЭ в сильно-неоднородном поле могут иметь важные последствия для развития пробоя газового промежутка. УЭ, пересекая промежуток со скоростями, сопоставимыми со скоростью света, осуществляют предварительную ионизацию газа, определяя тем самым динамику последующего пробоя [3,6]. Поскольку сечение ионизации падает с ростом кинетической энергии быстрого электрона, то в режиме непрерывного ускорения электрон в основном ионизует газ в прикатодной области. В случае торможения электрона в прианодной области, здесь также интенсифицируются ионизационные процессы. В результате можно ожидать формирования не только прикатодной, но и прианодной плазменных областей, и, как следствие, изменения картины развития субнаносекундного пробоя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00053).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. – 1990. – Т. 160. – № 49.
2. Гуревич А.В., Зыбин К.П. // УФН. – 2001. – Т. 171. – № 1177.
3. Mesyats G.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M., Sadykova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Zubareva O.V., Kozyrev A.V., Semeniuk N.S. // Appl. Phys. Lett. – 2020. – Vol. 116. – No. 063501.
4. Mesyats G.A., Osipenko E.A., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M. // IEEE Electron Device Letters. – 2022. – Vol. 43. – No. 627.
5. Mesyats G.A., Pedos M.S., Rukin S.N., Rostov V.V., Romanchenko I.V., Sadykova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ul'masculov M.R., Yalandin M.I. // Appl. Phys. Lett. – 2018. – Vol. 112. – No. 163501.
6. Zubarev N.M., Kozhevnikov V.Y., Kozyrev A.V., Mesyats G.A., Semeniuk N.S., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Yalandin M.I. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2020. – Vol. 29. – No. 125008.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПЛАЗМЫ В КОАКСИАЛЬНОМ ВАКУУМНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

KINETIC SIMULATION OF RADIAL PLASMA EXPANSION IN A COAXIAL VACUUM GAP

Кожевников В.Ю.¹, Козырев А.В.¹, Коковин А.О.¹, Семенюк Н.С.¹
Kozhevnikov V.Y.¹, Kozyrev A.V.¹, Kokovin A.O.¹, Semeniuk N.S.¹

¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3
e-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru*

В докладе теоретически продемонстрирован бесстолкновительный механизм расширения двухкомпонентной (электроны и один сорт ионов) плазмы в цилиндрической геометрии вакуумного промежутка, к которому приложено электрическое напряжение. Показана пространственно-временная кинетика заряженных частиц и электрического поля, обеспечивающая скорость продвижения границы плазмы на уровне 10^6 см/с.

The report theoretically demonstrates a collisionless expansion mechanism for a two-component (electrons and one kind of ion) plasma in a cylindrical geometry of a vacuum gap to which an electric voltage is applied. The spatial-temporal kinetics of charged particles and the electric field is shown; one ensures the speed of the plasma edge at the level of 10^6 cm/s.

Пробой вакуумного промежутка широко исследуется и используется в технических устройствах с уникальными характеристиками [1, 2]. Возбуждение вакуумного пробоя плазмой происходит за счёт взрывов микроскопических неровностей катода, после чего плазма катодного факела расширяется в межэлектродный промежуток. Одной из ключевых проблем вакуумной электроники является этот процесс движения плазмы в промежутке, для которого характерны «сверхтепловые» скорости расширения прикатодной плазмы и «аномальный» перенос ионов на анод в вакуумном разряде [3-5]. Скорость расширения плазмы, зарегистрированная в вакуумных разрядах, составляет $1-4 \cdot 10^6$ см/с [6], что соответствует энергии ионов в десятки-сотни эВ [7-9]. Такие энергии ионов могут значительно превосходить напряжение горения дуги, которое формируется после перемыкания плазмой промежутка, и поэтому ионы иногда называют «аномальными». В этой работе мы исследуем механизм расширения бесстолкновительной двухкомпонентной плазмы в вакуумном цилиндрическом промежутке.

Эволюция плазмы, состоящей из электронов и однократно заряженных ионов меди, в вакуумном цилиндрическом зазоре описывается уравнениями Власова для каждой компоненты, они дополняются уравнением Пуассона и уравнением Кирхгофа для внешней цепи. На катоде поддерживается концентрация плазмы на уровне 10^{14} см⁻³, напряжение на аноде 2 кВ.

В первые наносекунды электроны двигаются к аноду, генерируя ток в цепи и формируя область пониженного потенциала (виртуальный катод). Отрицатель-

ный потенциал является ускоряющим для ионов, поэтому ионы набирают кинетическую энергию и продвигают сечение виртуального катода в сторону анода. Скорость движения границы плазмы превышает скорость продвижения минимума потенциальной ямы, и этого оказывается достаточно для длительного ускорения ионов вблизи границы плазмы. Таким образом, ускорение ионной компоненты плазмы к аноду связано с формированием и движением потенциальной ямы, а энергия ионов в промежутке достигает 60 эВ.

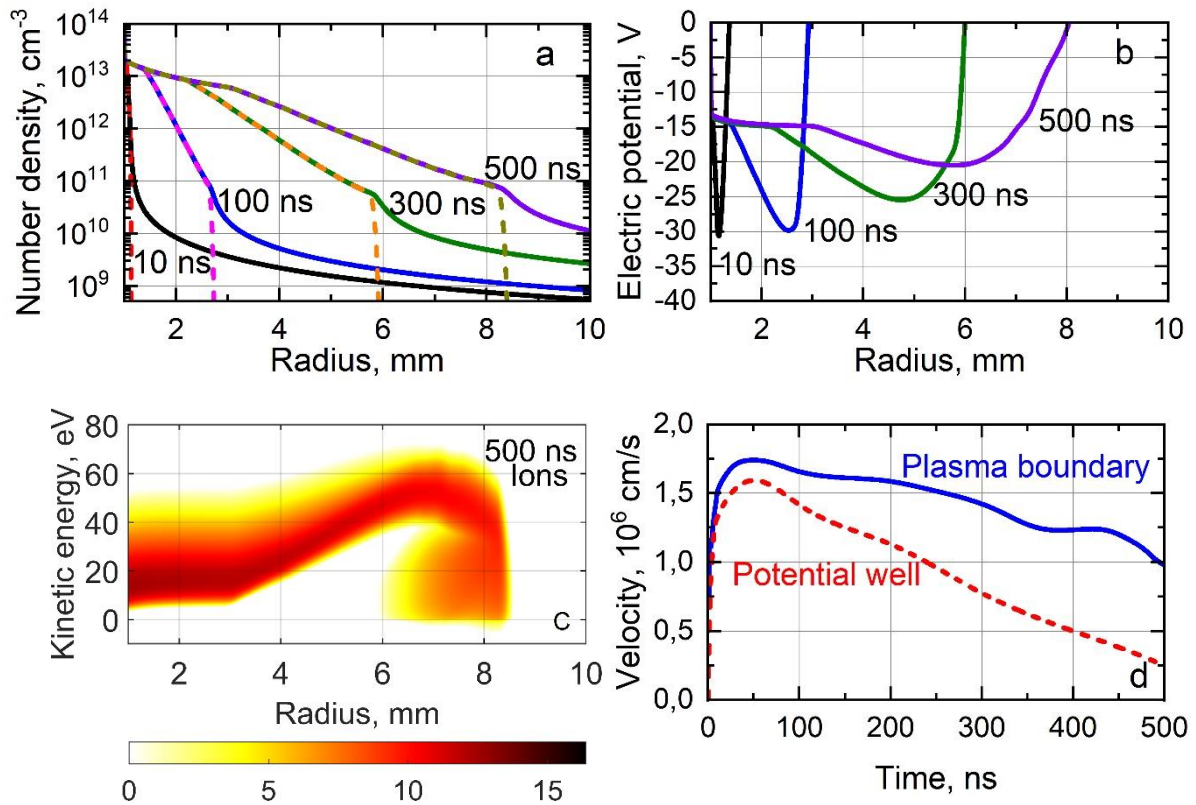


Рис. 1. Распределение концентрации заряженных частиц (а) (сплошная – ионы, штриховая – электроны), распределение электрического потенциала (б), мгновенная функция распределения ионов в промежутке (с), скорости продвижения плазменного фронта и минимума потенциала в промежутке (д)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Boxman R.L., Sanders D., Martin P.* Vacuum Arc Science and Technology. – N.J.: Park Ridge, 1995.
2. *Brown I.G., Galvin J.E., MacGill R.A.* // Applied Physics Letters. – 1985. – Vol. 47. – No. 358.
3. *Anders A.* Cathodics Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. – N.Y.: Springer, 2008.
4. *Beilis I.I.* // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2001. – Vol. 29. – No. 657.
5. *Chapelle P., Bellot J.P., Duval H., Jardy A., Ablitzer D.* // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 35. – No. 137.
6. *Hantzschke E.* // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2003. – Vol. 31. – No. 799.
7. *Davis W.D., Miller H.C.* // Journal of Applied Physics. – 1969. – Vol. 40. – No. 2212.
8. *Brown I., Oks E.* // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33. – No. 1931.
9. *Anders A.* // Physical Review E. – 1997. – Vol. 55. – No. 969.

**КИНЕТИКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ
ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА
ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ**

**KINETICS OF FAST ELECTRONS AND PLASMA PARAMETERS
OF NEGATIVE GLOW DISCHARGE AT LOW AND HIGH PRESSURES**

Сайфутдинов А.И.¹, Сысоев С.С.², Гущин Д.В.¹
Saifutdinov A.I.¹, Sysoev S.S.², D.D. Gushchin¹

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет,
Россия, г.Казань, ул. К.Маркса, 10*

²*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург
e-mail: as.uav@bk.ru*

В работе формулируется гибридная модель короткого (без положительного столба) тлеющего разряда постоянного тока при низких, средних и высоких давлениях на основе кинетического описания электронной компоненты и гидродинамического описания тяжелой компоненты (ионов, возбужденных частиц и нейтралов) плазмы. На основе гибридной модели проведены численные расчеты для коротких разрядов при низких, средних и высоких давлениях. Продемонстрировано формирование характерных пиков – спектров быстрых электронов, образованных в результате реакций пеннинговской ионизации и сверхупругих столкновений в плазме отрицательного свечения пространства на высокоэнергетической части функции распределения электронов. При поддержке Фонда БАЗИС, проект №. 21-1-3-53-1.

A hybrid model of a short (without positive column) DC glow discharge at low, medium, and high pressures is formulated based on the kinetic description of the electron component and the fluid (drift-diffusion) description of the heavy component (ions, excited particles, and neutrals) of the plasma. On the basis of the hybrid model, numerical calculations were carried out for short discharges at low, medium, and high pressures. The formation of characteristic peaks, the spectra of fast electrons, formed as a result of Penning ionization reactions and superelastic collisions in the plasma of the negative glow of space on the high-energy part of the electron distribution function, is demonstrated. This work was supported by the BAZIS Foundation, project no. 21-1-3-53-1.

В работе приводится описание гибридной модели короткого (без положительного столба) тлеющего разряда в гелии. Модель основана на кинетическом уравнении Больцмана, записанным в двухчленном Лоренцовом приближении, а также диффузионно-дрейфовых уравнений для описания тяжелой компоненты плазмы. Для определения самосогласованного электрического поля записано уравнение Пуассона. В случае рассмотрения разрядов при средних и высоких давлениях учитывается уравнение теплового баланса [1]. Для сформулированной гибридной модели проведены численные исследования параметров плазмы и кинетики быстрых электронов в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда при низких, средних и высоких давлениях. Результаты чис-

ленных расчетов сопоставлены с результатами, полученными в рамках расширенной гидродинамической модели и с результатами расчетов Донко З. [2], полученными в рамках гибридной модели на основе метода «частиц в ячейках» с совместным применением метода Монте-Карло (PIC/MCC). Показано, что гибридная модель достаточно хорошо описывает параметры плазмы в области отрицательного свечения. В частности, показано, что температура электронов в области отрицательного свечения является низкой и составляет десятые доли эВ, в отличие от гидродинамической модели, которая дает завышенную температуру электронов. Кроме того, гибридная модель позволяет достаточно точно описать формирование пиков от быстрых электронов, образованных в результате реакций пеннинговской ионизации и ударов второго рода, на высокоэнергетических частях ФРЭ (рис. 1 *a, b*) и дифференциальных потоков (рис. 1 *с*).

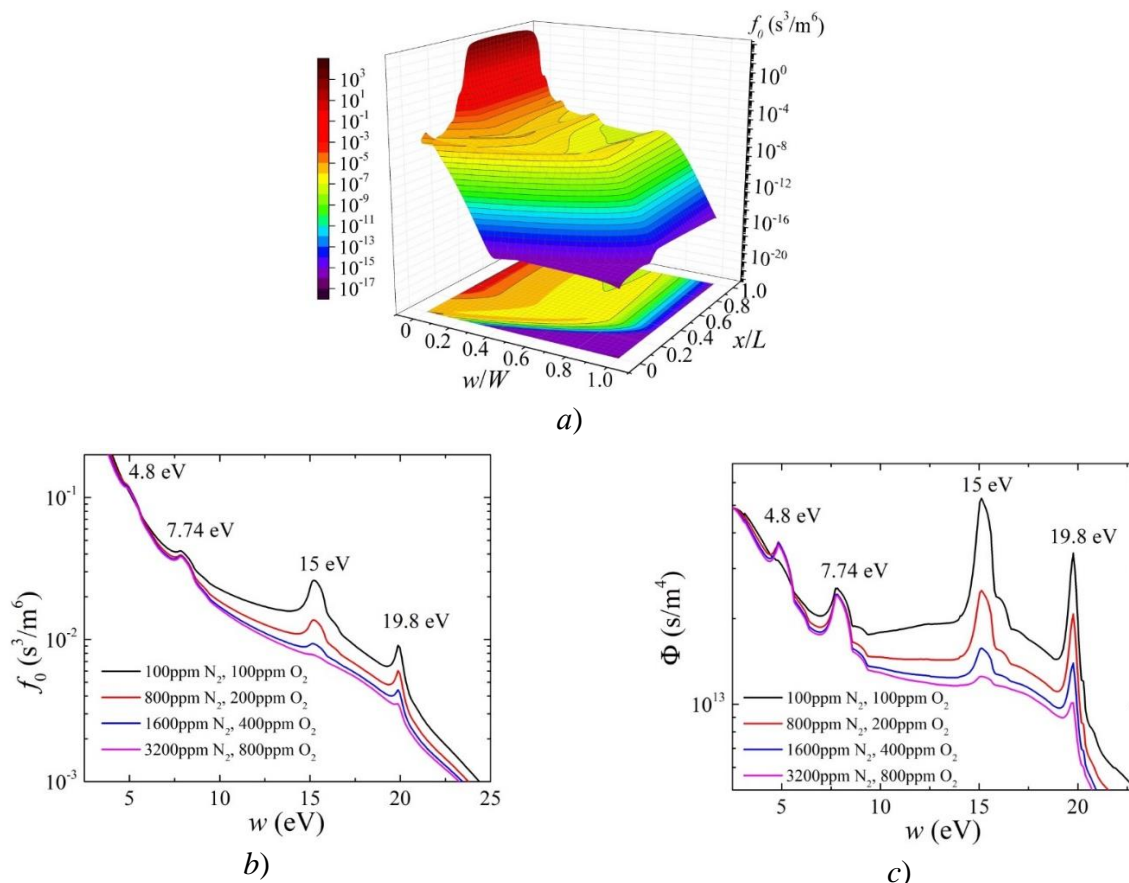


Рис. 1 *a*) Функция распределения электронов; *b*) Высокоэнергетические части функции распределения электронов и *с*) дифференциальные потоки в разряде в гелии при давлении $p=30$ кПа и межэлектродном промежутке $L = 0.2$ мм с малыми примесями воздуха

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайфутдинов А.И., Сысоев С.С., Нуриддинов Х., Валеева Д.Р., Сайко А.М. // Химия высоких энергий. – 2023. – Т. 2. – № 149.
2. Kutasi K. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34. – No. 3368.

ЛОКАЛЬНЫЕ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВОМ ПРОМЕЖУТКЕ С КЛИНОВИДНЫМ КАТОДОМ

LOCAL AND NON-LOCAL CONDITIONS FOR ELECTRON RUNAWAY IN A GAS GAP WITH A WEDGE-SHAPED CATHODE

Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И.
Zubarev N.M., Zubareva O.V., Yalandin M.I.

Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016
email: olga@iep.uran.ru

Анализируются условия убегания электронов в газовом диоде с клиновидным катодом, обеспечивающим резко неоднородное распределение поля в межэлектродном промежутке. Показано, что характер и условия убегания качественно различаются для клиньев со сравнительно большими и малыми углами раствора, т.е. для различной степени неоднородности поля. В первом случае переход в режим убегания определяется поведением электрона вблизи места его старта – вершины клиновидного катода. Для клина с углом раствора менее 30 градусов условия убегания принимают явно нелокальный характер. Относительный вклад силы торможения нарастает с удалением от катода, и ключевую роль в анализе условий убегания начинает играть поведение электрона на периферии. Также рассматривается влияние на убегание электронов внешнего магнитного поля.

The conditions for runaway of electrons in a gas diode with a wedge-shaped cathode, which provides a sharply inhomogeneous field distribution in the interelectrode gap, are analyzed. It is shown that the character and conditions of runaway are qualitatively different for wedges with relatively large and small angles, i.e., for different degrees of field inhomogeneity. In the first case, the transition to the runaway mode is determined by the behavior of an electron in the vicinity of the place of its start – the top of the wedge-shaped cathode. For a wedge with an angle of less than 30 degrees, the runaway conditions take on a clearly nonlocal character. The relative contribution of the braking force increases with distance from the cathode, and the electron behavior at the periphery begins to play a key role in the analysis of runaway conditions. The effect of an external magnetic field on the runaway of electrons is also considered.

Свободные электроны в газе способны непрерывно ускоряться при приложении достаточно сильного внешнего электрического поля [1,2]. Их скорость становится сопоставимой со скоростью света, в результате чего они пересекают газовый промежуток длиной в единицы-десятки миллиметров за десятки-сотни пикосекунд. За эти времена убегающие электроны (УЭ) осуществляют предварительную ионизацию промежутка, инициируя тем самым его пробой в субнаносекундном временном диапазоне. В лабораторных условиях в экспериментах с УЭ распределение электрического поля обычно является резко неоднородным – его напряженность в промежутке меняется более чем на порядок, что существенно влияет на характер и условия убегания электронов [3,4].

В данной работе показано, что поведение УЭ в случае клиновидного катода с относительно большими, превышающими ~ 30 градусов углами раствора в целом аналогично поведению электронов в однородном поле: возможность их перехода в режим убегания и последующее ускорение во всем газовом промежутке целиком определяется локальными процессами в области, откуда они стартуют. Для острого клина, угол раствора которого меньше 30 градусов, условия убегания принимают нелокальный характер. Они не определяются локальным распределением электрического поля вблизи катодной кромки. Электрон, перешедший в режим убегания в прикатодной области, может начать тормозиться и, в итоге, термализоваться на периферии, в области слабого электрического поля. В такой ситуации в анализе возможности непрерывного ускорения электрона во всем газовом промежутке ключевую роль начинает играть баланс действующих на него сил в прианодной области. При этом нелокальность рассматриваемых процессов проявляется в том, что сила торможения электрона вблизи анода зависит от того, с какой энергией он его достигает, а для определения этой энергии необходимо учитывать всю предысторию его движения.

Также, в связи с недавними экспериментами [5,6] по управлению потоками УЭ в воздушных зазорах посредством внешнего ведущего магнитного поля, в работе обсуждается его влияние на геометрию области вблизи вершины клина, стартующие из которой электроны будут убегать. Продемонстрировано, что эта область начинает заметно деформироваться – уменьшаться – при значениях магнитной индукции в единицы тесла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00053).

ЛИТЕРАТУРА

1. *А.В. Гуревич, К.П. Зыбин // УФН. – 2001. – Т. 171. – № 1177.*
2. *L.P. Babich High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. – Arlington: Futurepast, 2003.*
3. *N.M. Zubarev, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, S.A. Barengolts, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, O.V. Zubareva // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. – Vol. 51. – No. 284003.*
4. *N.M. Zubarev, O.V. Zubareva, M.I. Yalandin // Electronics. – 2022. – Vol. 11. – No. 2771.*
5. *М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 113. – № 370.*
6. *G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev // IEEE Electron Device Letters. – 2022. – Vol. 43. – No. 627.*

MONTE CARLO SIMULATION OF ION KINETICS IN NITROGEN AND OXYGEN PLASMAS UNDER NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD CONDITIONS

Aleksandrov N.L.¹, Ponomarev A.A.²

¹*Moscow Institute of Physics and Technology, Russia,
Dolgoprudny 141700, Moscow region, Institutsky lane 9*
²*HSE University, Russia, Moscow 101000, Myasnitskaya st. 20*
email: aleksandrov.nl@mipt.ru

The kinetics of N_4^+ and O^- ions was numerically studied in nitrogen and oxygen plasmas in a highly non-uniform electric field. Mean ion energy and reaction rate coefficients in a background gas at pressures from 1 to 10 Torr were calculated through a Monte Carlo simulation. The ion characteristics followed the local reduced electric field at high pressures, whereas nonhydrodynamic effects leading to a nonlocal dependence of the mean ion energy and rate coefficients on the field were obtained at low pressures. A simplified method of describing ion rates in spatially varying electric fields was suggested on the basis of the Monte Carlo simulation of these rates for uniform electric field conditions and mean ion energy calculations in non-uniform fields.

Kinetic treatment of electrons and ions forms the basis for describing gas discharge plasmas. The kinetics of charged particles in electric fields is studied using numerical solutions of the Boltzmann equation, Monte Carlo simulations and some other more sophisticated approaches [1]. These kinetic methods are computationally expensive. Therefore, simpler fluid approaches are often applied to calculate discharge plasma properties. These approaches are based on balance equations such as the continuity equations, the momentum equations and the energy equations for electrons and ions. Transport and rate coefficients for these particles are input parameters of the fluid models and are usually calculated by integrating the non-equilibrium energy distributions taking into account various cross-sections for electron- and ion-neutral scattering. The local-field approximation is the simplest fluid approach in which the electron and ion coefficients are governed by the local value of the reduced electric field E/N (N is the gas number density). When E/N grossly changes in time and/or space, the local-field approximation can be inadequate.

The non-local (in space and time) dependence of the electron swarm characteristics on E/N has been addressed under various conditions. The local-field approximation is adequate when the characteristic length for plasma parameter variation, L , is much longer than the relaxation length for the electron energy distribution, λ_ϵ : $L \gg \lambda_\epsilon$. The relaxation length λ_ϵ for electrons is much longer than that for ions because the energy transfer from light electrons to heavy neutrals is inefficient in comparison with the energy transfer in ion-molecule collisions. Because of this, there are situations in which the locality condition is invalid for electrons and is fulfilled for ions. In this case, it is important to verify the applicability of ion fluid equations and to modify these equations in highly non-uniform electric fields when the non-local effects for ions cannot

be neglected. Such conditions can occur in some discharges including a nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge, during discharge interaction with a shock wave front, and at plasma-liquid interfaces. The most profound non-local effect is expected for the rates of ion-molecule reactions with high energy thresholds. In this work, the emphasis is on the influence of non-uniform electric fields on the rates of N_4^+ ion dissociation in nitrogen and endothermic reactions of O^- with O_2 . This study is an extension of our previous Monte Carlo simulation [2] in which the kinetics of O_2^- and O^- ions was considered in air plasma when a high electric field rapidly varied in time.

We studied the characteristics of N_4^+ ions in pure nitrogen and O^- ions in pure oxygen in a strong electric field E ($E/N < 200$ Td). The details of the Monte Carlo technique used in this work were given elsewhere (see [2] and references therein). The rate coefficients for N_4^+ dissociation in N_2 and charge exchange and electron detachment for O^- ions in O_2 were calculated under the influence of a spatially varying electric field through a Monte Carlo simulation. It was assumed that the electric field linearly increases or decreases at a length of 0.1 mm. The validity of the local-field approximation in a non-uniform field was examined at pressures from 1 to 10 Torr by comparing the local field values with the results of the direct Monte Carlo calculation. The local-field approximation was adequate for calculating the rates when the parameter λ_e/L did not exceed 0.03. It was shown that the non-local effect on the rates of the ion-molecule reactions under study (i) increases with decreasing pressure and increasing energy threshold of the reactions, (ii) is higher for the ion-molecule systems when the relaxation length for the ion energy distribution (at the energies controlling the rate coefficients) is relatively high, and (iii) is more profound in decreasing electric fields in comparison with the case of increasing electric fields. As a result, the rate of electron detachment from O^- ions was most sensitive to field variation, whereas the non-local effect on the rate of N_4^+ dissociation was the smallest one. All obtained results were qualitatively explained using the parameter λ_e/L .

We compared the rates of the ion-molecule reactions calculated through the direct Monte Carlo simulation with the rates calculated in the local-mean-energy approximation. In the latter case, the rates were obtained using the mean ion energy at a given point, whereas the values of this energy were determined taking into account its non-local dependence on the reduced electric field. This method is similar to the approximation widely utilized to describe electron kinetics in space- and time-varying electric fields [1]. We showed that the local-mean-energy approximation permits an adequate description of the rates of endothermic ion-molecule reactions in non-uniform electric fields when the non-local effect is not too high.

REFERENCES

1. L.L. Alves, A. Bogaerts, V. Guerra, M.M. Turner // Plasma Sources Sci. Technol. – 2018. – V. 27. – №023002.
2. A.A. Ponomarev, N.L. Aleksandrov // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2020. – V. 53. – №055203.

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ ФРЭЭ В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСИ Хе С Не

PECULIARITIES OF EEDF RELAXATION IN THE AFTERGLOW OF A GLOW DISCHARGE IN A Xe-He MIXTURE

Григорьян Г.М.¹, Демьянов А.В.², Дятко Н.А.^{2,3}, Кочетов И.В.^{2,3}
Grigorian G.M.¹, Demyanov A.V.², Dyatko N.A.^{2,3}, Kochetov I.V.^{2,3}

¹СПбГУ, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9.

²ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”, Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12.

³ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д.53.

email: galgr2@rambler.ru

В работе выполнены экспериментальные и расчетно-теоретические исследования функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в послесвечении тлеющего разряда в смеси He+1.5%Xe. Радиус трубки 1.25 см, давление смеси 1, 2 и 3 Торр, ток разряда 10 мА.

In this work, experimental and theoretical studies of the electron energy distribution function (EEDF) in the afterglow of a glow discharge in a He+1.5% Xe mixture are carried out. The tube radius is 1.25 cm, the mixture pressure is 1, 2, and 3 Torr, and the discharge current is 10 mA.

Эксперименты проводились в смеси He+1.5%Xe в трубках радиусом 1.25 см и расстоянием между электродами 40 см. Установка позволяла работать как в режиме разряда постоянного тока, так и в импульсно-периодическом режиме. Частота повторения импульсов тока составляла 2-3 кГц, длительность импульса – до 400 мкс, задний фронт импульса напряжения ~ 2 мкс.

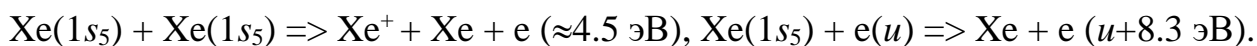
Измерения ФРЭЭ проводились зондовым методом в импульсно-периодическом режиме. Применялся метод с модуляцией напряжения на зонде Ленгмюра [1]. Использовался молибденовый зонд диаметром 25 мкм и длиной – 3 мм. Измерения проводились для давления смеси 1, 2 и 3 Торр в диапазоне энергий от 0 до 4.5 эВ на временах от 3 до 10 мкс (время отсчитывалось от момента обращения в ноль тока разряда).

Измерялась также (в разряде и в послесвечении) населенность нижнего метастабильного уровня ксенона Xe(1s₅) на оси трубки. Измерения проводились методом оптического поглощения [2]. Населенность определялась по поглощению излучения на переходе 2p₆ – 1s₅. Показано, что в послесвечении на временах до 30 мкс населенность Xe(1s₅) уменьшается незначительно.

По измеренным вольтамперным характеристикам и приэлектродному падению напряжения (оно определялось в специальных экспериментах) рассчитывалось приведенное электрическое поле E/N (E – напряженность электрического

поля, N – число атомов в единице объема) в положительном столбе разряда, и оценивалась концентрация электронов n_{e0} .

Расчет ФРЭЭ проводился путем решения нестационарного уравнения Больцмана для электронов. Сечения рассеяния электронов на атомах He и Xe брались из [3] и [4], соответственно. В уравнении учитывался уход электронов на стенки трубки за счет амбиполярной диффузии и появление быстрых электронов в процессах хемоионизации [5] и соударений второго рода:



Вначале находилось стационарное решение уравнения для заданных (экспериментальных) значений E/N , $[\text{Xe}(1s_5)]$ и n_{e0} . Затем (чтобы учесть конечную длительность заднего фронта импульса напряжения в эксперименте) в течение 2 мкс значение E/N уменьшалось до нуля по линейному закону.

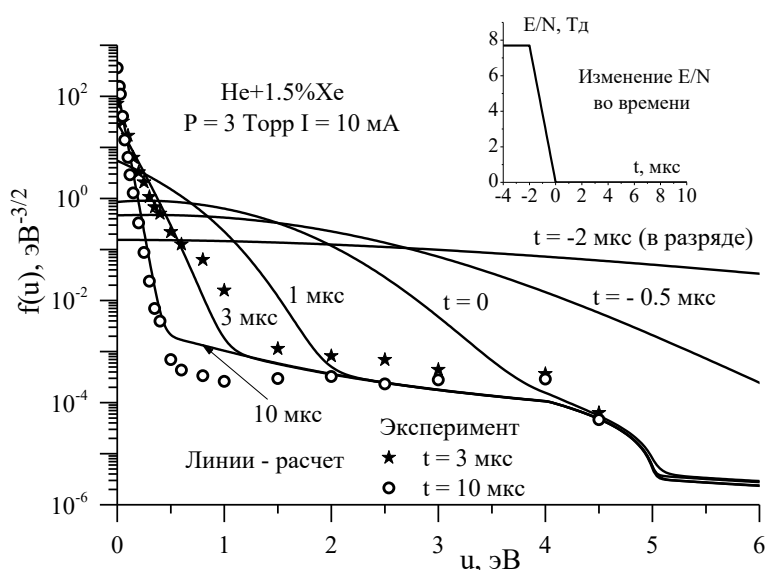


Рис.1. Измеренные (символы) и рассчитанные (линии) ФРЭЭ в послесвечении разряда для давления смеси 3 Торр и разрядном токе 10 мА

Расчет проводился для $E/N = 7.7$ Тд, $[\text{Xe}(1s_5)] = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $n_{e0} = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Как видно из рисунка, рассчитанные ФРЭЭ достаточно хорошо согласуются с измеренными. Характерной особенностью ФРЭЭ является наличие плато в области энергий $u < 4$ эВ. Формирование этого плато обусловлено электронами с энергией 4.5 эВ, образующимися в процессах хемоионизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Демидов, Н.Б. Колоколов, А.А. Кудрявцев Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
2. Г.М. Григорьян, А.В. Демьянов, Н.А. Дятко // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47. – № 562.
3. F. Sigeneger, N.A. Dyatko, R. Winkler // Plasma Chem. Plasma Process. – 2003. – Vol. 23. – No. 103.
4. Nayashi database. – URL: www.lxcat.net/ (дата обращения: 21.03.2023).
5. Н.Б. Колоколов, А.Б. Благоев // УФН. – 1993. – Т. 163. – № 55.

**ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ РЕЛАКСАЦИИ НИЖНИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ Хе В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ
ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСИ С Не**

**STUDY OF THE RELAXATION RATE OF THE LOWER ELECTRONIC
STATES OF Xe ATOMS IN THE AFTERGLOW OF A GLOW DISCHARGE
IN A MIXTURE WITH He**

Григорьян Г.М.¹, Демьянов А.В.², Дятко Н.А.^{2,3}, Кочетов И.В.^{2,3}
Grigorian G.M.¹, Demyanov A.V.², Dyatko N.A.^{2,3}, Kochetov I.V.^{2,3}

¹ СПбГУ, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9.

² ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”, Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12.

³ ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д.53.

email: demyanov@triniti.ru

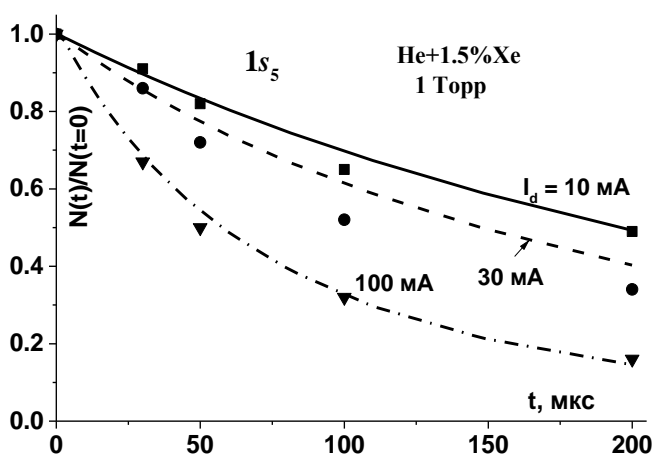
Выполнены экспериментальные и расчетно-теоретические исследования релаксации населенностей нижних электронных состояний атомов Хе в послесвечении разряда в смеси He+1.5%Хе для давлений 0.5, 1, 2 и 3 Торр и тока на стадии горения 10-100 мА. Согласно измерениям, скорость релаксации резонансных состояний на порядок больше скорости релаксации метастабильных состояний. Причем, с увеличением тока разряда скорость релаксации метастабильных состояний растет, а резонансных - уменьшается. Расчеты выполнены в рамках 0-мерной модели, самосогласованно решающей балансные уравнения для компонент плазмы и уравнение Больцмана для ФРЭЭ с учетом источника быстрых электронов в процессе химиоионизации. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

Experimental and theoretical study of the relaxation of the populations of the lower electronic states of Xe atoms in the afterglow of a discharge in a mixture of He + 1.5% Xe for pressures of 0.5, 1, 2, and 3 Torr and a discharge current on glow stage of 10-100 mA are carried out. According to measurements, the relaxation rate of resonant states is an order of magnitude higher than the relaxation rate of metastable states. Moreover, with increasing of the discharge current, the relaxation rate of metastable states increases, while that of resonant states decreases. The calculations were performed within the framework of a 0-dimensional model, which self-consistently solves the balance equations for the plasma components and the Boltzmann equation for the EEDF, taking into account the source of fast electrons during chemioionization. The experimental and calculated results are compared.

В экспериментах использовалась разрядная трубка из молибденового стекла диаметром 25 мм. Расстояние между электродами составляло 40 см. Измерения проводились при давлении $P = 0.5-3$ Торр. В качестве рабочих газов использовались гелий спектральной чистоты и ксенон 95 (99.995%). Установка работала, как в режиме разряда постоянного тока с $I_d = 10-100$ мА, так и в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 400 мкс и частотой 3 кГц. В режиме разряда постоянного тока измерялось напряженность электрического поля в положительном столбе и приэлектродное падение напряжения на специальной трубке того же диаметра. Также измерялась населенность нижних электронных

уровней ксенона $1s_5$, $1s_4$, $1s_3$ и $1s_2$ (только для 0.5 Торр) на оси трубки, как в режиме постоянного тока, так и в послесвечения тлеющего разряда [1]. Как ожидалось, в экспериментах характерное время спада населенностей максимально для метастабильных состояний $\text{Xe}(1s_5, 1s_3)$, а для радиационных $\text{Xe}(1s_4, 1s_2)$ на порядок меньше. Причем, с увеличением тока разряда время спада населенностей для метастабильных состояний уменьшается, а для радиационных состояний возрастает. Например, для $\text{Xe}(1s_5)$ время спада населенности уменьшается в 3 раза, а для $\text{Xe}(1s_4)$ возрастает в 2 раза при увеличении тока разряда от 10 до 100 мА для $P = 1 - 3$ Торр.

Разработанная в работе [2] кинетическая модель стационарного разряда модернизирована на случай импульсного разряда. В модель включен процесс хемоионизации с участием метастабильных атомов $\text{Xe}(1s_5)$ [3], приводящий к появлению электронов с энергией 4.5 эВ, а в уравнение Больцмана добавлен источник электронов с этой энергией. Интенсивность источника определяется скоростью процесса хемоионизации, меняющейся в течение импульса разряда и в послесвечении из-за изменения населенности $\text{Xe}(1s_5)$. В момент времени окончания импульса разряда в расчетах напряжение на разряде уменьшается до нуля, но уравнение Больцмана продолжает решаться, а нагрев электронов при этом происходит за счет процесса хемоионизации и соударений второго рода.



В модели стационарное уравнение Больцмана пересчитывается по мере изменения концентраций компонентов плазмы.

Проведено сопоставление с экспериментальными результатами и получено качественное согласие экспериментальных и расчетных зависимостей для смеси 1.5%Xe – He при давлении 0.5 - 3 Торр. Анализ предварительных результатов расчетов

показал, что процессы перемешивания электронами $\text{Xe}(1s_5, 1s_3)$ и $\text{Xe}(1s_4, 1s_2)$ электронно-возбужденных состояний ответственны за изменение характерного времени спада населенностей при изменении тока разряда, наблюдаемого экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьян Г.М., Демьянов А.В., Дятко Н.А. // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – № 369.
2. Григорьян Г.М., Демьянов А.В., Дятко Н.А. // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47. – № 562.
3. Колоколов Н.Б., Благодеев А.Б. // УФН. – 1993. – Т. 163. – № 55.

Секция 5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ГРАНИЦУ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

MODELING OF THE EFFECT OF PERIODIC SPARK DISCHARGES ON THE BOUNDARY OF A TRANSVERSE JET IN A SUPERSONIC FLOW

Волков Л.С.^{1,2}, Фирсов А.А.¹
Volkov L.S.^{1,2}, Firsov A.A.¹

¹ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13.

²МФТИ (НИУ), Россия, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.
e-mail: volkov.ls@phystech.edu

С помощью кода FlowVision проведено моделирование смешения сверхзвукового потока воздуха с вторичной поперечной струей углекислого газа при локальном импульсно-периодическом нагреве газа искровыми разрядами в области около сдвигового слоя на границе струи. Проведено сравнение локальных характеристик течения при различной периодичности импульсного нагрева.

FlowVision code was used to simulate the mixing of a supersonic air flow with a secondary transverse carbon dioxide jet during local pulse-periodic heating of the gas by spark discharges in the region near the shear layer at the jet boundary. The local characteristics of the flow are compared for different periodicities of pulsed heating.

При инъекции вторичной поперечной струи в сверхзвуковой поток воздуха через отверстие на плоской стенке сверхзвукового тракта формируется особая структура течения, именуемая в иностранной литературе JISC (“jet interacting with supersonic crossflow”). Это течение имеет место при инъекции топлива в сверхзвуковые камеры сгорания прямоточных авиационных двигателей. Для такой конфигурации инъекции в последние десятилетия предлагаются разнообразные способы интенсификации смешения газов, что требуется для повышения эффективности двигателей [1,2].

В данной работе рассматривается воздействие плазмы искровых разрядов на сдвиговый слой на границе вторичной струи. Известно, что при импульсном нагреве газа плазмой искрового разряда формируются ударная волна и расширяющаяся тепловая каверна [3]. Поэтому ожидается, что с помощью периодических искровых разрядов можно стимулировать формирование возмущений на границе вторичной струи в JISC, и, таким образом, ускорить смешение. Целью работы было сравнение локальных характеристик течения JISC (со сверхзвуковым потоком воздуха и с CO₂ в качестве газа вторичной струи) при нескольких режимах импульсного нагрева газа на передней кромке отверстия инжектора.

Для решения поставленной задачи было выполнено численное моделирование в российском ПО FlowVision. Эволюция характеристик течения была рассчитана путем решения нестационарных УНС, осредненных по Рейнольдсу, с модифицированной моделью турбулентности k-ε. Базы данных с информацией о

свойствах равновесной плазмы в средах воздуха и CO_2 при высоких температурах (до 30000 К) были взяты из работ [4,5]. Воздействие искровых разрядов на газ моделировалось путем добавления в УНС члена с объемным тепловыделением. Выбранные параметры JISC позволяют воспроизвести это явление в эксперименте на оборудовании, доступном в ОИВТ РАН: число Маха – 1,8; отношение потоков импульса вторичной струи и основного сверхзвукового потока – 0,94, диаметр отверстия инжектора – 4 мм.

Было показано, что в отсутствии разрядов в сдвиговом слое на границе струи рождаются возмущения, которые распространяются вниз по течению, с периодом $T_0=25$ мкс (число Струхалия $Sr=0,5$). При импульсном нагреве с периодом $T=T_0$ моменты формирования возмущений синхронизируются с импульсами тепловыделения (рис. 1а). При $T=20$ мкс ($Sr=0,63$) возмущения начинают формироваться с тем же периодом T (рис. 1б). Однако при уменьшении T до 15 мкс ($Sr=0,83$) масштаб возмущений существенно уменьшается (рис. 1в). Таким образом, импульсный нагрев границы струи в JISC искровыми разрядами может в некоторых пределах способствовать интенсификации смешения за счет ускоренной генерации возмущений.

Исследование поддержано грантом РФФ №21-79-10408.

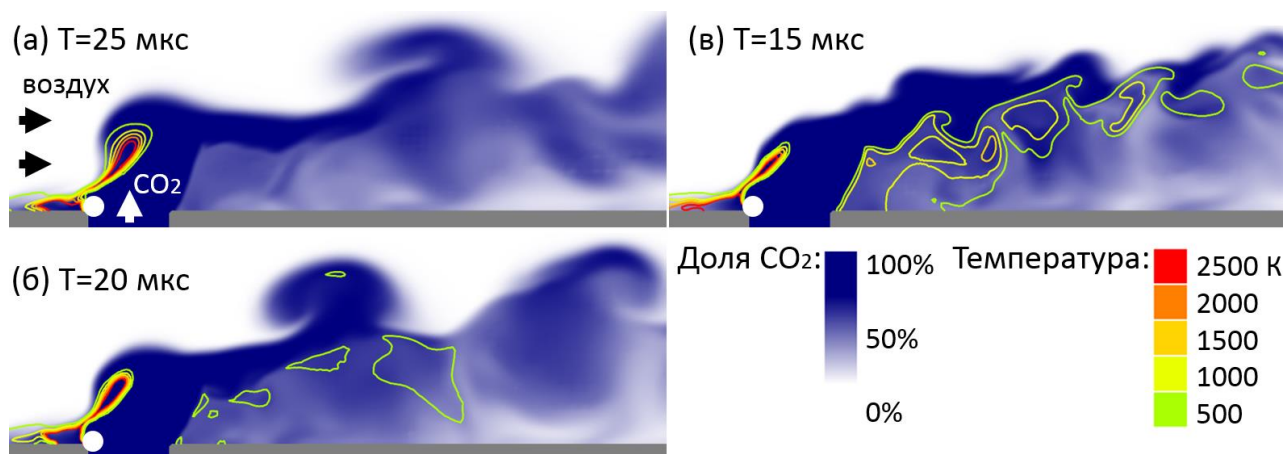


Рис. 1. Мгновенные распределения массовой доли CO_2 и температуры спустя 8 мкс после начала очередного импульса тепловыделения. (а) $T=25$ мкс, (б) $T=20$ мкс, (в) $T=15$ мкс. Белым кругом отмечена область тепловыделения

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu Q. // Progress in Aerospace Sciences. – 2020. – Vol. 119. – No. 100636.
2. Firsov A.A. // Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci. – 2015. – Vol. 373. – Is. 2048. – No. 20140337.
3. Dolgov E.V., Firsov A.A. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1112. – No. 012026.
4. Catalfamo C. // The European Physical Journal D. – 2009. – Vol. 54. – Is. 3. – P. 613–621.
5. Capitelli M. // The European Physical Journal D. – 2000. – Vol. 11. – Is. 2. – P. 279–289.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В Ar-He СМЕСИ

SIMULATION RESULTS OF REPETITIVELY-PULSE DISCHARGE IN Ar-He MIXTURE

Загидуллин М.В.^{1,2}, Михеев П.А.¹, Дворников А.Д.²
Zagidullin M.V.¹, Mykheyev P.A.¹, Dvornikov A.D.²

¹Самарский филиал ФИАН, Россия, Самара, 443011

²Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева,
Россия, Самара, 443086
e-mail: zagidullin_marsel@rambler.ru

Приведены результаты моделирования импульсно-периодического разряда в смеси Ar-He в рамках 1-D расширенной гидродинамической модели в изотермических условиях. Получены зависимости выхода метастабильных атомов аргона от параметров разряда и состава Ar-He смеси.

The results of modeling a pulse-periodic discharge in an Ar-He mixture in the framework of a 1-D extended drift-diffusion model under isothermal conditions are presented. The dependences of the yield of metastable argon atoms on the discharge parameters and the composition of the Ar-He mixture are obtained.

Импульсно-периодический разряд (ИПР) в смеси инертных газов атмосферного давления с длительностью импульсов от единиц до сотен наносекунд с высокой частотой повторения импульсов (≥ 100 кГц) является эффективным способом получения квазинепрерывной слабоионизированной однородной плазмы, которая представляет интерес для создания активной среды лазеров с оптической накачкой [1, 2].

В рамках расширенной гидродинамической модели и изотермических условий создана 1-D модель ИПР в смеси Ar-He атмосферного давления. Считалось, что возбужденные атомы аргона Ar^* находится только на 2 нижних состояниях $s5(^3P_2)$, $s4(^3P_1)$, а возбужденные атомы гелия He^* только на нижнем уровне 3S . Значения констант скоростей 10 реакций электронного удара и транспортные коэффициенты переноса электронов рассчитывались с помощью уравнения Больцмана в двухчленном приближении. Значения констант скоростей 30 плазмохимических реакций, транспортные коэффициенты ионов (Ar^+ , He^+ , Ar_2^+ , He_2^+ , $HeAr^+$) и возбужденных частиц (Ar^* , He^* , Ar_2^* , He_2^*) заимствованы из литературы или для них сделаны оценки.

Предварительный расчет дал величину минимального пробойного напряжения ~ 140 В, при значении параметра $pd \approx 7$ торр \times см для смеси Ar:He=1:99, расчетную нормальную плотность тока ~ 0.25 А/см² при 700 торр.

Периодическое решение для ИПР искалось для условий, близкими к эксперименту в работе [2]. ИПР формировался в 3 мм межэлектродном зазоре в смеси Ar:He=1:99 при давлении 700 торр треугольными импульсами амплитудой 800 В, длительностью 160 нс, частотой повторения 200 кГц. Предполагалось наличие атмосферных примесей, тушащих Ar* с частотой $2 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$. Катодное падение потенциала составило более 50% от приложенного анодного потенциала в течении примерно ± 40 нс от времени достижения максимума анодного потенциала. Эффективно это приводит к сокращению длительности импульса E/N в центре зазора до 120 нс. Максимальная плотность тока равнялась 1.6 А/см^2 , полная энергия разряда 50 мкДж, что близко к эксперименту. Плотность тока выше нормального значения достигалась только на протяжении времени 100 нс. Средняя удельная мощность разряда в центре зазора $\sim 40 \text{ Вт/см}^3$, из которых $\sim 36 \text{ Вт/см}^3$ выделяется в тепло. Расчетная средняя ионизации плазмы $\sim 5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, средняя концентрации Ar(s5) $1.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что примерно в 1.5 раза выше, чем в эксперименте. Приводятся зависимости среднего выхода Ar* и ионизации от частоты повторения импульсов, длительности импульсов, давления, температуры, содержания атмосферных примесей.

Кинетика процессов в период послесвечения плазмы играет значительную роль в ИПР. В работе уделяется внимание чувствительности результатов расчетов к выбору значению некоторых ключевых констант, для которых имеются разные данные в литературе. Результаты расчетов сильно зависят от выбора коэффициентов вторичной эмиссии с катода, величина которых обычно в конкретном эксперименте неизвестна. Оценка мощности тепловыделения показывает, что температурные неоднородности могут быть весьма значительными и корректный расчет ИПР, строго говоря, требует решения тепловой задачи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10013, <https://rscf.ru/project/23-22-10013/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J. Han, M.C. Heaven, P.J. Moran, G.A. Pitz, E.M. Guild, C.R. Sanderson, B. Hokr // Optics letters. – 2017. – Vol. 42. – No. 4627.*
2. *P.A. Mikheyev, A.K. Chernyshov, M.I. Svistun, N.I. Ufimtsev, O.S. Kartamysheva, V.N. Azyazov // Optics express. – 2019. – Vol. 27. – No. 38759.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ В МИНИАТЮРНОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ С ИСКРО-ДУГОВЫМ ИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ

MODELING OF ION MOTION IN A MINIATURE LINEAR ACCELERATOR WITH A SPARK-ARC ION SOURCE

Мамедов И.М.^{1,2}, Узвлок А.А.¹, Масленников С.П.^{1,2}
Mamedov I.M.^{1,2}, Uzvolok A.A.¹, Maslennikov S.P.^{1,2}

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова», Россия, 127055*

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409, Москва, Россия
e-mail: schildkrote5552@yandex.ru*

В данной работе предложена численная модель расчета распределения электрического поля и траекторий частиц в миниатюрном линейном ускорителе (МЛУ) с искро-дуговым ионным источником (ИИ). Полученная расчетная модель позволяет в первом приближении оценивать профиль пучка заряженных частиц на мишени.

In this paper, a distribution numerical model of the electric field and particle trajectories in a miniature linear accelerator (MLA) with a spark-ion source is proposed. The resulting computational model makes it possible to estimate the profile of a charged particle beam on a target in the first approximation.

Как правило, МЛУ представляет собой запаянную ускорительную камеру, внутри которой располагается искро-дуговой ИИ, ионно-оптическая система (ИОС), мишень и газопоглотитель (геттер). Подробное описание приведено в [1]. Цель настоящей работы – верификация расчетного кода через сравнение профиля ионного пучка на мишени в модели с данными эксперимента из [2] для разных геометрий ИОС. Вычисления производились методом конечных элементов в трехмерном пространстве. Начальные условия моделирования: скорость ионов, пространственное распределение при вылете из искро-дугового ИИ, ток ионного пучка на мишень, амплитуда ускоряющего импульса взяты из [3, 4]. На первом этапе моделирования проводился расчет распределения напряженности электрического поля в МЛУ. Второй этап, моделирование движения заряженных частиц в ИОС и расчет их траекторий, проводился с учетом распределения электрического поля и объемного заряда. На рисунке 1 показано распределение электрического поля для трех различных конструкций выходной диафрагмы ИИ. Использование крестовины или сетки на диафрагме в разной степени препятствует проникновению потенциала вглубь ИИ, что приводит к изменению траекторий

ионного пучка. На Рис.1 показано экспериментальное распределение профиля ионного пучка на поверхности мишени в зависимости от геометрии ИОС, а на Рис. 2 результаты моделирования. Показано качественное соответствие данных, полученных в расчете, с литературными данными [2].

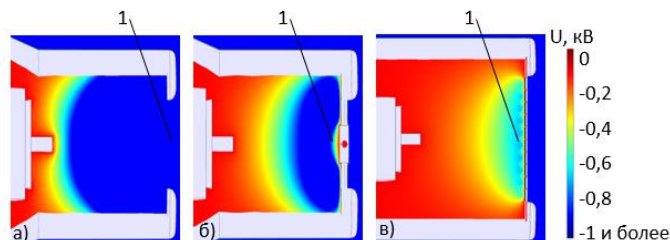


Рис. 1. Распределение потенциала вблизи ИИ. Конструкции диафрагмы 1:
а) Крестовина/сетка отсутствует; б) Крестовина; в) Плоская сетка

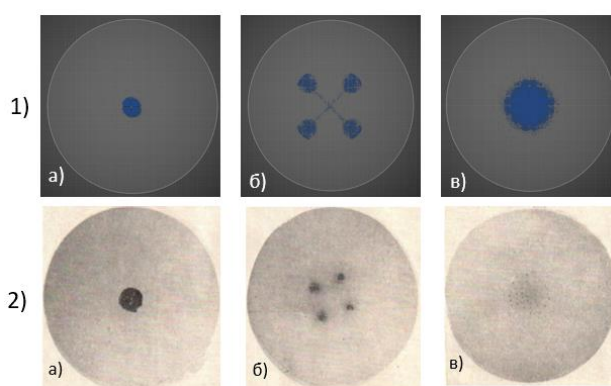


Рис. 2. Распределение пучка на поверхности мишени:
1) моделирование; 2) эксперимент [2]
а) Крестовина/сетка отсутствует; б) Крестовина; в) Плоская сетка

Вариант геометрии ИОС с отсутствием сетки/крестовины формирует на мишени профиль в виде густого пятна. Наличие крестовины способствует формированию 4-х интенсивных пятен на мишени. Интенсивность каждого отдельного пятна примерно в 4 раза меньше, чем интенсивность пятна с отсутствием сетки/крестовины. Применение плоской сетки с квадратными ячейками способствует более равномерному покрытию мишени. Расчетная модель подходит для первичных оценок ионной оптики МЛУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кириянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 123–128.
2. *Бессарабский Ю.Г., Овсянников С.Б., Суховеев С.П.* // Приборы и техника эксперимента – 1977. – № 3. – С. 232–234.
3. *Shmelev D.L., Barenholts S.A., Shchitov N.N.* // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40. – No. 18. – P. 783–786.
4. *Юшков Г.Ю., Николаев А.Г.* // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – № 23. – С. 74–81.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОТОК В СОПЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ГАЗОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

THE NOZZLE GEOMETRY INFLUENCE ON THE FLOW IN THE HIGH VOLTAGE ARC EXTINGUISHING DEVICE

Аверьянова С. А., Куракина Н. К., Образцов Н. В., Тонконогов Е. Н.,
Жилиготов Р.И.

Averyanova S. A., Kurakina N. K., Obraztsov N. V., Tonkonogov E. N.,
Zhiligotov R.I.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
e-mail: obraztsov_nv@spbstu.ru*

На отключающую способность дугогасительных устройств газонаполненного коммутационного оборудования геометрическое воздействие на поток оказывает существенное влияние, поскольку поток интенсивно взаимодействует с остаточным следом дуги отключения, отводя от нее энергию и способствуя восстановлению прочности межконтактного промежутка. В работе рассмотрена дуга отключения в сопловом канале и показана взаимосвязь отключающей способности дугогасительного устройства и угла полураствора диффузора при ограниченном перепаде давления, характерном для дугогасительных устройств.

The interruption ability of the gas-blast extinguishing arc devices is significantly affected by the flow effects which are dependent on the geometric of the nozzle. The gas flow intensively interacts with the decaying arc, removing energy from it and the dielectric strength recovery after the current zero restore. The decaying arc in the nozzle channel the relationship between the interruption ability of the gas-blast extinguishing arc devices and the diffuser angle at a limited pressure ratio are discussed.

Газовые дугогасительные устройства (ДУ) широко применяются в аппаратах высокого напряжения. В ДУ, с учетом современных тенденций повышения номинальных параметров на один разрыв, требуется интенсификация разрушения остаточного следа дуги отключения при ограниченной длительности газового дутья. Параметры потока в диффузоре особенно сильное влияние оказывают на процесс отключения в тепловой фазе пробоя, когда пробой идет по остаточному следу дуги, что характерно для режимов отключения неудаленного короткого замыкания. В этот период процесс восстановления прочности межконтактного промежутка зависит от давления в потоке [1].

На формирование потока в диффузоре угол полураствора диффузора оказывает существенное влияние. В ДУ высоковольтных выключателей (ВВ) этот угол варьируется от 5° до 15° . В настоящей работе проведено численное исследование процесса отключения дуги в ДУ продольного дутья, геометрия которого показана на рис.1. Пунктирной линией обозначена граница расчетной области. Рассмотрены процессы в нуле тока при $di/dt = -5 \text{ А/мкс}$ с использованием модели для

анализа восстановления прочности межконтактного промежутка при турбулентной дуге отключения [2]. Угол полураствора, α , в расчетах варьировался от 2° до 30° . Перепад давления обеспечивал расчетный режим работы сопла при $p_{\text{вход}}=3\text{атм}$.

Нормированные расчетные значения отключающей способности приведены на рис.2, вместе с аппроксимационной кривой для расчетных данных. В качестве базового параметра при нормировке используется величина du/dt при $\alpha=15^\circ$. Уменьшение отключающей способности при углах менее 15° связано с малыми значениями числа Маха в диффузоре, обусловленными, как величиной угла полураствора, так и наличием дуги, которая за счет подвода тепла сдвигает звуковую линию от горловины в диффузор. При углах более 15° переход через скорость звука при наличии дуги отключения происходит в окрестности горловины, отключающая способность уменьшается вследствие уменьшения давления в диффузоре.

В работе показано, что угол полураствора ДУ высоковольтного коммутационного оборудования оказывает влияние на процессы распада плазмы дуги в нуле тока и восстановления электрической прочности межконтактного промежутка.

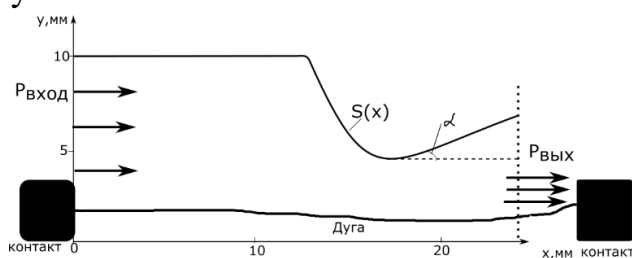


Рис. 1. Геометрия проточной части для проведения численного эксперимента

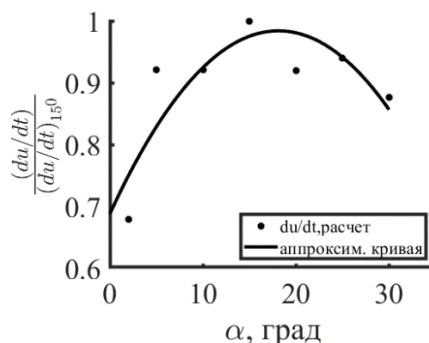


Рис. 2. Нормированная кривая отключающей способности

Работа выполнена в рамках темы исследований по государственному заданию FSEG-2023-0012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seeger M., Naidis G., Steffens A., Nordboard H., Claessens M. Investigation of the dielectric recovery in synthetic air in a high voltage circuit breaker // J.Phys. D: Appl. Phys. – 2005. – No. 38. – P. 1795–1804.
2. Averianova S., Akatnov N., Tonkonogov E. Numerical Modeling of the decaying arc // VII International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology” (Minsk, 17–21 September, 2012). – Minsk: Kovcheg, 2012. – P. 655–658.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В ПОТОКЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА

NUMERICAL INVESTIGATION OF A SPHERICAL PARTICLE DRAG COEFFICIENT IN A DC PLASMA TORCH THERMAL PLASMA FLOW

Мурашов Ю.В., Образцов Н.В., Куракина Н.К., Жилиготов Р.И., Кожубаев Ю.Н.

Murashov Yu.V., Obraztsov N.V., Kurakina N.K., Zhiligotov R.I., Kozhubaev Yu.N.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
e-mail: zhiligotov_ri@spbstu.ru*

В работе представлено исследование трассировки и нагрева частицы Al_2O_3 в потоке термической плазмы, генерируемой дуговым плазмодотроном постоянного тока. Разработана двухмерная нестационарная математическая модель, позволяющая осуществить параметрическое исследование влияния загрузки плазменного потока и расхода транспортирующего газа на распределение скорости и температуры плазменного факела. Представлены результаты расчетов траектории движения напыляемого порошка для разных моделей расчета коэффициента лобового сопротивления частиц (Стокса, Озеена, стандартной корреляции сопротивления и др.), также выполнено исследование модели, предлагаемой Дресвиным [1], и авторской модели, полученной на основе результатов численного моделирования частицы в неизотермическом потоке. На основе результатов моделирования выполнен сравнительный анализ и представлены диапазоны применимости моделей.

A numerical study of an Al_2O_3 particles tracing and heating in a thermal plasma flow generated by a DC plasma torch is presented. A two-dimensional non-stationary mathematical model has been developed that makes it possible to carry out a parametric study of the effect of loading the plasma flow and the transporting gas flow rate on the velocity and temperature distribution. The obtained results of the powder motion trajectory for different drag coefficient evaluation models (Stokes, Oseen, the standard drag correlation and etc.) are presented, in addition, the model proposed by Dresvin [1] and the author's model received from numerical simulation results of a particle in a thermal flow are investigated. A comparative analysis based on the simulation results is performed and the applicability ranges of models are presented.

Применение устройств, генерирующих термическую плазму, получило широкое распространение в промышленности [2]. Основными примерами применения дугового разряда являются плазменное напыление, дуговая сварка и плазменная резка металлов. Технология плазменного напыления заключается в плавлении напыляемого материала в плазменном потоке для нанесения на рабочую поверхность. Данная технология используется для нанесения восстанавливающих, жаростойких, антикоррозийных, износостойких и антифрикционных покрытий.

Развитие современной вычислительной техники позволяет не только осуществить численное исследование работы отдельных компонентов технологической установки, но и разработать цифровой двойник технологического процесса. В работе [3] представлены результаты моделирования работы плазмотрона совместно с источником питания, следующим этапом на пути создания цифрового двойника является разработка численной модели трассировки и нагрева частицы в плазменном потоке. В работах [1,4] авторами предложены математические модели, позволяющие описать движение частиц в потоке термической плазмы. Основным отличием предложенных моделей являются корреляционные зависимости для расчета коэффициента лобового сопротивления.

Движение частицы в потоке плазмы может быть описано с помощью второго закона Ньютона и учетом всех действующих на частицу сил. В соответствии с описанием, представленным в [1], на частицу в потоке плазмы действуют силы тяжести, аэродинамического ускорения, термофореза, присоединенной массы, Архимеда, Магнуса, Бассе, при этом движение частицы в потоке плазмы определяют силы тяжести, аэродинамического ускорения, термофореза, остальными силами можно пренебречь. При построении численной модели задана двусторонняя взаимосвязь между трассировкой и нагревом частиц и задачей тепломассопереноса неизотермического потока. В качестве начальных и граничных условий использовались результаты моделирования работы плазмотрона (подробное описание представлено в работе [3]).

Работа выполнена при поддержке РНФ грант № 22-29-20223 и Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности» соглашение №64/2022.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дресвин С.В., Зверев С.Г.* Теплообмен в плазме: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Техническая физика». – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008.
2. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления: учебное пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпози́тов». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
3. *Образцов Н.В., Мурашов Ю.В., Жилиготов Р.И., Куракина Н.К.* Гибридная модель плазмотрона постоянного тока с учетом влияния параметров источника питания // Газоразрядная плазма и синтез наноструктур: материалы III Международной конференции. – Казань: Бук, 2022. – С. 348–351.
4. *Zhu T., Baeva M., Testrich H., Kewitz T., Foest R.* Effect of a Spatially Fluctuating Heating of Particles in a Plasma Spray Process // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2023. – Vol. 43. – P. 1–24.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ЖИДКОМ АНОДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА: РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ

THE CHEMICAL COMPOSITION OF SPECIES FORMED IN A WATER ANODE UNDER THE ACTION OF A DC ELECTRIC DISCHARGE: EXPERIMENT AND SIMULATION

Шутов Д.А., Иванов А.Н., Рыбкин В.В.
Shutov D.A., Ivanov A.N., Rybkin V.V.

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, Иваново
e-mail: rybkin@isuct.ru*

В работе исследована кинетика образования пероксида водорода, нитрит и нитрат ионов, а также кинетика изменения рН в жидком водном аноде под действием разряда постоянного тока в воздухе. Для анализа и описания экспериментальных результатов предложена 0 мерная модель, включающая две подмодели, а именно подсистему плазмы разряда и растворную подсистему.

The kinetics of the formation of hydrogen peroxide (H_2O_2), nitrite (NO_2^-) and nitrate ions (NO_3^-), pH changes in an aqueous liquid anode under the action of a direct current discharge of atmospheric pressure in air were studied. To describe the obtained results and analyze them, a 0-D model of the discharge system was used, which consisted of two submodels. One of them described the discharge, and the other - the solution.

The sub-model of the discharge in air was based on the self-consistent solution of the Boltzmann equation, the equations of vibrational kinetics for the ground states of N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , NO molecules, and the equations of chemical kinetics. The electric field strengths, gas and vibrational temperatures required for these calculations were measured experimentally. Based on these calculations, the fluxes of various species arriving at the surface of the solution from the plasma were determined. Solution reactions included 28 components and 119 reactions between them. The results of calculations of the concentrations of NO_2^- , NO_3^- , and pH agree with the experiment within the limits of the latter's accuracy. The data obtained for both calculations and experiments are compared with those previously obtained for a discharge with a liquid cathode at the same discharge parameters. It was found that the concentration of H_2O_2 in the liquid cathode is two orders of magnitude higher, and the concentration of NO_2^- ions is two orders of magnitude lower than in the liquid anode. And the concentrations of NO_3^- ions are close. The action of the discharge on the liquid anode leads to higher pH values compared to the liquid cathode. The differences in concentrations are due to the fact that in a liquid cathode, an essential role in the initiation of chemical reactions is played by the bombardment of the solution surface by positive ions accelerated in the cathode

voltage drop. In a liquid anode, this factor is absent. But the reactions associated with electrons coming from the gas phase, which are solvated in solution, become significant. The data obtained explain the different chemical activity of anodic and cathode solutions in relation to the reduction of some strong inorganic oxidants and the preparation of insoluble metal hydroxo compounds.

This work was supported by Russian Science Foundation № 22-22-00372 (rscf.ru/project/22-22-00372/)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧИ-РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Герасимов А.В., Садыков И.Н.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань
e-mail: aleks_gerasimov@mail.ru, il.3120@yandex.ru

Горелки с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) могут быть с успехом использованы в широком спектре приложений, таких как плазменное напыление материалов, уплотнение и сфероидизация порошков, химический синтез наночастиц, обработка отходов оплавление, декорирование, упрочнение поверхностей, физические испытания теплозащиты космических и ракетных систем, разложение промышленных отходов и др.

Целью работы является определение скорости и температуры ВЧИ плазмы с помощью пакета программ OpenFOAM.

Для достижения поставленной цели решаются задачи:

- Смоделировать двумерную осесимметричную модель плазменной горелки.
- Определить температуру с помощью теплофизической библиотеки.
- Определить скорость с помощью rhoSimple-foam.

Директория для выполнения функций OpenFOAM показана на рисунке 1 [1].

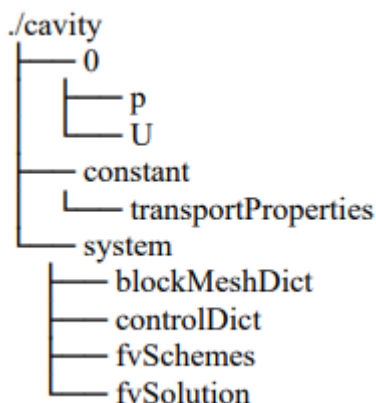


Рис. 1. Директория OpenFOAM

Используя `rho.loop`, который выполняет цикл шаг корректора, после определяем поле скорости с помощью `rhoSimple-foam`. Для определения температуры использовалась теплофизическая библиотека OpenFOAM, путем решения уравнения состояния метода Ньютона-Рафсона.

На рисунке 2 показано поле скорости и температуры [2].

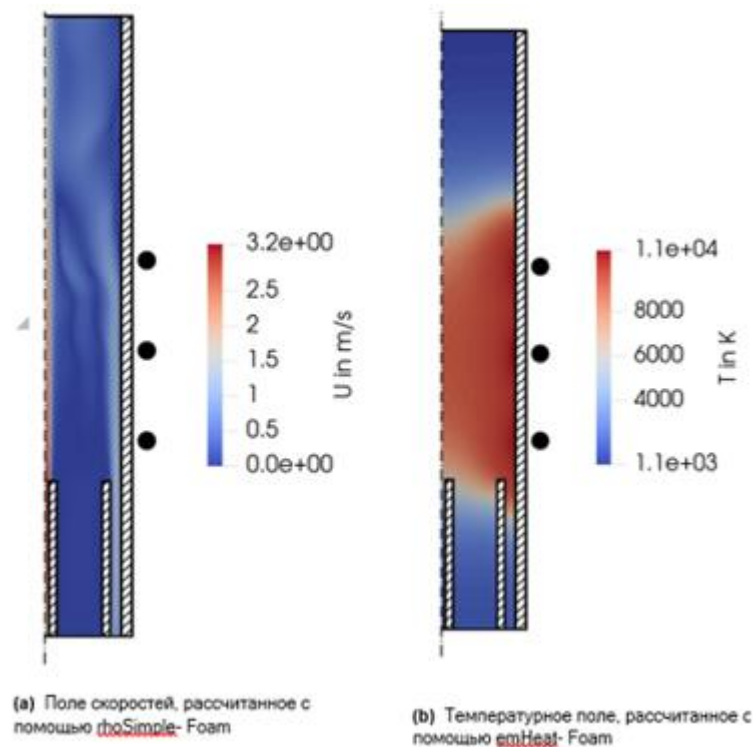


Рис. 2. Поле скорости и температуры

Хотя бесплатный инструмент OpenFOAM с открытым исходным кодом широко известен в контексте вычислительной гидродинамики, но его возможности для мультифизического моделирования и моделирования конкретных приложений практически не признаны. В этой работе представлена индивидуальная реализация для моделирования плазменной горелки с индуктивно связанной плазмой, демонстрирующая потенциал платформы OpenFOAM.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кристиан Б., Цивильский И.В., Хильдебранг Ж., Бергман Ж.П. Численное моделирование факела индуктивно-связанной плазмы с использованием OpenFOAM // *Computer and Fluids*. – 2020.
2. Иванов Д.В., Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши Расчет параметров ВЧИ- плазмотрона для спектрального анализа на основе двухтемпературной модели аргоновой плазмы // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ: материалы межвузовской научной конференции. – СПб.: Издательство СПбГТУ, 2002. – Ч. II. – С. 43–45.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВЧ-ПЛАЗМЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

MATHEMATICAL MODELING OF LOW-TEMPERATURE RF PLASMA FLOW AT REDUCED PRESSURE

Шемахин А.Ю.¹
Shemakhin A.Yu.¹

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18
e-mail: shemakhin@gmail.com*

Для исследования параметров ВЧ-плазмы пониженного давления разработана математическая модель, которая включает в себя уравнение Больцмана для несущего газа, уравнения сохранения энергии, неразрывности электронов, ионов и метастабильных атомов, Пуассона, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты электромагнитного поля, введена функция распределения электронов по энергиям, зависящая от напряженности электрического поля. Получены результаты расчетов концентрации заряженных частиц и потенциала электрического поля.

To study the parameters of a low-pressure RF plasma, a mathematical model has been developed that includes the Boltzmann equation for the carrier gas, the energy conservation equations, the continuity of electrons, ions and metastable atoms, Poisson, telegraphic equations for the RF components of the electromagnetic field, and the electron energy distribution function depending on the electric field strength. The results of calculations of the concentration of charged particles and the electric field potential are obtained.

Актуальной задачей инновационного развития промышленности и проведения качественных изменений в современном индустриальном цикле является повышение надежности, долговечности изделий из материалов органической и неорганической природы и придание им качественно новых свойств. Одним из эффективных способов усовершенствования характеристик материалов является их обработка в струе плазмы высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления [1].

Плазма ВЧ-разрядов в динамическом вакууме при давлении $p = 13.3\text{-}133$ Па применяется для модификации поверхностей различных материалов, таких как сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех и др. [2].

Плазма, создаваемая данным видом разряда, обладает следующими свойствами: степень ионизации $10^{-4}\text{-}10^{-5}$, концентрация электронов $10^{15}\text{-}10^{19}$ м⁻³, электронная температура 1-4 эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке 0.2 — 0.3 эВ, в плазменной струе 0.03 — 0.07 эВ.

Полученные экспериментальные данные [1] показывают, что исследуемый вид разряда не относится ни к одному из существующих, так как в струе ВЧ-

плазмы в вакуумной камере найдена как азимутальные H_ϕ , так и аксиальные компоненты E_z напряженностей электрического и магнитного полей, что для Н-формы разряда является нетипичным. Стоит заметить, что в разрядной камере обнаруживается только H_z и E_ϕ , то есть в разрядной камере разряд находится в Н-форме, как показывают результаты экспериментальных исследований [1]. К тому же рождение заряженных частиц происходит по всей длине вакуумной камеры, а не является потоком распадающейся плазмы. То есть струя является самостоятельным новым видом разряда, который можно называть «струйным разрядом».

Для описания струйного ВЧ-разряда в динамическом вакууме разработана математическая модель, включающая уравнение Больцмана для несущей компоненты плазмы, уравнение сохранения энергии для электронной температуры, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты плазмы, уравнение Пуассона в калибровке Лоренца для амбиполярной компоненты электромагнитного поля, уравнения неразрывности для электронов, ионов и метастабилей. Коэффициенты подвижности и диффузии определяются из функции распределения электронов по энергиям, записанной с учетом присутствия ВЧ-поля.

Таким образом, построена математическая модель, позволяющая рассчитывать основные характеристики разряда и струи, определять параметры слоя положительного заряда. В результате установлено, что при вышеуказанных режимах энергия ионов может варьироваться от 30 до 100 эВ, а плотность ионного тока от 0.5 до 15 $A \cdot m^{-2}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашанов Н.Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Издательство Казанского университета, 2000.
2. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р.* Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. – Казань: Издательство КГТУ, 2007.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА АКТИВНУЮ СРЕДУ
ЛАЗЕРА С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ
С ПОМОЩЬЮ КИНЕТИЧЕСКОЙ 0-D(T) МОДЕЛИ**

**STUDY OF THE EFFECT OF OXYGEN ON THE ACTIVE MEDIUM
OF AN OPTICALLY PUMPED RARE GAS LASER USING
THE KINETIC 0-D(T) MODEL**

Юрьев А.В., Адаменков Ю.А., Горбунов М.А., Шайдулина В.А.,
Калачева А.А.

Yuriev A.V., Adamenkov Yu.A., Gorbunov M.A., Shaidulina V.A.,
Kalacheva A.A.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
(ул. Мира, 37., г. Саров, 607190 Россия)

E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

В работе представлена кинетическая модель аргоново-гелиевой плазмы импульсного разряда постоянного тока с примесью кислорода для исследования его влияния на концентрацию метастабильных атомов аргона. Концентрация метастабильных атомов определена экспериментально методом диодной лазерной спектроскопии. Результаты измерений согласуются с проведенными расчетами.

The paper presents a kinetic model of argon-helium plasma in a pulsed DC discharge with oxygen impurities to study their effect on the concentration of metastable argon atoms. The concentration of metastable atoms was experimentally determined using diode laser spectroscopy. The measurement results are consistent with the conducted calculations.

Лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) – это новый тип газовых лазеров с оптической накачкой и высокой квантовой эффективностью, позволяющий преобразовывать высокую выходную мощность диодного лазера в выходную мощность газового лазера с хорошим качеством луча. В работе [1] была продемонстрирована первая генерация на длине волны 893,1 нм. Согласно опубликованным открытым источникам в мире произошёл серьезный скачок в изучении свойств активной среды на модели лазерного источника на смеси инертных газов с оптической накачкой. Разряд был оптимизирован и стал устойчивым при атмосферном давлении и эффективным в наработке метастабильных атомов [2,3].

В качестве активной среды ЛОНИГ используется смесь аргона (3%) с гелием (97%). Основная цель использования гелия заключается в ускорении столкновительной релаксации с уровня накачки на верхний лазерный уровень для создания наибольшей инверсии населенности.

В данной работе представлена разработка кинетической модели активной среды ЛОНИГ. Модель необходима для анализа разрядных условий, который в дальнейшем позволит оптимизировать экспериментальный стенд и произвести масштабирование для создания эффективной лазерной установки.

Кинетическая модель плазмы включает в себя частицы аргона (18 видов), гелия (5 видов) и кислорода (13 видов). В модель включено более 500 реакций, описывающих взаимодействие этих частиц. Кислород в модель добавлен для учета влияния примесей, неизбежно присутствующих в газовой системе, на кинетику разряда.

Для сравнения экспериментальных данных проведен эксперимент, в котором излучение зондирующего лазера пропусклось через активную среду. Приведено сравнение между теоретическими и экспериментальными результатами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Han J., Heave M.C.* Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37. – No. 11. – P. 2157–2159.
2. *Emmons D.J., Weeks D.E.* Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – Vol. 121. – No. 20.
3. *Han J., Glebov L., Venus G., Heaven M.C.* Demonstration of diode-pumped metastable Ar laser // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38. – No. 24. – P. 5458–5461.

УСТОЙЧИВЫЕ И НЕУСТОЙЧИВЫЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ В ВОЗДУХЕ

Доброклонская М.С.¹, Попов Д.И.^{1,2}

¹*Объединённый институт высоких температур РАН*

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

Несмотря на то, что ионные ловушки были известны с середины 20-го века, интерес к исследованию плененных заряженных пылевых частиц возник не так давно. Сегодня электродинамические ловушки являются основным компонентом многих проектов мирового значения и научно-технических приложений от прецизионных измерений при разработке атомных часов в микроволновой и оптической области [1-2], точных навигационных приборов [3] или проектов по реализации квантовых вычислительных схем [4-6]. При атмосферном давлении в воздухе ловушки позволяют исследовать характеристики отдельных плененных объектов [7] (вплоть до нанометровых масштабов), что значительно при изучении кулоновских структур [8-9], их сжимаемости и распространения в них самовозбуждающихся волн [10-11]. В воздухе электродинамические ловушки также применяются и для практических целей. определения заряда частиц [12-13], очистки различных поверхностей [14] и промышленной очистки газов [15].

Основной параметр, который следует определить в первую очередь при таких исследованиях и задачах - границы области удержания частиц в ловушках. В обычном случае для расчета границ фиксируются параметры (напряжения и частота электродов ловушки, размер частицы), при которых частицы просто вылетают из ловушки. Такой подход неудобен, трудоемок и допускает большую погрешность. Недавно был предложен [16] метод определения физических свойств частиц (размер, массу и заряд) по траектории движения частицы в электродинамической линейной ловушке Пауля при наличии аккуратного расчета. Представляется интересным применить анализ траекторий и для определения границ удержания частиц в ловушках.

В работе представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований пленения одиночной заряженной частицы в горизонтально ориентированной линейной электродинамической ловушке Пауля при атмосферном давлении в воздухе. Получены траектории устойчивого и неустойчивого движения. Обнаружено, что эти два типа траекторий отличаются характером их развития на начальном этапе при захвате частицы ловушкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Golovizin A.A.* // Quantum Electron. – 2015. – Vol. 45. – No. 482.
2. *K. Ksenia, Z. Iliia, S. Ilya, B. Alexander, K. Nikolay* // European Frequency and Time Forum (EFTF) – 2018. – pp. 377-380.
3. *Колачевский Н.Н., Хабарова К.Ю., Заливако И.В.* // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – Вып. 1. – С. 13–27.
4. *Debnath S., Linke N.M., Figgatt C.* // Nature. – 2016. – Vol. 536. – No. 63.
5. *Semerikov I.A., Zalivako I.V., Borisenko A.S.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2020. – Vol. 47. – P. 385–389.
6. *Nam Y.* // Quantum Information. – 2020. – Vol. 6.
7. *Syrovatka R.A.* // Contrib. Plasma Phys. – 2016. – Vol. 56. – No. 5. – P. 419–424.
8. *Vasilyak L.M.* // New J. Phys. – 2013. – Vol. 15. – No. 043047.
9. *Lapitskiy D.S., Filinov V.S., Deputatova L.V.* // High Temp. – 2015. – Vol. 53. – P. 1–8.
10. *Syrovatka R., Medvedev Yu., Filinov V., Vasilyak L., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V.* // Physics Letters A. – 2019. – Vol. 383. – Is. 4. – P. 338–344.
11. *Syrovatka R., Filinov V., Vasilyak L., Fortov V., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V.* // Physics Letters A. – 2019. – Vol. 383. – Is. 16. – P. 1942–1945.
12. *Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Василяк Л.М., Филинов В.С., Сыроватка Р.А., Депутатова Л.В., Владимиров В.И.* Устройство для измерения удельного заряда частиц микронного размера, № 173873, 2017.
13. *Сыроватка Р.А., Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Депутатова Л.В., Владимиров В.И.* // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – Вып. 20. – С. 30–33.
14. *Syrovatka R.A., Filinov V.S., Vasilyak L.M., Pecherkin V.Ya., Deputatova L.V., Vladimirov V.I., Popel O.S., Tarasenko A.B.* // Journal of Electrostatics. – 2021. – Vol. 112. – No. 103583.
15. *Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Филинов В.С., Василяк Л.М., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Сыроватка Р.А.* Способ удаления заряженных микрочастиц из газового потока, № 2612292, 2017.
16. *Rybin V., Rudyi S., Rozhdestvensky Y.* // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2022. – Vol. 147. – No. 104227.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВМЕСТНО С ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

NUMERICAL MODELLING OF THE MICROHOLE CATHODE DISCHARGE EVOLUTION USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN CONJUNCTION WITH AN EXTERNAL ELECTRIC CIRCUIT

Жарков Я.Е.¹, Романов К.И.¹, Шершунова Е.А.¹
Y.E. Zharkov¹, K.I. Romanov¹, E.A. Shershunova¹

¹ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186,
г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, д. 18
e-mail: yarik77794@mail.com*

Работа посвящена численному моделированию развития разряда с микрополым катодом совместно с внешней электрической цепью. По результатам численного моделирования, было получено, что напряжение зажигания в рассматриваемой электродной системе при хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Также получено, что развитие разряда при первом зажигании связано с разрядными процессам вдоль поверхности диэлектрика.

The work is devoted to numerical modeling of the microhole cathod discharge evolution together with an external electrical circuit. Based on the results of numerical simulation, it was found that the ignition voltage in the electrode system under consideration is in good agreement with the experimental results. It is also found that the development of the discharge at the first ignition is associated with discharge processes along the dielectric surface.

На сегодняшний день применение разряд с микрополым катодом (РМПК) – разряда между анодом и катодом с отверстием микронного размера, разделённого тонким слоем диэлектрика – находит применение в различных приложениях, таких как контаминация поверхности, её обработка [1,2]. Расширяющаяся область применения связана с преимуществами РМПК, такие как малая потребляемая мощность, низкие напряжения зажигания, а также компактные размеры, что делает актуальными исследования характеристик РМПК.

Для численного исследования развития РМПК для электродной системы, приведённой в [3], оценки напряжения зажигания на основе применения метода конечных элементов была создана аксиально-симметричная модель, включающая 3 уравнения конвекции–диффузии (УКД), описывающих распределение концентрации электронов и ионов обеих полярностей; уравнение Пуассона для потенциала электрического поля с учётом осевшего на поверхность диэлектрика заряда, а также 3 уравнения Гельмгольца, описывающих распределение фотоионизационного источника [4].

Источники (кроме фотоионизационного) для УКД всех компонент разряда, а также коэффициенты подвижности и диффузионные коэффициенты для УКД электронов были получены посредством численного решения уравнения Больцмана для сухого воздуха при нормальных условиях [5]. Коэффициенты подвижности и диффузионные коэффициенты для ионных компонент моделирования были учтены согласно [4].

Учёта связи потенциалов в конечно-элементной модели и электрической схемой, приведённой в [3], производился посредством введения источника тока, значение тока которого определялось посредством интегрирования объёмной энергии на упругие и неупругие соударения электронов. На рис. 1 приведена компоновка электрической схемы, а также схематичное изображение конечно-элементной модели. Напряжение источника питания $U_{ист}$ составляло -1750 В, сопротивление зарядного резистора R_3 – 190 кОм, геометрическая ёмкость разрядной системы – 14 пФ.

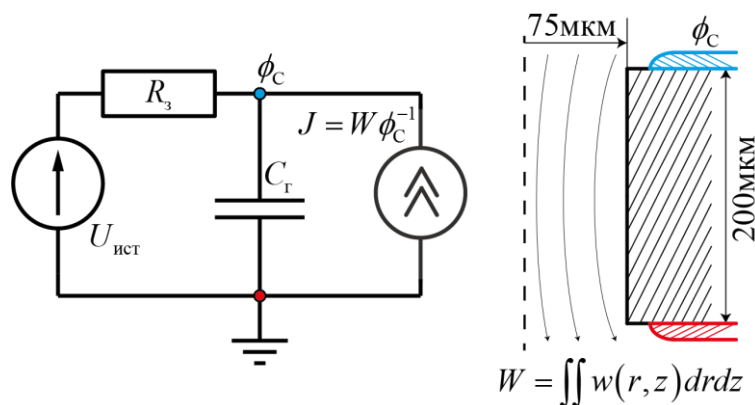


Рис. 1. Внешняя электрическая цепь, схематическое изображение электродной системы

По результатам численного моделирования, было получено, что напряжение зажигания в рассматриваемой электродной системе при нормальных условиях схеме хорошо согласуется с экспериментальными результатами [3]. Также было получено, что для первого зажигания в приведённой электродной системы развитие разряда в начальные моменты времени связано с разрядными процессами вдоль поверхности диэлектрика и зарядкой диэлектрической поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schoenbach K.H. // Plasma Sources Science and Technology – 1997. – Vol. 6. – No. 4. – P. 468.
2. Witvrouwen T., Paulussen S., Sels B. // Plasma Processes and Polymers – 2012. – Vol. 9. – No. 8. – P. 750.
3. Мошкунев С.И. // Прикладная физика. – 2021. – № 5. – С. 11.
4. Shaygani A., Adamiak K. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022.
5. Morgan database. – URL: www.lxcat.net/ (дата обращения: 14.04.2023).

МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ ОБРАЗЦА ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ ВЧИ-РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

MODEL OF LOW-PRESSURE RF PLASMA FLOW AROUND A SAMPLE

Лазарев Е.Н., Желтухин В.С.

Lazarev E.N., Zheltukhin V.S.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
РФ, Казань, ул. К.Маркса, 68, 420015
e-mail: evgenln11401@gmail.com*

Построена гибридная математическая модель обтекания образца струей ВЧИ-разряда в диапазоне давлений от 13,3 до 133 Па при расходе плазмообразующего газа до 0,2 г/с. Модель состоит из кинетического уравнения Больцмана для потока нейтрального газа, уравнений непрерывности для заряженных и возбужденных частиц, и уравнения Пуассона для электрического потенциала. Представлены численный метод и предварительные результаты расчетов характеристик потока плазмы.

A hybrid mathematical model is constructed for an inductively coupled RF discharge jet flow around a sample in the pressure range from 13.3 to 133 Pa, and a plasma gas flow rate of up to 0.2 g/s. The model consists of a Boltzmann kinetic equation for a neutral gas flow, continuity equations for charged and excited particles, and the Poisson equation for the electric potential. A numerical method as well as preliminary results of calculations of the plasma flow characteristics are presented.

Высокочастотный индукционный (ВЧИ) разряд с продувом газа в диапазоне давлений 13.3–133 Па эффективно используется для обработки различных материалов с целью повышения функциональных и эксплуатационных свойств изделий [1]. Механизм модификация поверхности образцов происходит в результате слабоинтенсивной низкоэнергетичной ионной бомбардировки (плотность ионного тока на поверхность образца $j_i = 0,5 - 1,5 \text{ А/м}^2$, энергия ионов $W_i = 30 - 100 \text{ эВ}$) [2]. Ионный поток формируется в окрестности образца вследствие образования слоя положительного заряда (СПЗ), аналогично приэлектродному слою высокочастотного емкостного разряда [3].

Экспериментальные исследования [4, 5] показали, что свойства модифицированных материалов нелинейно зависят от расхода газа – существует оптимальный расход, при котором наблюдаются максимальные изменения характеристик поверхности. Для выяснения причин нелинейной зависимости и оптимизации режимов обработки разработана математическая модель обтекания образца потоком плазмы ВЧИ-разряда пониженного давления. Модель разработана для следующих условий горения разряда в потоке аргона: частота поля $f=1,76 \text{ МГц}$, давление газа $p=13,3-133 \text{ Па}$, мощность разряда $P_d=0.5-5 \text{ кВт}$, расход газа $G=0,01-0.2 \text{ г/с}$ [1].

Образец моделируется цилиндром радиусом 5 мм и высотой 2 мм. Толщина СПЗ возле образца, согласно теоретическим оценкам и экспериментальным данным [2], составляет до $A_{sh}=5$ мм. Резкой границы между невозмущенной ВЧИ-плазменной струей и СПЗ нет, поэтому для плавного сопряжения параметров СПЗ с характеристиками окружающего пространства граница расчетной области выбирается на расстоянии $d_{sh} = (5 - 10) \cdot A_{sh}$ от поверхности образца. Таким образом, область решения задачи является двусвязной.

Оценки показывают, что число Кнудсена для течения нейтрального газа $1,6 \cdot 10^{-2} \leq Kn \leq 4,8 \cdot 10^{-1}$, для электронного газа $10^{-3} \leq Kn_e \leq 10^{-1}$, для ионов $5 \cdot 10^{-4} \leq Kn_i \leq 5 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, в струе плазмы ВЧИ-разряда пониженного давления реализуется гибридный режим, в котором сочетаются переходный режим течения нейтральной компоненты и течения сплошной среды заряженных частиц и метастабилей.

В связи с этим, модель включает в себя: кинетические уравнения Больцмана для потока нейтральных атомов в основном состоянии, уравнения непрерывности для электронного и ионного газа, газа метастабильных атомов, сохранения энергии электронов, уравнение для электрического потенциала. Пространственные распределения электрической и магнитной напряженностей ВЧ электромагнитного поля предполагаются заданными на основании результатов моделирования плазменной струи [6].

На границе расчетной области ставятся условия сопряжения так, чтобы сохранялась непрерывность концентраций частиц и электрического потенциала. На поверхности образца граничные условия задаются в соответствии с физическими процессами, происходящими при взаимодействии плазменной струи с поверхностью.

Представлены алгоритм численного расчета и результаты предварительных расчетов по построенной модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашипов Н.Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Издательство Казанского университета, 2000.
2. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В.* // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – Т. 3.
3. *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.* Высокочастотный емкостный разряд. Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: Издательство МФТИ, 1995.
4. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В.* // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – Т. 3. – № 14.
5. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В., Сагбиев И.Р., Шарафеев Р.Ф.* // Перспективные материалы. – 2008. – Т. 6. – № 88.
6. *Shemakhin A.Y., Zheltukhin V.S.* // *Advances in Materials Science and Engineering.* – 2019. – No. 7120217.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИМПУЛЬСНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ГИН 7 МВ

DEVELOPMENT OF A PULSE VOLTAGE GENERATOR 7 MV DIGITAL MODEL

Жилиготов Р.И.¹, Образцов Н.В.¹, Куракина Н. К.¹, Мурашов Ю.В.¹
Zhiligotov R.I.¹, Obraztsov N. V.¹, Kurakina N. K.¹, Murashov Yu. V.¹

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
e-mail: zhiligotov_ri@spbstu.ru*

В настоящей работе предлагается цифровая модель испытательной установки генератора импульсных напряжений СПбПУ Петра Великого (ГИН) суммарным зарядным напряжением до 7 МВ, выполненная в пакете MATLAB/Simulink, с целью получения заданных характеристик импульсного напряжения, что приближает последующие испытания к натурным воздействиям молнии и повышает достоверность полученных результатов. Выполнен анализ разработанной модели и анализ чувствительности параметров схемы.

In this paper, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University pulse voltage generator model with a total charging voltage of up to 7 MV is proposed in the MATLAB/Simulink package. The main aim of the study is to obtain the specified characteristics of the pulse voltage via numerical simulation, which brings subsequent tests closer to the full-scale effects of lightning and increases the reliability of the results obtained. The analysis of the developed model and the sensitivity of the circuit parameters are performed.

При создании новых технологий в электроэнергетике необходимо повысить надежность эксплуатации различного оборудования в неблагоприятных климатических условиях. С ростом глобального потепления усиливается грозовая активность. Проблема защиты электрооборудования от атмосферных перенапряжений требует усовершенствования технологии проведения сверхвысоковольтных испытаний. Кроме улучшения классических способов испытаний (форма импульсной волны в соответствии с ГОСТ Р 55630-2013) необходимо прибегать к новым возможностям испытаний, которые касаются формы испытываемых напряжений.

Как правило, для получения импульсных испытательных напряжений используются генераторы импульсных напряжений (ГИН), работающие на известной схеме умножения Маркса. На территории Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого расположен один из самых мощных комплексов ГИН в Российской Федерации с суммарным зарядным напряжением до 7 МВ, запасаемая энергия до 560 кДж. Установка предназначена для всех об-

ластей высоковольтной испытательной техники, включая исследования прочности изоляции различного электрооборудования (силовых трансформаторов, выключателей, изоляторов и т.д.), направленных на создание и расчёты габаритов изолирующих участков и определение изоляционных способностей оборудования [1]; изучения проводящих свойств грунта с помещенными в него электродами молниезащитных устройств [2]; испытания несущих элементов конструкции летательных аппаратов на молниепоражаемость [3].

Разработанная цифровая модель (Рисунок 1) позволяет выполнить анализ длительности, скорости нарастания фронта импульса напряжения и провести параметрическое исследование для интенсификации характерных режимов работы ГИНа, включая заряд со сменой полярности, разряд с различными параметрами.

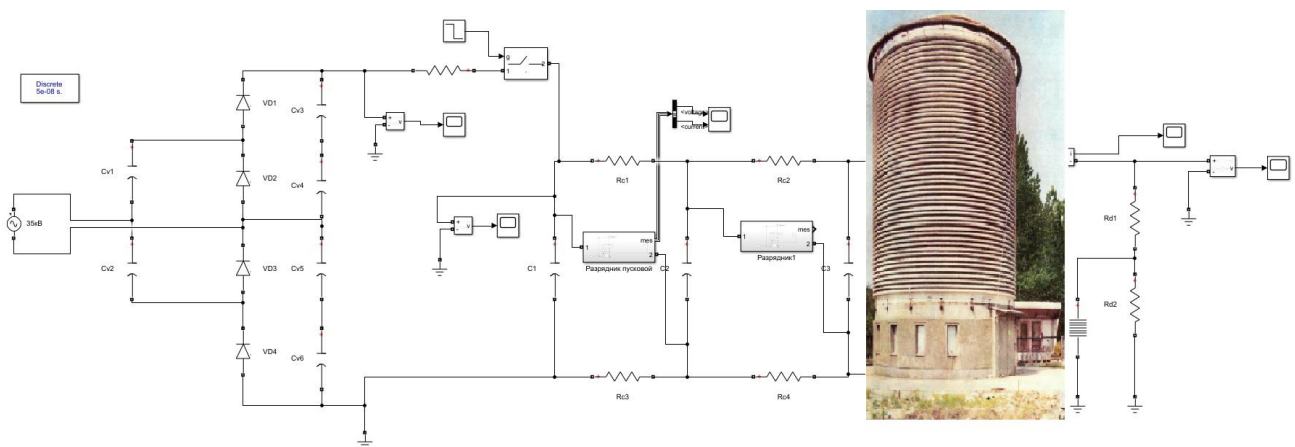


Рис. 1. Схема цифровой модели ГИН 7МВ, СПбПУ, С.-Петербург

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2007. – 280 с.
2. Смирнов В.П., Фортон В.Е., Сон Э.Е. Мобильная установка на основе генератора импульсного напряжения для исследования влияния токового импульса на сопротивление грунта // Сборник докладов V Российской конференции по молниезащите (Санкт-Петербург, 17–19 мая 2016 г.). – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2016. – С. 272–282.
3. Wang F., Ma X., Zhang Y., Jia S. Lightning Damage Testing of Aircraft Composite-Reinforced Panels and Its Metal Protection Structures // Appl. Sci. – 2018. – No. 8. – P. 1791.

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ,
ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПРОБОЕМ
ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГАЛОГЕНИДОВ БОРА**

**GAS-DYNAMIC SIMULATION OF A PLASMA INDUCED BY LASER
OPTICAL BREAKDOWN FOR THE HYDROGEN
REDUCTION OF BORON HALIDES**

Корнев Р.А., Шабарова Л.В., Ермаков А.А.

Kornev R.A., Shabarova L.V., Ermakov A.A.

*ИХВВ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород,
ул. Тropicина, 49
e-mail: romanakornev@gmail.com*

Предложена методика моделирования газодинамических и тепловых условий в низкотемпературной аргоно-водородной плазме, индуцированной лазерным пробоем. Выполнены вычислительные эксперименты для процесса водородного восстановления фторида бора в LIBS-разряде. Проведена валидация разработанной методики результатами физических экспериментов. Исследованы особенности нагрева газовой смеси в LIBS реакторе. Установлено, что режим течения носит выраженный нестационарный характер.

A technique for modeling gas-dynamic and thermal conditions in a low-temperature argon-hydrogen plasma induced by laser breakdown is proposed. Computational experiments have been performed for the hydrogen reduction of boron fluoride in a LIBS discharge. The developed technique was validated by the results of physical experiments. The features of gas mixture heating in the LIBS reactor were studied. It is established that the flow regime has a pronounced unsteady character.

Исследования газодинамики процесса плазмохимического восстановления галогенидов бора в плазме, индуцированной лазерным пробоем проведено для кварцевого реактора цилиндрической формы. При нагреве газовой смеси в LIBS-разряде решается нестационарная задача о гомогенном движении смеси вязких сжимаемых идеальных газов в неоднородном температурном поле с учетом теплообмена посредством теплопроводности и конвекции. Влияние радиационных потерь в плазме в модели не учитывается. Режим течения газа полагается ламинарным. Ввиду осевой и радиальной симметрии плазмохимического реактора задача решается в двумерной постановке.

Предложена методика моделирования газодинамических и тепловых условий в низкотемпературной аргоно-водородной плазме, индуцированной лазерным пробоем. Модель включает гомогенное течение смеси идеальных вязких сжимаемых газов с учетом импульсного лазерного нагрева и теплопередачи посредством конвекции и теплопроводности.

Выполнены вычислительные эксперименты для процесса водородного восстановления фторида бора в LIBS-разряде. По результатам вычислительных экспериментов определены тепловые и кинетические условия импульсного лазерного нагрева плазмы при вводе в плазмотрон смесей газов BF_3+3H_2 ; BCl_3+3H_2 ; $\text{BF}_3+\text{Ar}+3\text{H}_2$; $\text{BCl}_3+\text{Ar}+3\text{H}_2$.

Проведена валидация разработанной методики результатами физических экспериментов. Установлено, что предложенная математическая модель адекватно отражает динамику формирования газового разряда и может быть использована в качестве инструмента для анализа газодинамики LIBS-плазмотронов.

Исследованы особенности нагрева газовой смеси в LIBS реакторе. Установлено, что режим течения носит выраженный нестационарный характер. В первые несколько микросекунд после лазерного пробоя в газовой смеси формируется ударная волна, со сверхзвуковым режимом движение газа и высоким градиентом температур и давлений за ударным фронтом. С течением времени движение устанавливается, тепловые и кинетические условия в реакторе выравниваются, и в конце временного периода между лазерными пробоями температура, давление и скорость газа уменьшаются практически до исходных значений.

Работа выполнена при поддержке государственного задания министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0095-2019-0008.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ НА НАРАБОТКУ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ АРГОНА Ar (s_5) В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В Ar-He СМЕСИ

ENERGY COST FOR THE PRODUCTION OF METASTABLE ARGON ATOMS Ar (s_5) IN A REPETITELY-PULSED DISCHARGE IN AN Ar-He MIXTURE

Загидуллин М.В.^{1,2}, Михеев П.А.¹, Дворников А.Д.²
Zagidullin M.V.¹, Mikheyev P.A.¹, Dvornikov A.D.²

¹Самарский филиал ФИАН, Россия, Самара, 443011

²Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева, Россия, Самара, 443086
e-mail: zagidullin_marsel@rambler.ru

Рассчитана удельная мощность наносекундного импульсно-периодического разряда в смеси Ar-He при атмосферном давлении, необходимая для получения концентрации метастабильных атомов аргона 10^{13} см⁻³ в зависимости от длительности, формы и частоты импульсов разряда.

Specific power of a nanosecond repetitively-pulsed discharge in an Ar-He mixture at atmospheric pressure required to obtain the number density of argon metastable atoms of 10^{13} cm⁻³ is calculated with dependence on the duration, shape and repetition rate of discharge pulses.

Импульсно-периодический разряд (ИПР) в смеси инертных газов атмосферного давления с длительностью импульсов от единиц до сотен наносекунд с высокой частотой повторения импульсов (≥ 100 кГц) является эффективным способом получения квазинепрерывной слабоионизованной однородной плазмы, которая представляет интерес для ряда применений [1, 2]. Минимизация энергетических затрат на наработку необходимой концентрации метастабильных атомов инертного газа играет важную роль для увеличения объема разрядной камеры и повышения устойчивости разряда.

В 0-D приближении проведен расчет зависимости удельной мощности ИПР в смеси Ar-He=1:99 атмосферного давления от длительности, частоты повторения и амплитуды импульсов электрического поля разряда. При высокой скважности импульсов, но частоте повторения импульсов ~ 100 кГц в ИПР существенную роль играют плазмохимические процессы, кинетика которых в период послесвечения формируют к следующему импульсу распадающуюся плазму. В расчетах учитываются 10 реакций электронного удара во время импульса разряда и 31 плазмохимическая реакция в период послесвечения. Начальное условие задаётся в виде достаточно высокой однородной ионизации. Устойчивое периодическое решение получается через 100-200 импульсов. При фиксации вре-

менной формы импульсов средняя концентрация $Ar(s_5)$ в плазме является функцией трех параметров: длительности импульсов t_p , частоты их повторения f и амплитуды приведенной напряженности поля E/N . На рисунке 1 представлена зависимость необходимой частоты повторения импульсов треугольной формы от амплитуды отношения E/N при различной длительности для наработки в среднем 10^{13} см^{-3} атомов $Ar(s_5)$. На рисунке 2 показана зависимость удельной тепловой мощности, которая выделится при этих условиях. Видно, что для заданной длительности импульса существует пара значений $(f, E/N)$, при которой мощность тепловыделения минимальна.

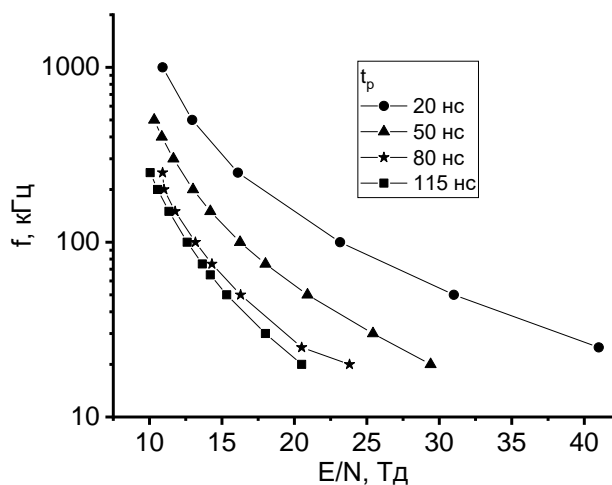


Рис. 1. Зависимость требуемой частоты f повторения импульсов от амплитуды E/N при различной длительности для наработки 10^{13} см^{-3} атомов $Ar(s_5)$

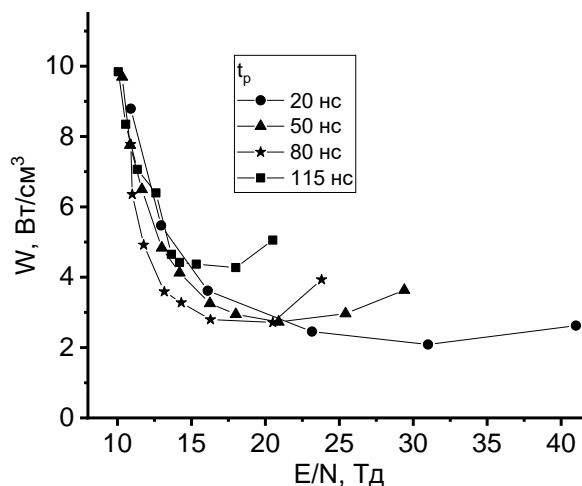


Рис. 2. Зависимость удельной тепловой мощности разряда W , выделяемой при наработке 10^{13} см^{-3} атомов $Ar(s_5)$ от амплитуды E/N при различной длительности импульсов

ЛИТЕРАТУРА

1. *J. Han, M.C. Heaven, P.J. Moran, G.A. Pitz, E.M. Guild, C.R. Sanderson, B. Hokr // Optics letters. – 2017. – Vol. 42. – No. 4627.*
2. *P.A. Mikheyev, A.K. Chernyshov, M.I. Svistun, N.I. Ufimtsev, O.S. Kartamysheva, V.N. Azyazov // Optics express. – 2019. – Vol. 27. – No. 38759.*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМОТРОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON GAS DYNAMIC PROCESSES IN AN ALTERNATING CURRENT PLASMA TORCH

Образцов Н.В.^{1,2}, Быков Н.Ю.^{2,1}, Суров А.В.^{2,3}, Хватов А.А.², Маслаев А.М.²
Obraztsov N.V.^{1,2}, Bykov N.Y.^{2,1}, Surov A.V.^{2,3}, Hvatov A.A.², Maslyaev A.M.²,

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251*

²*Университет ИТМО, Россия, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., Санкт-Петербург, 197101*

³*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, Дворцовая набережная, дом 18, Санкт-Петербург, 191186
e-mail: obraztsovnikita@yandex.ru*

Разработана гибридная трехмерная модель течения плазмообразующего газа в плазмотроне переменного тока. Модель предполагает решение уравнений Навье-Стокса совместно с уравнением для потенциала электрического поля. и учитывает эффекты вращения пятна привязки дуги. Уравнение движения привязки дуги восстановлено по экспериментальным данным с использованием метода генеративного дизайна модели в виду дифференциального уравнения. Расчеты течения выполнены с использованием пакета Comsol Multiphysics. Рассмотрено влияние действующего напряжения на электродах и расхода плазмообразующего газа на параметры течения. Исследованы особенности тангенциальной подачи газа в рабочий канал плазмотрона.

A hybrid three-dimensional model of the flow of plasma-forming gas in an alternating current plasma torch has been developed. The model assumes the solution of Navier-Stokes equations together with the equation for the electric field potential and takes into account the rotation effects of the arc root. The equation of motion of the arc root is reconstructed from experimental data using the generative model design method in the form of a differential equation. Flow calculations were performed using the Comsol Multiphysics package. The influence of the effective voltage at the electrodes and the flow rate of the plasma-forming gas on the flow parameters is considered. The features of tangential gas feeding into the working channel of the plasma torch are investigated.

Генераторы термической плазмы находят применение в перспективных плазменных технологиях, направленных на повышение эффективности использования углеводородных топлив, и на получение водорода [1,2]. Развитие этих направлений, а также технологий синтеза материалов или переработки отходов с использованием плазмотронов переменного тока требует оценки газодинамических параметров течения плазмообразующего газа в “рабочем” объеме. В зависимости от вида технологии “рабочим” объемом могут быть внутренние каналы плазмотрона, внешняя по отношению к каналам область расширения струи в реакторе, либо обе области одновременно. Экспериментальное исследование

высокоэнтальпийных течений затруднено из-за больших температур газа в дуге и реакторе, поэтому компьютерное моделирование является основным источником знаний о плазмодинамических процессах [3,4].

Настоящая работа посвящена построению трехмерной модели течения плазмообразующего газа в плазмотроне переменного тока. Необходимость рассмотрения задачи в 3D постановке связана, во-первых, со спецификой тангенциальной подачи газа в рабочий канал плазмотрона, а, во-вторых, с взаимным пространственным расположением каналов в случае трехфазного плазмотрона переменного тока. Для учета процессов перемещения дуговой привязки по поверхности электрода плазмотрона использованы дифференциальные уравнения, восстановленные по экспериментальным данным с использованием методов генеративного дизайна аналитических моделей [5].

Выполнено теоретическое исследование плазмодинамических процессов в плазмотроне с полым электродом. Плазмообразующим газом является воздух. Рассмотрено влияние действующего напряжения на электродах, расхода газа, геометрии подачи газа в плазмотрон на параметры течения в канале и области расширения плазменной струи.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru). Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (грант № 21-11-00296, <https://rscf.ru/project/21-11-00296/>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou R., Zhao Y., Zhou R. Plasma-electrified up-carbonization for low-carbon clean energy // Carbon Energy. – 2022. – P. 1–46.
2. Fulcheri L., Rohani V.-J., Wyse E., Hardman N., Dames E. An energy-efficient plasma methane pyrolysis process for high yields of carbon black and hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 48. – Is. 8. – P. 2920–2928.
3. Bykov N.Y., Obraztsov N.V., Kobelev A.A., Surov A.V. Modeling of an AC Plasma Torch – Part I: Electrical Parameters and Flow Temperature // IEEE transactions on plasma science. – 2021. – Vol. 49. – Is. 3. – P. 1017–1022.
4. Bykov N.Y., Obraztsov N.V., Kobelev A.A., Surov A.V. Modeling of an AC Plasma Torch – Part II: Gasdynamic Pattern and Effect of Flow Rate // IEEE transactions on plasma science. – 2021. – Vol. 49. – Is. 3. – P. 1023–1027.
5. Bykov N.Y., Obraztsov N.V., Hvatov A.A., Maslyaev M.A., Surov S.A. Hybrid modeling of gasdynamic processes in AC plasma torches // Materials Physics and Mechanics. – 2022. – Vol. 50. – Is. 2. – P. 287–303.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

MATHEMATICAL MODELING OF THE INTERACTION OF A LOW-PRESSURE, HIGH-FREQUENCY PLASMA WITH METALLIC NANOPARTICLES

Панкова Е.А., Желтухин В.С., Шаехов М.Ф., Рахматуллина Г.Р.,
Шагивалиева Р.Р.

Pankova E.A., Zheltukhin V.S., Shaekhov M.F., Rakhmatullina G.R.,
Shagivalieva R.R.

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Россия 420015, Казань, ул.К.Маркса, 68
Kazan National Research Technological University, 68 K. Marx St., Kazan, Russia
e-mail: Gulnaz-f@yandex.ru*

Целью работы являлось исследование теоретических аспектов воздействия плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления на процессы нанесения наночастиц серебра из коллоидного раствора на натуральные высокомолекулярные материалы. Установлено, что трех периодов колебания электромагнитного поля достаточно для активации наночастиц серебра, что обеспечивает возможность формирования комплексных соединений серебра с коллагеном и кератином. Кроме того, применение высокочастотной плазмы обеспечивает перемещение наночастиц к поверхности материала и равномерное их распределение. Построена математическая модель данного воздействия.

The aim of the work was to study theoretical aspects of the impact of high-frequency induction discharge plasma of reduced pressure on the processes of silver nanoparticles deposition from colloidal solution on natural high-molecular materials. It was found that three periods of electromagnetic field oscillation are sufficient to activate silver nanoparticles, which provides the possibility of formation of complex compounds of silver with collagen and keratin. In addition, the use of high-frequency plasma provides the movement of nanoparticles to the surface of the material and their uniform distribution. A mathematical model of this effect is built.

Перспективным направлением исследования является применение наноразмерных компонентов, позволяющих придать материалам уникальные по своим показателям свойства (гидрофобность, грязеотталкивание, прочность, бактерицидность и т.д.), причем обеспечивает их комплексное улучшение. Так как меховые материалы находятся в постоянном контакте с человеком, то выбор наноразмерного компонента базировался на его безопасности. Для обработки выбран коллоидный водный раствор наночастиц серебра «Агбион-2».

В ряде исследовательских работ [1-3] показана возможность применения ВЧИ плазмы в качестве инструмента нанесения наночастиц. В этой связи с целью обеспечения равномерности распределения наночастиц и их прочной фиксации

на поверхности мехового материала предложено использование высокочастотной плазмы индукционного разряда (ВЧИ) пониженного давления при частоте генератора $f=1,76$ МГц, давлении плазмообразующего газа $p=30$ Па. Оптимальные параметры ВЧИ плазменной обработки (мощность разряда $W_p=0.75$ кВт; расход газа $G=0.06$ г/с; время обработки $\tau=3$ мин) определены с помощью пакета программ «STATISTICA 10.0».

Моделирование основывалось на предположении, что наночастицы Ag имеют скорость, равную скорости плазмообразующего газа, таким образом, в локальной системе координат, связанной с наночастицей серебра, ионы неподвижны, так как в силу своей массы они не успевают реагировать на изменение направления электрического поля, тогда как электроны, перемещаясь с потоком газа, совершают колебания относительно наночастицы синфазно с изменением напряженности электрического поля. При этом, так как электрическое поле в ВЧИ-разряде имеет только азимутальный компонент E_φ , то колебания электронов происходят в плоскости, перпендикулярной потоку газа в разрядной трубке.

При указанном выше расходе газа, скорость потока плазмы в разрядной трубке составляет 150-500 м/с. На вход в разрядную трубку подается нейтральный газ при температуре 300 К. В области индуктора в разрядной трубке образуется плазменный сгусток, в котором температура газа достигает $(3-4) \cdot 10^3$ К, а концентрация электронов – $10^{19}-10^{20}$ м⁻³ [1].

В результате моделирования установлено, что в течение 1-3 периодов колебания электромагнитного поля происходит полное распыление наночастицы на атомы Ag и ионы Ag⁺. Энергия ионизации атомов серебра равна 7.5 эВ, что более, чем в 2 раза меньше энергии ионизации атома аргона (15.76 эВ). Степень ионизации газа из атомов Ag не менее, чем $\sim 10^{-1}$.

Описанные механизмы вызывают распыление-активацию наночастиц серебра, что обеспечивает возможность образования комплексных соединений серебра с коллагеном и кератином. Кроме того, применение высокочастотной плазмы обеспечивает их перемещение к поверхности и равномерное их распределение. Полученные результаты позволили разработать принципиально новый подход к процессам обработки натуральных высокомолекулярных материалов наночастицами серебра и использовать данный метод в качестве самостоятельной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашипов Н.Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Издательство Казанского университета, 2000. – 348 с.
2. *Абдуллин И.Ш., Панкова Е.А.* // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 4. – С. 117–120.
3. *Azanova A.A., Borodaev I.A., Zheltukhin V.S.* // Bulletin of the russian academy of sciences: Physics. – 2018. – Vol. 82. – P. 189–192.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧ-МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ

SIMULATION OF RF-MANETRON DISCHARGE IN ARGON

Савин А.Ю., Желтухин В.С., Лучкин А.Г.
Savin A.Y., Zheltukhin V.S., Luchkin A.G.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет (К(П)ФУ), РФ, 420008,
Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1
e-mail: aysavin01@gmail.com*

Представлена математическая модель высокочастотного (ВЧ) магнетронного разряда в аргоне в двумерном приближении. Модель описывается системой, включающей: уравнение Пуассона для потенциала электрического поля, уравнения конвекции–диффузии для электронного газа и атомарных ионов, нестационарное уравнение теплопроводности для электронной температуры, а также уравнения Максвелла для постоянного и переменного электрических полей. Модель реализована на языке программирования Python с представлением результатов расчетов.

A mathematical model of a radio frequency (RF) magnetron discharge in argon is presented in a two-dimensional approximation. The model is described by a system that includes: the Poisson equation for the electric field potential, the convection–diffusion equations for the electron gas and atomic ions, the nonstationary heat conduction equation for the electron temperature, and the Maxwell equations for constant and alternating electric fields. The model is implemented in the Python programming language with the presentation of the calculation results.

Одной из задач современного материаловедения является создание новых материалов с многофункциональными покрытиями. Метод магнетронного распыления широко применяется для нанесения как декоративных, износостойких или защитных покрытий, так и для получения сложных, многослойных оптических конструкций или электропроводящих покрытий, свойства и структуры которых магнетронные системы распыления позволяют задавать и варьировать в требуемых диапазонах [1]. Высокочастотное магнетронное распыление имеет несколько преимуществ, таких как высокая эффективность, отличный контроль над однородностью и толщиной пленки, хорошая адгезия пленки к подложке и другие [2].

Анализ литературных данных показывает, что большинство работ посвящено экспериментальному исследованию свойств ВЧ-разряда. Работ, в которых изучаются распределения в разряде электромагнитного поля и заряженных частиц мало.

Целью настоящей работы является построение математической модели ВЧ-магнетронного разряда в аргоне.

Модель включает в себя:

равнения Пуассона для потенциала электрического поля

$$-\Delta\varphi = \frac{e}{\varepsilon_0}(n_i - n_e), \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (1)$$

где φ – потенциал электрического поля, e – заряд электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная вакуума, n_e и n_i – концентрации электронов и атомарных положительных ионов соответственно, Ω – область разряда.

равнения конвекции–диффузии для электронов и ионов

$$\frac{\partial n_{e,i}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{e,i} = \nu_i n_{e,i}, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad t > 0. \quad (2)$$

Здесь $\Gamma_{e,i} = -D_{e,i} \nabla n_{e,i} \mp \mu_{e,i} n_{e,i} (\mathbf{E} + [\mathbf{v}_{e,i} \mathbf{H}])$ – плотности потока электронов и ионов, соответственно, знак «+» соответствует ионам, знак «-» – электронам, $D_{e,i}$ – коэффициенты диффузии частиц, $\mu_{e,i}$ – подвижности частиц, $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ – напряженность электрического поля, ν_i – частота ионизации, $\mathbf{v}_{e,i}$ – скорости направленного движения частиц.

эстационарное уравнение теплопроводности для электронной температуры

$$\frac{3}{2} k \frac{\partial (n_e T_e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{5}{2} k T_e \Gamma_e - \lambda_e \nabla T_e \right) = n_e e \langle \mu_e \mathbf{E}^2 \rangle - \frac{3}{2} k \delta \nu_c n_e (T_e - T) - I \nu_i n_e, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad t > 0. \quad (3)$$

T_e – электронная температура, k – постоянная Больцмана, λ_e – коэффициент электронной теплопроводности, T – температура тяжелых частиц, ν_c – частота упругих столкновения электронов с атомами и ионами, I – энергия ионизации.

равнения Максвелла для постоянного магнитного и переменного электрического полей

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (4)$$

Разряд рассматривается в цилиндрической системе координат. Предполагается, что область $\Omega = \{0 < r < R, 0 < z < L\}$, верхний электрод $\{0 < r < R, z = L\}$ заземлен, нижний электрод $\{0 < r < R, z = 0\}$ – нагруженный, постоянные магниты расположены под нагруженным электродом. Начальные и граничные условия к уравнениям (1) – (4) формулируются в соответствии с физическими процессами, происходящими на электродах.

Модель реализована в виде программы на языке Python. Для решения разработан численный метод конечных разностей. Использован метод релаксации для решения уравнения Пуассона и схема переменных уравнений для параболической задачи. Получены распределения напряженностей постоянного магнитного поля, напряженности ВЧ-электрического и магнитного полей, распределение концентрации электронов и ионов, а также энергия ионной бомбардировки поверхности образца.

ЛИТЕРАТУРА

- аштанов П.В., Смирнов Б.М., Хипплер Р.* Магнетронная плазма и нанотехнология // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – Вып. 5. – С. 473–510.
2. *Safavi M.S., Surmeneva M.A., Surmenev R.A., Khalil-Allafi J.* RF-magnetron sputter deposited hydroxyapatite-based composite & multilayer coatings: A systematic review from mechanical, corrosion, and biological points of view // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47. – Is. 3. – P. 3031–3053.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЫ АНОДНОГО ФАКЕЛА В ДИОДНОМ ЗАЗОРЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ «КАЛЬМАР»

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF CATHODE PLASMA AND ANODE TORCH PLASMA IN THE DIODE GAP OF THE HIGH-CURRENT ELECTRON ACCELERATOR "KALMAR"

Смирнова А.Р.^{1,2}, Бойков Д.С.³, Казаков Е.Д.^{1,2}, Ольховская О.Г.³, Ткаченко С.И.^{1,2}

Smirnova A.R.^{1,2}, Boykov D.S.³, Kazakov E.D.^{1,2}, Olkhovskaya O.G.³, Tkachenko S.I.^{1,2}

¹*Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский институт), Долгопрудный, Россия, 117303*

²*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия, 123182*

³*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия, 125047*

e-mail: anya4113@gmail.com

В данной работе были произведены расчёты и проанализированы результаты моделирования по взаимодействию потоков плазмы с анода и катода в диодном промежутке генератора сильноточных пучков релятивистских электронов «Кальмар». Полученные данные из численного исследования сравнивались с результатами эксперимента.

In this work, calculations were made and the results of modeling on the interaction of plasma flows from the anode and cathode in the diode gap of the Kalmar generator of high-current relativistic electron beams were analyzed. The data obtained from the numerical study were compared with the experimental results.

На сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» (ток до 40 кА, напряжение до 350 кВ, длительность импульса порядка 100 нс, энергия электронов в пучке порядка 0,35 МэВ) проведены исследования особенностей распространения ударных волн в прозрачных полимерных материалах и их разрушения при мощном импульсном воздействии релятивистского электронного пучка (РЭП). В экспериментах с помощью ёмкостного делителя напряжения измерялось полное падение напряжения, включая его индуктивную составляющую. Расчёт тока пучка производился по измеренному падению напряжения на низкоиндуктивном шунте с известным сопротивлением. Проводилась регистрация теневых изображений диодного промежутка и мишени методом электронно-оптической хронографии. По полученным хронограммам была оценена скорость распространения катодной плазмы по направлению от катода к аноду, также были сделаны оценки

плотности электронов в плазме, при которой интенсивность зондирующего лазерного излучения в плоскости его регистрации уменьшается настолько, чтобы можно было детектировать появление тени [1]. При обработке экспериментальных данных проводилась оценка унесённой массы материала с анода.

Исследовать пространственно-временное распределение параметров плазмы в диодном промежутке, которая формируется при взаимодействии двух потоков: разлетающейся с катода при взрывной эмиссии и с поверхности образца при воздействии на него сильноточного РЭП, в эксперименте затруднительно. Восполнить недостаток этих данных можно с помощью численного моделирования, в котором будут учтены данные конкретного эксперимента по мощности и длительности РЭП, по распределению энергии электронов в пучке, а также свойства исследуемых материалов.

Моделирование воздействия РЭП на исследуемый образец проводилось с помощью разработанного в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН кода MARPLE [2]. Вычисления производились в приближении однотемпературной 3-х мерной гидродинамической модели с учетом теплопроводности и объемных потерь энергии на тормозное излучение. Энерговклад электронного пучка учитывался в форме источника в уравнении баланса энергии. Расчеты выполнены с использованием широкодиапазонных уравнений состояния вещества. Результаты расчётов унесённой массы материала анода, сравнивались с результатами, полученными в экспериментах. Данная модель была дополнена моделированием потока катодной плазмы. При моделировании потока катодной плазмы использовались оценки плотности и скорости, полученные на основании экспериментальных данных.

В результате данной работы, используя экспериментальные данные, были произведены расчёты и проанализированы результаты моделирования по взаимодействию потоков плазмы с анода и катода в диодном промежутке генератора сильноточных пучков релятивистских электронов «Кальмар».

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-21-00248).

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Е.Д. и др. Методы лазерной теневой фотографии с электронно-оптической регистрацией в хронографическом режиме для исследования динамики плазмы в диоде генератора РЭП // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47. – № 8. – С. 716–727.
2. В.А. Гасилов и др. Пакет прикладных программ высокопроизводительных магнитоускоренной плазмы // Препринты ИПМ имени М.В. Келдыша. – 2011. – № 20. – С. 36.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ УШИРЕНИЯ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF INDUCTIVELY COUPLED PLASMA IN THE REGION OF DISCHARGE TUBE BROADENING

Желтухин В.С.¹, Шемахин А.Ю.¹, Киселев Г.Б.¹, Терентьев Т.Н.¹
Zheltukhin V.S.¹, Shemakhin A.Yu.¹, Kiselev G.B.¹, Terentev T.N.¹

¹*Казанский федеральный университет, Российская Федерация, Казань,
Кремлевская 18
e-mail: terentiev@yandex.ru*

Данная статья посвящена изучению свойств плазмы, таких как плотность электронов, плотность возбужденных состояний в области уширения при параметрах: давления в 113 Па, мощности генератора 1кВт и расхода газа 0,1 г/с.

This article is devoted to the study of plasma properties, such as the electron density, the density of excited states in the broadening region at the following parameters: pressure of 113 Pa, generator power of 1 kW and gas flow of 0.1 g/s.

В отличие от цитируемых работ мы выбрали для исследования разряд при давлении 113 Па с расходом газа, так как при таком давлении скорость потока играет существенную роль в свойствах разряда. Получаемые характеристики плазмы находятся между разрядами атмосферного и низкого давления. Кроме того, в таком типе разряда можно получить энергии заряженных частиц около 100 эВ и ток плазмы около 15 А/м², в отличие от разрядов при других давлениях [1].

Двумерная модель индуктивно-связанной плазмы была разработана с помощью программы Comsol multiphysics [2]. Модель состоит из уравнений Навье-Стокса (модуль “laminar flow”), модифицированных уравнений Максвелла (модуль “magnetic fields”); уравнений на плотность электронов, плотность энергии электронов и уравнения плотности возбужденных состояний.

Мы заметили, что эффект увеличения концентрации электронов в области уширения возникает при наличии потока газа. Также распределение давления в камере не влияет на концентрацию электронов в области уширения. Однако скорость газа в этой области значительно снижается, что и приводит к такому эффекту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdullin I.S., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F. – Kazan: Kazan Technol. Univ. Press, 2000.
2. COMSOL Multiphysics® v. 5.6. – URL: www.comsol.com/ (дата обращения: 15.04.2023).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ С ТОКАМИ МЕГААМПЕРНОГО ДИАПАЗОНА В ГАЗЕ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

NUMERICAL SIMULATION OF SHOCK WAVE PROPAGATION IN A DISCHARGE CHAMBER WITH CURRENTS OF THE MEGAAMPERE RANGE IN A HIGH-DENSITY GAS

Тряскин Я.В.^{1,2}, Пинчук М.Э.¹, Богомаз А.А.¹

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186,
г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18

²Физический факультет, Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9
e-mail: jaroslav.triaskin@spbu.ru

Проведено численное моделирование методом конечных разностей распространения ударной волны вдоль радиуса цилиндрической разрядной камеры, заполненной водородом при высоком давлении. Источником возмущения является сильноточный разряд на оси камеры. Результаты моделирования подтверждают, что используемые методы качественно описывают гидродинамические поля и движение ударной волны в разрядной камере. Отмечена принципиальная роль начального давления и математической модели источника возмущения на сходимость и точность получаемых результатов.

Numerical simulation by the method of finite differences of shock wave propagation along the radius of a cylindrical discharge chamber filled with hydrogen at high pressure has been carried out. The perturbation source is a high-current discharge on the chamber axis. The simulation results confirm that the methods used qualitatively describe the hydrodynamic fields and the motion of the shock wave in the discharge chamber. The fundamental role of the initial pressure and the mathematical model of the perturbation source on the convergence and accuracy of the results obtained is noted.

Численно изучена структура ударной волны, распространяющаяся по радиусу цилиндрической камеры, заполненной газом высокого давления ($p \approx 0,1 \div 32$ МПа). Источником возмущения (ударной волны) является сильноточный нестационарный (начальный рост тока со скоростью 10^{10} А/с) разряд в межэлектродном зазоре на оси цилиндрической камеры [1, 2].

Процессы в газе описываются системой уравнений газовой динамики в консервативной форме [3, 4] с учётом уравнения состояния для идеального газа. Начальное и граничные условия определяются из экспериментальных данных для водорода [1, 2]. Рассмотрено несколько моделей источника возмущения. Первый учитывает образование ионизированного газа в межэлектродном зазоре при сильноточном разряде в камере; второй без учёта процесса ионизации газа в источнике. Система уравнений гидродинамики решалась численно модифицированным двухшаговым методом второго порядка точности на базе классических

конечноразностных схем [3, 4] с дополнительными шагами по сглаживанию решения [5,6].

Проведено сравнение численных и экспериментальных результатов [1, 2] на стенке и оси канала. Было достигнуто качественное соответствие. Отмечена принципиальная роль начального давления и модели источника возмущения на сходимость и точность полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Budin A.V., Losev S.Y., Pinchuk M.E. et al.* An Experimental Stand for Studying a High-Current Discharge in a Dense Gas // *Instrum. Exp. Techn.* – 2006. – Vol. 49. – No. 4. – P. 549–552.
2. *Rutberg Ph.G., Bogomaz A.A., Pinchuk M.E., Budin A.V., Leks A.G., Pozubenkov A.A.* High-current discharge channel contraction in high density gas // *Physics of Plasmas.* – 2011. – Vol. 18. – No. 12.
3. *Richtmyer R.D., Morton K.W.* Difference methods for initial-value problems. – 1967.
4. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкости. – 1991. Т. 2.
5. *Boris J.P., Book D.L.* Flux corrected transport // *J. Comput. Phys.* – 1976.
6. *Попов И.В., Фрязинов И.В.* Метод адаптивной искусственной вязкости численного решения уравнений газовой динамики. – 2014.

ПОСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПЕРЕНОСА КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРОЛИТА В РАЗРЯДАХ С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

DEFINITION OF THE BOUNDARY CONDITIONS FOR THE TRANSFER OF ELECTROLYTE COMPONENTS IN LIQUID ELECTRODE DIS- CHARGES

Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю.
Kashapov L.N., Kashapov N.F., Chebakova V.Yu.

*Казанский федеральный университет, Россия, 420 008 Казань, Кремлевская 18
e-mail: vchebakova@mail.ru*

Разряды с жидкими электродами действительно быстро развивающаяся область знаний на стыке физики и химии плазмы, а также физики и химии жидкостей. В следствии того, что диэлектрическая проницаемость электролита зависит от его состава, а также частоты приложенного напряжения, то влияние электрохимических процессов в электролите на характеристики разряда неопределенно. В данной работе проводится моделирование характеристик электролита.

Discharges with liquid electrodes are really a rapidly developing field of knowledge at the intersection of plasma physics and chemistry, as well as the physics and chemistry of liquids. Due to the fact that the dielectric constant of the electrolyte depends on its composition as well as the frequency of the applied voltage, the effect of electrochemical processes in the electrolyte on the discharge characteristics is uncertain. In this paper, it carried out the modeling of the characteristics of the electrolyte.

Низкотемпературная плазма разряда с жидкими электродами вызывает большой интерес в области фундаментальных и прикладных исследований. Это действительно быстро развивающаяся область знаний на стыке физики и химии плазмы, а также физики и химии жидкостей. В силу большого разнообразия типов плазменных установок с жидкими электродами (это погруженные в жидкость 2 электрода; один электрод погружен в жидкость, второй над ее поверхностью; струйные электроды, и др.) возможен широкий диапазон их применения. Большое влияние на характеристики разрядов с жидкими электродами непосредственно оказывает и сам электролит: его состав и кислотность, электропроводность. Все это приводит к необходимости изучения электрохимических процессов в жидком электролите. В работе [1] приведены возможные процессы на поверхности раздела электролит – плазмообразующий газ, при этом одним из возможных процессов показан электролиз. Вследствие того, что диэлектрическая проницаемость электролита зависит от его состава, а также частоты приложенного напряжения, то влияние данного процесса на характеристики разряда неопределенно. В [2] были установлены условия зажигания разряда и образования парогазовой оболочки для растворов с различной кислотностью. Вольт-ампер-

ные характеристики представленные в [2] имеют три области: область классического электролиза, область горения анодных микрозарядов и третья область – устойчивого горения газового разряда, при котором заряд возникает между металлическим анодом и электролитическим катодом.

В данной работе проводится моделирование характеристик щелочного электролита. Взаимодействие между газом и электролитом рассчитывалось по закону Генри. Константы взаимодействия (константа закона Генри) рассмотрены в [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. *P.J. Bruggeman, M.J. Kushner, B.R. Locke* // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Vol. 25. – No. 053002.
2. *L.N. Kashapov, N.F. Kashapov, R.N. Kashapov* // J. Phys. Conf. Ser. – 2013. – Vol. 479. – No. 012003.
3. *N. Takeuchi, Y. Ishii, K. Yasuoka* // Plasma Sources Sci. Technol. – 2012. – Vol. 21. – No. 015006.

Секция 6

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ТАНТАЛОВОГО PZ-ПИНЧА

DIAGNOSTIC COMPLEX FOR X-RAY RADIOGRAPHY BASED ON A TANTALUM PZ-PINCH

Артёмов А.П., Федюнин А.В., Русских А.Г., Орешкин В.И.
Artyomov A.P., Fedunin A.V., Rousskikh A.G., Oreshkin V.I.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр.
Академический, 2/3.
e-mail: artyomov@ovpe.hcei.tsc.ru*

В работе представлен опытный образец диагностического комплекса для радиографии на основе танталового PZ-пинча (Точечный Z-пинч). В эксперименте показано, что данная диагностика позволяет получать радиографические изображения с высоким пространственным (размеры источника составляют (2-10) мкм) и временным (длительность импульса рентгеновского излучения менее 2 нс) разрешением в спектральном диапазоне $h\nu=3-5$ кэВ. Использование PZ-пинча для формирования источника излучения совместно с применением цифровой регистрации изображений позволяет получать серию снимков исследуемого объекта за короткий промежуток времени.

The paper presents a prototype of a diagnostic complex for radiography based on a tantalum PZ-pinch (Point Z-pinch). The experiment shows that this diagnostic allows obtaining radiographic images with high spatial (source dimensions are (2-10) μm) and temporal (X-ray pulse duration less than 2 ns) resolution in the spectral range $h\nu=3-5$ keV. The use of a PZ-pinch to form a radiation source, together with the use of digital imaging, makes it possible to obtain a series of images of the object under study in a short period of time.

Импульсная радиография является мощным инструментом для диагностики различных физических объектов, например, при исследовании структуры плазмы, сформированной катодным факелом [1], интенсивным релятивистским электронным пучком [2], при электрическом взрыве проводников [3, 4] и т.д. В данном радиографическом комплексе для формирования источника зондирующего излучения используется PZ-пинч. В отличие от проволочных Z- и X-пинчей, где материал лайнера создается при взрыве металлических проводников, в данном случае плазма пинча формируется при горении сильноточного дугового разряда (амплитуда тока 70 кА, время нарастания тока 500 нс) в камере плазменной пушки. Затем испаренное вещество инжектируется через отверстие в аноде пушки в межэлектродный зазор основного генератора тока (Рис. 1(a)), где происходит сжатие вещества при протекании по нему мощного импульса тока и образование излучающей «горячей точки». Такое решение дает возмож-

ностью получать серию радиографических снимков в течении короткого промежутка времени без необходимости вскрытия вакуумной камеры для установки новой проволочной нагрузки генератора.

Диагностический комплекс для импульсной радиографии состоит из импульсного генератора тока, питающего плазменную пушку, импульсного генератора тока XPG-3 (210 кА, 180 нс), питающего PZ-пинч, а также регистрирующей аппаратуры, которая представляет собой цифровой фотоаппарат, модернизированный под съемку в рентгеновском диапазоне спектра, а также алмазный детектор рентгеновского излучения (PCD) для регистрации момента генерации импульса зондирующего излучения. Использование танталовых электродов позволило существенно увеличить ресурс плазменной пушки, который определяется в первую очередь эрозией электродов. Эксперименты показали, что ресурс танталовой плазменного инжектора составляет не менее 100 пусков.

Данный диагностический комплекс был апробирован в экспериментах по просвечиванию тест-объектов (сетка из вольфрамовых проволочек диаметром 7.5, 13 и 25 мкм) в спектральном диапазоне $h\nu=3-5$ кэВ (Рис. 1(б)). В результате экспериментов было показано, что размеры излучающей точки танталового PZ-пинча составляют (2-10) мкм. Длительность импульса излучения составляет не превышает 2 нс, а энергия импульса достигает значений 0.3 ± 0.14 Дж.

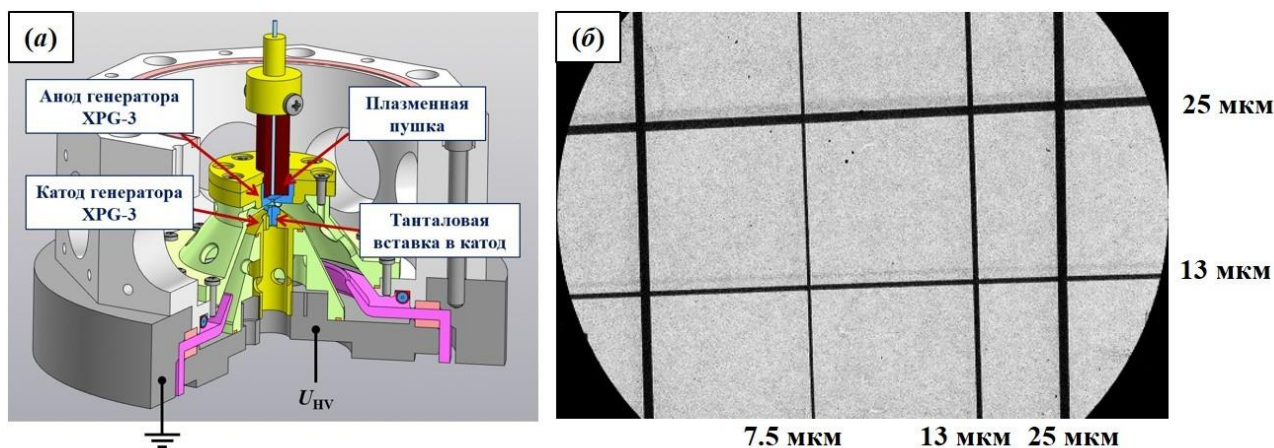


Рис. 1. Узел нагрузки генератора XPG-3 (а) и радиографический снимок тест-объекта в спектральном диапазоне $h\nu = 3-5$ кэВ (б).

ЛИТЕРАТУРА

1. A.G. Roussikh, A.V. Fedyunin, A.P. Artyomov, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin // Curr. App. Phys. – 2019. – Vol. 19. – No. 704.
2. V.V. Kurkuchekov, M.G. Atlukhanov, A.V. Burdakov, V.V. Danilov // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17. – No. P06019.
3. J. Wu, L.P. Wang, J.J. Han, M. Li, L. Sheng // Phys. Plasmas. – 2012. – Vol. 19. – No. 022702.
4. J.D. Douglassa, D.A. Hammer // Rev. Sci. Instr. – 2008. – Vol. 79. – No. 033503.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ОТРАЖАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ С ТЕРМОКАТОДОМ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PERTURBATIONS OF THE PLASMA POTENTIAL IN A REFLECTIVE DISCHARGE WITH A THERMIONIC CATHODE

Валинуров М.А.¹, Гавриков А.В.¹, Ойлер А.П.¹, Усманов Р.А.¹
Valinurov M.A.¹, Gavrikov A.V.¹, Oiler A.P.¹, Usmanov R.A.¹

¹*Объединённый институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН), Россия, 125412
e-mail: valinurov.ma@phystech.edu*

Конфигурация из радиального электрического поля и аксиального магнитного поля порождает азимутальное вращение плазмы. Это может приводить к образованию различных плазменных неустойчивостей. Данная работа посвящена экспериментальному изучению колебаний потенциала плазмы в плазменном столбе отражательного разряда с термокатодом, зажигаемого в скрещенных электрическом и магнитном полях. Измерялись колебания плавающего потенциала плазмы при помощи четырёхканального зонда. Результаты свидетельствуют о существовании вращающейся структуры. Также в работе исследована зависимость ее скорости от различных параметров.

The configuration of a radial electric field and an axial magnetic field generates an azimuthal rotation of the plasma. This can lead to the formation of various plasma instabilities. This work is devoted to the experimental study of plasma potential fluctuations in the plasma column of a reflective discharge with a thermionic cathode ignited in crossed electric and magnetic fields. The oscillations of the floating plasma potential were measured using a four-channel probe. The results indicate the existence of a rotating structure. Also, the dependence of its speed on various parameters was studied in the work.

Низкотемпературная плазма в скрещенных электрическом и магнитном полях является одной из наиболее актуальных тем для исследований, так как данная конфигурация имеет множество практических приложений [1]. Среди прочих можно выделить ускорители Холла [2] и установки для плазменной сепарации веществ, такие как масс-фильтр Т. Оккавы [3] или масс-сепаратор В.П. Смирнова [4]. В подобных устройствах нередко возникают плазменные неустойчивости, которые могут оказывать существенное влияние на результат их работы [4].

Данная работа посвящена экспериментальному изучению возмущения потенциала плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. В эксперименте изучался отражательный разряд Пеннинга с термоэмиссионным катодом, в роли рабочего газа выступал аргон, его давление в установке

поддерживалось на уровне 0.3 мТорр. Исследования проводились в цилиндрической установке длиной 230 см, с внутренним диаметром 86 см, и диаметром плазменного столба 50 см. Величина радиального электрического поля составляла 10-15 В/см, аксиального магнитного поля – 0.9-1.4 кГс. Схема установки приведена на рис. 1а. Температура электронов плазмы составляла 6-12 эВ, скорость вращения плазмы в азимутальном направлении 8-10 км/с [5].

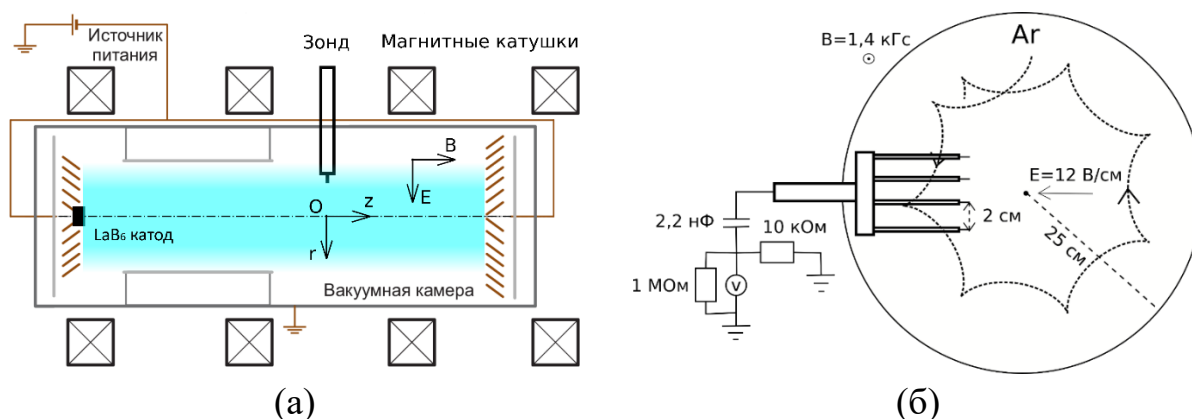


Рис. 1. (а) схема установки, (б) схема измерений четырехканальным плавающим зондом.

Для исследования возмущений потенциала плазмы использовался четырехканальный плавающий зонд, схема измерений приведена на рис. 1б. Полученные результаты анализировались при помощи попарной кросс-корреляции для определения взаимного запаздывания сигналов. В дальнейшем это позволяло определить скорость распространения возмущения вдоль одной из осей, в зависимости от расположения зонда.

По результатам экспериментов была установлена зависимость азимутальной скорости возмущения от радиальной координаты и магнитного поля. Также было установлено, что эта скорость близка к скорости дрейфа. В качестве объяснения полученных результатов выдвинуто предположение о наличии спицевой структуры [6], ранее уже наблюдавшейся при движении заряженных частиц в скрещенных полях [7].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00716, <https://rscf.ru/project/21-19-00716/>

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kaganovich I.D.* // *Physics of Plasmas*. – 2020. – Vol. 27. – No. 120601.
2. *Choueiri E.Y.* // *Physics of Plasmas*. – 2001. – Vol. 8. – P. 1411–1426.
3. *Ohkawa T., Miller R.L.* // *Physics of Plasmas*. – 2002. – Vol. 9. – P. 5116–5120.
4. *Liziakin G.* // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2021. – Vol. 54. – No. 414005.
5. *Ойлер А.П.* // *ЖТФ*. – 2022. – Т. 92. – № 1529.
6. *Валинуров М.А.* // *Вестник ОИВТ РАН*. – 2022. – Т. 8. – № 4.
7. *Rodriguez E.* // *Physics of Plasmas*. – 2019. – Vol. 26. – No. 053503.

**ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗРЕШЁННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР
КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ЛИНИЙ N₂ C-B
И OH A-X В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ,
ИСТЕКАЮЩЕМ В ВОЗДУХ**

**SPATIALLY-RESOLVED MEASUREMENT OF THE TEMPERATURES
OF THE VIBRATION-ROTATIONAL TRANSITIONS OF THE N₂ C-B
AND OH A-X LINES IN A BARRIER DISCHARGE PLASMA JET
IN HELIUM FLOWING INTO AIR**

Дьяченко А.А.¹, Пинчук М.Э.¹, Иов И.Л.^{1,2}, Степанова О.М.¹
Dyachenko A.A.¹ Pinchuk M.E.¹, Iov I.L.^{1,2}, Stepanova O.M.¹

¹*Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук
(ИЭЭ РАН), Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-
Петербург, Университетская набережная, д. 7–9*

¹*Institute for Electrophysics and Electrical Power of the Russian Academy of
Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: dyachenko_180396@rambler.ru*

Исследовалась гелиевая плазменная струя атмосферного давления при взаимодействии с диэлектрическими и проводящими мишенями при использовании питающего напряжения специальной формы. Методом молекулярной эмиссионной спектроскопии исследовано пространственное распределение температур вращательных уровней N₂ и OH в струе. Регистрация спектра производилась методом перемещения фокуса оптической системы вдоль струи с помощью системы линейных трансляторов.

A helium plasma jet at atmospheric pressure was studied in its interaction with dielectric and conducting targets using a special-shaped supply voltage. The spatial distribution of the temperatures of the N₂ and OH rotational levels in a jet was studied by molecular emission spectroscopy. The spectrum was recorded by moving the focus of the optical system along the jet using a system of linear translators.

Источники холодной атмосферной плазмы часто используются в современных исследованиях взаимодействия плазмы с биологическими объектами [1]. К таким источникам плазмы относятся плазменные струи атмосферного давления. Для обработки неустойчивых к нагреву мишеней, необходимо контролировать распределение температуры в плазменной струе [2].

В работе представлена методика определения температуры газа в струе холодной плазмы с помощью методов эмиссионной спектроскопии [3]. Этот метод позволяет измерять осредненные по времени температурные профили в

струе. Регистрация спектра производилась спектрографом MS-257 с камерой Andor CCD 420-UV-FK. Область регистрации света двигалась вдоль струи с помощью системы линейных трансляторов [4]. В качестве источника информации о температуре использовались колебательно-вращательные полосы азота N₂ C-B и OH A-X [5]. При атмосферном давлении температура вращательных подуровней N₂ близка к газовой [6]. Для аппроксимации использовались полосы N₂ 0-0, 1-0 и 2-1. На рисунке 1 показано несколько примеров распределения температуры вдоль свободной струи и струи, взаимодействующей с различными мишенями при питающем напряжении специальной формы амплитудой 5 кВ с коэффициентом заполнения 60%.

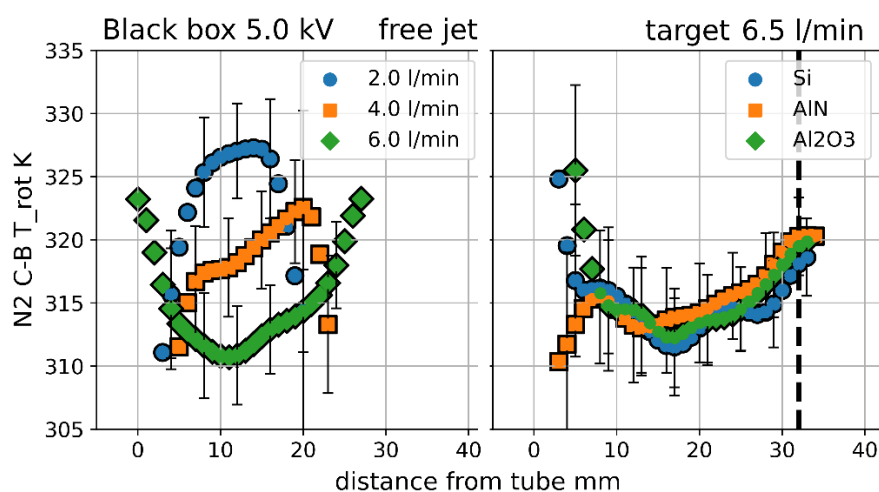


Рис. 1. Распределение температуры вдоль свободной струи для различных расходов гелия (слева) и струи с мишенями из кварцевого стекла, оксида и нитрида алюминия (справа). Пунктирная линия – положение мишени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-29-01215, <https://rscf.ru/project/22-29-01215/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bekeschus S., Favia P., Robert E., von Woedtke T.* White paper on plasma for medicine and hygiene: Future in plasma health sciences // *Plasma Process Polym.* – 2019.
2. *Moros E., Hendee W., Stauffer P.* Physics of Thermal Therapy: Fundamentals and Clinical Applications // *Med. Phys.* – 2013. – Vol. 40. – No. 67302.
3. *Vorac J., Synek P., Potočňáková L., Hnilica J., Kudrle V.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2017. – Vol. 26. – No. 25010.
4. *Surov A.V., Dyachenko A.A., Lov I.L.* // Abstracts of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Tomsk, 2022). – Tomsk, 2022. – Vol. 1. – No. 950302. – P. 248.
5. *Дьяченко А.А., Пинчук М.Э., Степанова О.М.* // Сборник тезисов конференции «Физика низкотемпературной плазмы (ФНТП-2020)» (Казань, 2020). – Казань, 2020. – С. 73–74.
6. *Tibere-Inglesse A.* Chemical and Process Engineering. – Paris: Université Paris-Saclay, 2019.

ИЗМЕРЕНИЕ МАСС-ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТ ПЛАЗМЫ НАНОСЕКУНДНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

A MASS-CHARGE MEASUREMENT OF MAIN PLASMA COMPONENTS GENERATED BY THE DIELECTRIC FLASHOVER

Емлин Р.В., Морозов П.А., Щербаков Е.Н.
Emlin R.V., Morozov P.A., Shcherbakov E.N.

*Институт электрофизики УрО РАН,
Амундсена 106, Екатеринбург, 620016, Россия
e-mail: lfd@iep.uran.ru*

Приводятся результаты измерения скоростей и молекулярного состава основных фракций разрядной плазмы перекрытия серы, полиэтилена, хлорида калия импульсами 70 кВ длительностью 20 нс с использованием импульсного магнитного поля до 0,3 Тл.

The velocities and consistence of molecular ions of main fractions of flashover plasma generated by flashover discharge were measured by the mass-spectrometer with pulsed magnetic field up to 0.3 T. The results for sulfur, polyethylene and KCl monocrystals are presented for 20-ns 70-kV pulses and currents of ~3-6 kA.

В процессе разработки макета ИП ЭРД абляционного типа с более высокими удельными параметрами нами были проведены измерения импульса механической тяги в разрядных камерах в зависимости от состава рабочих тел, получены спектры скоростей ионной компоненты плазменных пучков, а также характеристики диаграммы направленности вылетающего потока [1,2]. Для выбора оптимального рабочего вещества особенно важное значение имеет задача выяснить фазовый состав и спектр скоростей основных компонент пучков, генерируемых в разрядах по рабочим веществам с различными типами химических связей, в том числе различным полимерам и ионным соединениям. В применениях, где используются вся генерируемая в разряде плазма (плазменные размыкатели, ЭРД) необходимо иметь информацию о составе её компонент, как минимум об основных. В случае ЭРД это особенно актуально, поскольку при их работе заметная часть вылетевшего вещества осаждается на поверхностях аппарата.

В представленной работе приводятся результаты измерения масс-зарядовых отношений для основных компонент плотных пучков плазмы, генерируемых при поверхностном перекрытии нескольких классов диэлектрических материалов – серы, полимеров и ионных кристаллов. Измерения проводились на разработанном малогабаритном масс-анализаторе с импульсным магнитным полем до 0,3 Тл, создаваемым системой колец Гельмгольца внутренним диаметром 16 см, расположенном непосредственно в вакуумной камере на пути генерируемого плазменного пучка. Генерируемый пучок попадает на вход устройства прямо через входную щель. Влияние противоположного поля снаружи соленоида может за-

метно уменьшить эффективное поле, то есть увеличивает величину рассчитанного ларморовского радиуса относительно его реального значения и может дать завышенную атомную массу частиц. Поэтому вокруг соленоидов размещается экран из листовой стали. Ионный ток регистрировался цилиндром Фарадея – размещённом в направлении, соответствующем ларморовской орбите с радиусом 0,7 м. Основная особенность этих измерений – возможность проводить измерения в неискажённом ослабляющими устройствами пучке, с целью получить наиболее надёжные количественные данные о реальном соотношении различных зарядовых и массовых фракций.

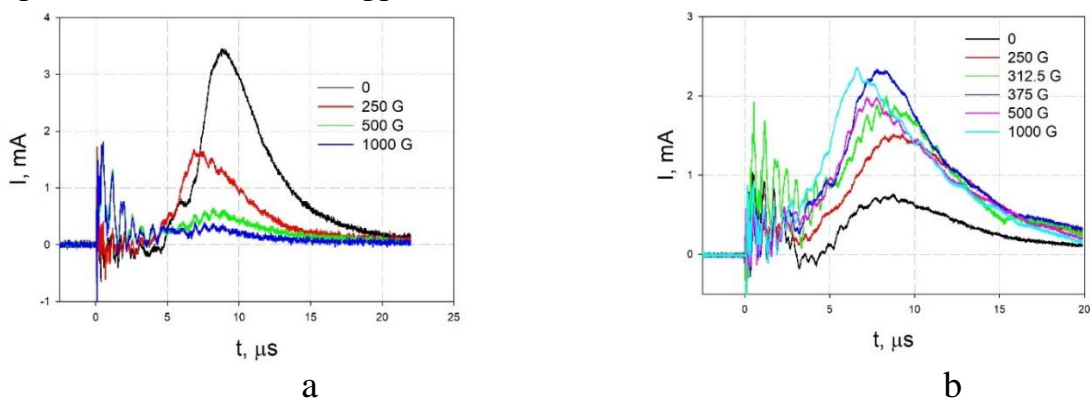


Рис.1. Осциллограммы ионного тока для цилиндра Фарадея, расположенного на пути не отклоненного пучка (а) и на ларморовской орбите радиусом 0,7м (b)

Из осциллограмм Рис.1а видно, что в поле 250 Гс из приёмника ушло больше половины ионного тока – эти фракции легче чем 60 а.е.м., при этом осталось 50%: это либо более тяжёлые ионы, либо более быстрые. В поле 400 гаусс от этого центрального приёмника отклоняются почти все ионы. На осциллограммах Рис.1b выделяется максимум при магнитном поле 0,04 Тл. Расчет m/q для $V = 63$ км/с даёт $m = 67$ а.е.м., соответствующий молекуле S_2^+ . Второй, более выраженный, наблюдается при 0,13 Тл, что приводит к $m_2 = 196$ а.е.м. = S_6^{+1} . Были также проведены измерения с использованием веществ различных химических классов: S, ПЭ, ПММА, КСl. При этом в неослабленном пучке обнаружены отличающиеся компоненты - лёгкие, с массами менее 40-60 а.е.м., соответствующие мономолекулярной ионизованной фракции, и вторая $m > 200$ а.е.м. состоящая из 6-10 молекулярных единиц. Получены данные о процентном отношении этих фракций. Построены зависимости содержания компонент с различной молекулярной массой, поступающих в приёмник, для нескольких значений магнитного поля. Полученные осциллограммы зависимости ионного тока от времени преобразованы в графики зависимости тока от скорости ионов, и для нескольких ларморовских орбит вычислены распределение их числа в зависимости от массы этих ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.V. Emlin, P.A. Morozov, I.F. Punanov // IEEE Transaction on plasma science. – 2019. – Vol. 47. – No. 6. – P. 2838–2846.
2. S.A. Buldashev, R.V. Emlin // J. of Phys.: Conf. ser. – 2021. – Vol. 2064. – No. 012114.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ПРОТОТИПОВ
ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
ПРИ ИХ ИСПЫТАНИЯХ В УСТАНОВКЕ ПЛМ**

**NEAR SURFACE PLASMA INVESTIGATIONS DURING THE FUSION
REACTOR FIRST WALL PROTOTYPES TESTING
IN THE PLM FACILITY**

Кавыршин Д.И.^{1,2}, Будаев В.П.^{1,3}, Федорович С.Д.¹, Карпов А.В.^{1,3},
Чиннов В.Ф.^{1,2}, Лукашевский М.В.¹, Чан К.В.¹, Муравьева Е.А.¹,
Мязин А.С.¹, Коньков А.А.¹, Рогозин К.А.¹, Анисимов Д.А.¹

Kavyrshin D.I.^{1,2}, Budaev V.P.^{1,3}, Fedorovich S.D.¹, Karpov A.V.^{1,3},
Chinnov V.F.^{1,2}, Lukashevsky M.V.¹, Tran Q.V.¹, Muravieva E.A.¹,
Myazin A.S.¹, Konkov A.A.¹, Rogozin K.A.¹, Anisimov D.A.¹

¹*National Research University "MPEI,"*

Russia, 111250, Krasnokazarmennaya 14, build. 1, Moscow

²*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (JIHT RAS),
Russia, 125412, Izhorskaya st. 13 Bld.2, Moscow*

³*National Research Center Kurchatov Institute,
Russia, 123182, Pl. Akademika Kurchatova 1, Moscow
e-mail: dimakav@rambler.ru*

Внутрикамерные компоненты термоядерного реактора будут подвергаться воздействию плазменных потоков высокой плотности (до 10^{24} м⁻²с⁻¹) из пристеночной плазмы с температурой от 1 до 10 эВ. Созданная в НИУ «МЭИ» установка ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) позволяет создавать аналогичные реакторным условия плазменной нагрузки при стационарном режиме горения разряда с целью исследования процессов эрозии прототипов элементов первой стенки и дивертора термоядерного реактора.

Inner surfaces of future fusion reactor chambers will be exposed to powerful plasma load (up to 10^{24} м⁻²с⁻¹) from near-wall plasma with the temperature of 1 to 10 eV. The PLM (plasma linear multicusp) facility, created at NRU MPEI, makes it possible to create conditions of a steady-state plasma with reactor relevant parameters in order to study the erosion of prototypes of the first wall and divertor plates of a fusion reactor.

В термоядерном реакторе на основе токамака ожидаются большие плазменно-тепловые нагрузки (до ~ 10 МВт/м²) на теплозащитную облицовку дивертора и первой стенки, что может приводить к повышенной эрозии поверхности. Интенсивность потоков плазмы на стенку зависит от характеристик пристеночной плазмы, в том числе от свойств турбулентности плазмы, что может приводить к локальному перегреву поверхности и повышенной эрозии. Поэтому необходимы исследования пристеночной плазмы в условиях, приближенных к реак-

торным, со стационарной плазменной нагрузкой. Такие исследования пристеночной плазмы проводятся в плазменной линейной установке ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) при испытаниях прототипов облицовки термоядерного реактора ИТЭР. Возможности установки ПЛМ позволяют создавать аналогичный ожидаемому в реакторе поток плазмы на испытываемые образцы. Параметры гелиевого плазменного разряда: магнитное поле - до 0.03 Тл, в каспах - до 0.2 Тл, диаметр плазменного разряда - около 3.5 см, температура электронов - $1 \div 10$ эВ, плотность плазмы - $10^{12} \div 10^{13}$ см⁻³, потоки ионов гелия на испытываемые образцы - до 10^{22} м⁻²с⁻¹.

Плазменная установка ПЛМ оснащена оптической и зондовой системами диагностики плазмы. Монохроматор-спектрограф MS7504(i) позволяет регистрировать излучение плазмы в диапазоне от 200 до 1100 нм со спектральным разрешением 0.013 нм и пространственным ~ 100 мкм. Одновременно регистрируемый при этом спектральный интервал составляет 16.5 нм. На выходе монохроматора установлена ПЗС камера. С помощью монохроматора-спектрографа MS7504(i) в сочетании с оптоволоконным четырехканальным спектрометром AvaSpec выполняется регистрация оптических спектров излучения плазмы вблизи поверхности введенных в неё образцов конструкционных материалов.

С целью увеличения плотности энергии (моделирования воздействия ЭЛ-Мов и срывов плазмы на стенку) были проведены измерения оптических спектров в зоне приповерхностной плазмы при дополнительном воздействии на поверхность мишени импульсов Nd:YAG лазера длительностью 10 нс с энергией 0.5 Дж на длине волны 1064 нм. Воздействие лазера практически не оказывает влияния на интенсивность гелиевых линий, при этом приводя к абляции поверхности образца и появлению в спектре линий атомарного вольфрама, интенсивность которых обратно пропорциональна регистрируемой интенсивности рассеянного лазерного излучения и растёт с каждым импульсом.

Вейвлет-преобразование зарегистрированного в гелиевой плазме установки ПЛМ сигнала зонда содержит информацию о турбулентных структурах. Доминирующее влияние оказывают структуры, связанные с временными масштабами 120 микросекунд. При действии лазерного импульса на материал происходит изменение свойств приповерхностной плазмы, наблюдается иерархичность турбулентных структур на масштабах от 10 до 500 мкс. Такое поведение типично наблюдается в турбулентности периферийной плазмы термоядерных установок и вызывается дальними корреляциями дрейфово-диссипативной (низкочастотной электростатической) турбулентности плазмы.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 21-79-10281.

ИЗУЧЕНИЕ ИОННОГО ПОТОКА ИЗ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНОГО НЕРАСПЫЛЯЮЩЕГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

CHARACTERIZATION OF ION FLUX FROM A HIGH-CURRENT NON-SPUTTERING MAGNETRON DISCHARGE PLASMA

Кази́ев А.В.¹, Колодко Д.В.^{1,2,3}, Сазонов Н.С.¹, Агейченков Д.Г.¹,
Тумаркин А.В.¹
Kaziev A.V.¹, Kolodko D.V.^{1,2,3}, Sazonov N.S.², Ageychenkov D.G.¹,
Tumarkin A.V.¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия,
119991 Москва, Ленинский просп., д. 53*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия,
115409 Москва, Каширское ш., д. 31*

³*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Россия, 141190 Фрязино МО, пл. Введенского, д. 1
e-mail: kaziev@plasma.mephi.ru*

Проведены измерения массового состава ионного потока из плазмы импульсного нераспыляющего магнетронного разряда с килоамперным током в водороде и гелии при давлении ~ 1 Торр. Данные о ионных потоках, полученные с помощью масс-спектрометра на базе E×B фильтра, сопоставлены с результатами оптической эмиссионной спектроскопии плазмы.

We have measured mass-resolved ion flux originating from plasma of a kiloampere range impulse non-sputtering magnetron discharge in hydrogen and helium at pressure ~ 1 Torr. Mass-spectrometric data obtained for ion fluxes with E×B filter are compared with the results of optical emission spectroscopy.

В настоящее время существует ряд технологий и областей научных исследований, таких как сухое травление материалов, разработка электрических (плазменных) двигателей, проведение испытаний материалов при высоких термических и плазменных нагрузках, где есть потребность в эффективных источниках высокоионизированной плазмы без металлических примесей. Для создания такой плазмы можно использовать коммерчески доступный метод импульсного магнетронного распыления высокой мощности (HiPIMS [1]). Однако, поскольку концепцией разработки HiPIMS является нанесение покрытий, в своей обычной форме этот метод не подходит для создания беспримесной газовой плазмы. Использование легкого рабочего газа (водорода или гелия) позволяет значительно уменьшить эффекты распыления. В зависимости от условий работы (в том числе, длительности импульса) можно преобразовать режим HiPIMS с длинными импульсами (L-HiPIMS) в низковольтный безэрозионный режим при том же уровне

плотности мощности [2–5]. Этот режим известен как нераспыляющий магнетронный разряд (НРМР) [2, 3]. В настоящей работе изучается НРМР в водороде и гелии при давлении порядка 1 Торр с точки зрения потока ионов из плазмы и ее оптических эмиссионных свойств.

В качестве средства масс-анализа использовался фильтр Вина – прибор для фильтрации заряженных частиц по скорости в скрещенных электромагнитных полях. На электроды фильтра подавалась линейная развертка отклоняющего напряжения. Ток на коллекторе измерялся пикоамперметром. Пучок ионов для анализа формировался с помощью специального экстрактора.

Наличие примесей независимо определялось с помощью трехканального спектрометра Avantes AvaSpec ULS2048L. Спектры излучения плазмы измерялись через акриловое окно с полосой пропускания ~ 370–2000 нм. При детектировании элементов, как правило, использовалась видимая область спектра. Пример оптического эмиссионного спектра для разряда в водороде показан на рисунке 1.

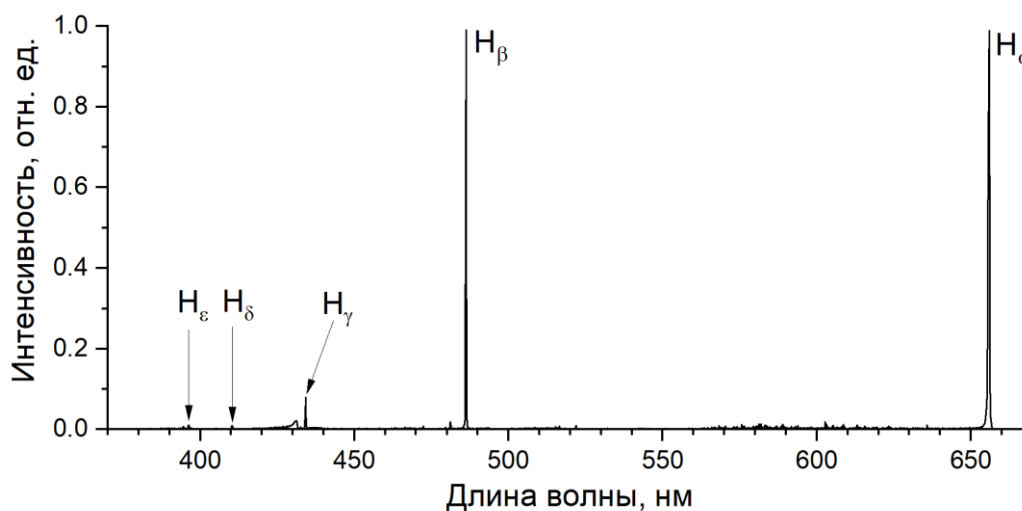


Рис. 1. Оптический эмиссионный спектр НРМР в водороде (ток 1200 А)

Обсуждается корреляция массового состава ионных потоков с излучательными характеристиками плазмы.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МК-4445.2022.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.T. Gudmundsson* // *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 2012. – Vol. 30. – No. 030801.
2. *G.V. Khodachenko* // *Plasma Phys. Rep.* – 2012. – Vol. 38. – No. 71.
3. *A.V. Kaziev* // *Vacuum.* – 2018. – Vol. 158. – No. 191.
4. *T.J. Sommerer* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 52. – No. 435202.
5. *D. Levko* // *J. Appl. Phys.* – 2021. – Vol. 129. – No. 183307.

ГЕНЕРАЦИЯ ГРУППЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ КИСЛОРОДА В ПЛАЗМЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

GENERATION OF HIGHLY ENERGETIC GROUP OF POSITIVE OXYGEN IONS IN AN IMPULSE MAGNETRON DISCHARGE PLASMA

Колодко Д.В.^{1,2,3}, Лисенков В.Ю.², Агейченков Д.Г.², Казиев А.В.²
Kolodko D.V.^{1,2,3}, Lisenkov V.Yu.², Ageychenkov D.G.², Kaziev A.V.²

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Россия, 141190 Фрязино МО, пл. Введенского, д. 1*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., д. 31*

³*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., д. 53
e-mail: kaziev@plasma.mephi.ru*

Зарегистрирована группа высокоэнергетичных положительных ионов O^+ в потоке из плазмы сильноточного импульсного магнетронного разряда с горячей мишенью в газовой смеси Ar/O_2 . Механизмом возникновения ускоренных ионов O^+ может выступать конверсия ускоренных в катодном слое отрицательных ионов $O^- \rightarrow O^+$ в процессах отрыва, ионизации электронным ударом и перезарядки.

Group of high-energy positive O^+ ions has been detected in the flux from plasma of a hot-target high-current pulsed magnetron discharge in an Ar/O_2 gas mixture. The mechanism for generation of fast O^+ ions can be the conversion $O^- \rightarrow O^+$ of negative ions accelerated in the cathode layer through the processes of detachment, electron impact ionization, and charge exchange.

Реакционное магнетронное напыление — широко распространенный и чрезвычайно популярный метод нанесения оксидный. Большое количество работ посвящено изучению потоков ионов, приходящих на поверхность подложки при использовании магнетронных разрядов в кислородосодержащей среде [1–13]. Известно, что в классических магнетронах постоянного тока (DC), в среднечастотных (MF), высокочастотных (RF) и сильноточных импульсных (HiPIMS) магнетронных распылительных системах при работе в смесях Ar/O_2 наблюдается присутствие в потоке на подложку положительных ионов с тепловыми энергиями и отрицательных ионов с высокими энергиями до eV_d и более, где V_d — напряжение разряда [1–6]. Процессы генерации быстрых отрицательных ионов широко обсуждались в литературе, и было предложено несколько механизмов их образования, включая прилипание электронов [4–6] и перезарядку положительных ионов O^+ при столкновениях с поверхностью [7] с последующим ускорением

в катодном слое. Эти процессы объясняют возникновение отрицательных ионов O^- , обладающих энергией, близкой к eV_d .

В настоящей работе изучался поток ионов из плазмы разряда HiPIMS с неохлаждаемой мишенью в смесях Ar/O_2 с медной мишенью. Для диагностики состава использовался магнитный секторный масс-анализатор, а для измерения энергии — четвертьсферический электростатический сектор.

Обнаружен устойчивый высокоэнергетический пик в спектрах ионов, коррелирующий с появлением дополнительного пика на спектрах массового распределения, который не может быть объяснен вкладом какого-либо сорта медленных частиц. Пример энергетического спектра положительных ионов показан на рисунке 1.

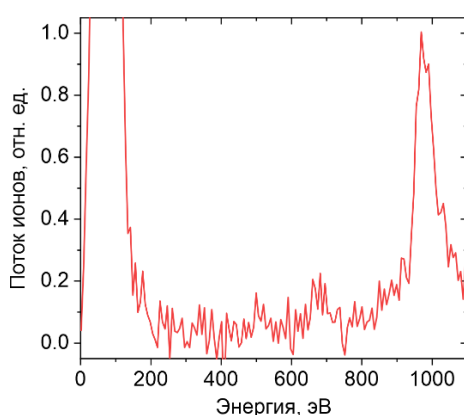


Рис. 1. Энергетический спектр потока положительных ионов ($Ar/O_2 = 1/1$)

Эксперименты с использованием электростатического энергоанализатора показывают присутствие в потоке ускоренных ионов с энергией близкой к eV_d . Типичное значение измеренной энергии этой группы ионов составляет 800–1000 эВ. Доказано, что указанные сигналы соответствуют быстрым ионам O^+ .

Наиболее значимыми механизмами, которые могут быть ответственны за генерацию обнаруженного потока быстрых ионов O^+ , являются комбинации процессов отрыва электронов от высокоэнергичных ионов O^- , акты перезарядки и ионизация электронным ударом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10242, <https://rscf.ru/project/18-79-10242/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *P. Pokorný* // Plasma Process. Polym. – 2010. – Vol. 7. – No. 910.
2. *T. Hirota* // J. Vac. Soc. Japan – 2008. – Vol. 51. – P. 258–263.
3. *J.M. Andersson* // J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 100. – No. 033305.
4. *T. Welzel, K. Ellmer* // Vak. Forsch. und Prax. – 2013. – Vol. 25. – No. 52.
5. *M. Bowes* // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – No. 045204.
6. *S. Mahieu* // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106. – No. 093302.
7. *A.B. Tolstoguzov* // Tech. Phys. Lett. – 2022. – Vol. 48. – No. 38.

РАЗРАБОТКА АПЕРТУРНОГО ЗОНДА С ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

DEVELOPMENT OF APERTURE RETARDING POTENTIAL ANALYZER FOR PLAZMA DIAGNOSIS

^{1,2}Майстренко Д.А., ¹Шагайда А.А.
^{1,2}Maystrenko D., ¹Shagayda A.

¹АО ГНЦ “Центр Келдыша”, г. Москва, Россия,
²Московский физико-технический институт (НИУ) г. Долгопрудный
email: selivanov@kerc.msk.ru

Предложена новая, апертурная конструкция зонда с задерживающим потенциалом для анализа энергетического распределения ионов в плазменных струях электроракетных двигателей. Такой зонд использует ионно-оптическую систему для фокусировки ионного пучка и имеет расширенный рабочий диапазон измеряемых параметров плазмы, длительный ресурс, хорошо контролируемую прозрачность для ионов и может быть использован для измерений, как энергетического спектра ионов, так и абсолютных значений плотности ионного тока. При помощи численного моделирования определены геометрические параметры зонда, обеспечивающие измерение энергоспектров ионов в диапазоне плотностей ионного тока от 0 до 100 А/м² при энергии ионов до 2000 эВ с погрешностью до 2 %. Представлены результаты измерения параметров плазменной струи холлового двигателя мощностью 2.3 кВт.

A new high dynamic range retarding potential analyzer design is proposed to measure the ion energy distribution in electric propulsion plasma plumes. The main difference between the proposed probe and previous designs is an ion-optical system with a high negative accelerating potential. Applying the principle of acceleration and focusing of the ion flow provides the correct operation of the new probe in plasma with an extended operating range of measured plasma densities. Another advantage of the probe is its accurately known and time-stable transparency for ions, so the probe can measure the absolute values of the ion current density like the Faraday probe. The analyzer geometry, which provides measurement in the range of ion current densities up to 100 A/m² at ion energies up to 2000 eV with an error of no more than 2%, was determined using numerical simulation. We present the measurement results of the plasma plume of a Hall effect thruster with a nominal discharge power of 2.3 kW.

В работе представлен результат разработки и экспериментального тестирования апертурного зонда с задерживающим потенциалом, способного измерять энергетический спектр ионов в струе плазмы электроракетных двигателей (ЭРД) в расширенном рабочем диапазоне параметров плазмы. Также в работе рассмотрена возможность использования данного зонда и для измерения плотности ионного тока.

Исследование струи дает возможность не только диагностировать работу ЭРД, но и предсказывать влияние плазмы на бортовые устройства, расположенные в окрестности двигателя. Существующие зонды используют многосеточную

конфигурацию, которая может корректно работать только в узком диапазоне параметров плазмы [1]. Поэтому для диагностики струи на всех углах к оси электроракетного двигателя нужно либо использовать многосеточный зонд с изменяемой геометрией, либо несколько зондов, что достаточно сложно и ухудшает пространственное разрешение системы диагностики. Апертурный зонд, представленный в данном докладе, решает эту проблему и позволяет восстанавливать энергетический спектр ионов как на оси плазменной струи с максимально высокой плотностью тока, так и на периферии, где плотность тока меньше на несколько порядков. Этот зонд использует ионно-оптическую систему с высоким отрицательным потенциалом, которая фокусирует ионный пучок, ускоряя его, и отсекает электроны из пучка. Высокий отсечной отрицательный потенциал позволяет хорошо фокусировать ионный пучок в широком диапазоне концентраций плазмы, что позволяет удерживать погрешность зонда постоянной даже при значительном изменении радиуса Дебая [2]. В работе представлены особенности конструкции зонда и результаты моделирования его работы. Также в докладе показаны результаты экспериментального тестирования апертурного зонда и приведено сравнение работы с зондом многосеточной конструкции. Экспериментальные результаты получены для диапазона плотностей токов от 0,001 до 70 А/м², что значительно превышает диапазон плотностей токов, в котором могут работать классические многосеточные зонды. Сделан вывод о возможности применения апертурного зонда вместо многосеточного зонда и зонда Фарадея в составе системы диагностики ЭРД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Heubel E.* Enhancing Retarding Potential Analyzer Energy Measurements with MicroAligned Electrodes, PhD thesis. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
2. *Maystrenko D., Shagayda A., Kravchenko D., Lovtsov A.* Development of a high dynamic range retarding potential analyzer for the electric propulsion plume diagnosis // Review of Scientific Instruments. – 2022.

ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

PROPAGATION DYNAMICS OF GUIDED STREAMER IN HELIUM ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA JET

Пинчук М.Э.¹, Дьяченко А.А.¹, Иов И.Л.^{1,2}, Степанова О.М.¹
Pinchuk M.E.¹, Dyachenko A.A.¹, Iov I.L.^{1,2}, Stepanova O.M.¹

¹Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук (ИЭЭ РАН), Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9

¹Institute for Electrophysics and Electrical Power of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: pinchme@mail.ru

Исследовалась гелиевая плазменная струя атмосферного давления при взаимодействии с диэлектрическими и проводящими мишенями. Продемонстрирована управляемая динамика развития направленного стримера вблизи мишени при использовании питающего напряжения специальной формы.

A helium atmospheric pressure plasma jet was studied at interaction with dielectric and conducting targets. A controlled dynamics of the guided streamer propagation near the target surface was demonstrated with tailoring applied voltage signal.

Плазменные струи атмосферного давления в потоке благородного газа обладают перспективами внедрения в медицинских и биологических технологиях. Плазменные струи формируются направленными стримерами, проходящими по потоку газа в период питающего напряжения.

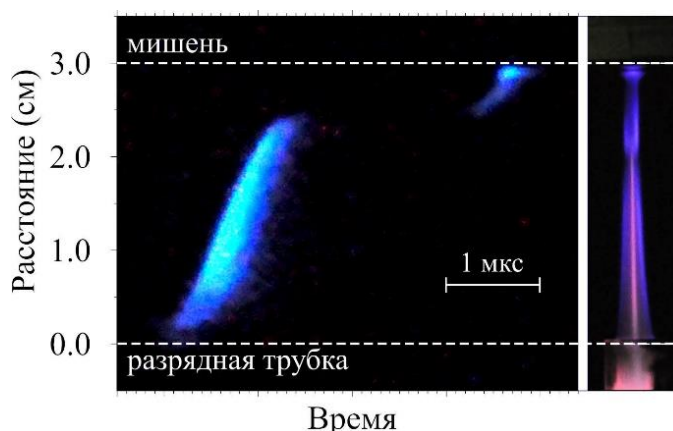


Рис. 1. Фоторазвертка направленного стримера (слева) в ступенчатом режиме распространения и интегральное фото (справа) плазменной струи, направленной вверх, при взаимодействии с кварцевой мишенью

В докладе продемонстрированы особенности динамика направленного стримера в плазменных струях гелия атмосферного давления вблизи поверхности различных мишеней при использовании питающего напряжения специальной формы. Струя плазмы создавалась барьерным разрядом в кварцевой трубке с электродной системой, состоящей из центрального стержневого и внешнего кольцевого электродов. Исследовались системы с диэлектрическими и проводящими мишенями, соединенными с землей через измерительную цепь и без заземления. Напряжение специальной формы позволило плавно изменять режим распространения направленного стримера в плазменной струе. На рисунке 1 показана фоторазвертка направленного стримера в ступенчатом режиме распространения и интегральное фото плазменной струи при взаимодействии с кварцевой мишенью. Показано, что, изменяя амплитуду напряжения, скважность и форму волны напряжения, можно управлять динамикой стримера, останавливая на определенное время распространение стримера вблизи мишени. Дополнительную информацию можно найти в [1].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-29-01215, <https://rscf.ru/project/22-29-01215/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *M. Pinchuk, O. Stepanova, M. Gromov, A. Nikiforov // Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade. – 2022. – Vol. 163. – No. 102.*

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ФОНОВОЙ ВЧИ ПЛАЗМЕ

STUDY OF LASER-INDUCED DESORPTION SPECTROSCOPY MODES IN BACKGROUND INDUCTIVELY COUPLED RF PLASMA

Рыкунов Г.И.^{1,2}, Казиев А.В.¹, Колодко Д.В.^{1,2}, Алиева А.И.¹, Гаспарян Ю.М.¹
Rykunov G.I.^{1,2}, Kaziev A.V.¹, Kolodko D.V.^{1,2}, Alieva A.I.¹, Gasparyan Yu.M.¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», РФ;
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, РФ; 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53
e-mail: georg_rykunov@mail.ru

Сообщается о реализации способа неразрушающей диагностики содержания примесей газа в поверхности твердого тела на основе лазерно-индуцированной десорбции в присутствии фоновой плазмы высокочастотного разряда. Наличие водорода в тестовом образце из Ti-V геттера определено по излучению серии Бальмера.

An implementation of contactless diagnostics of the gas impurities content in the surface of a solid body based on laser-induced desorption in background radiofrequency discharge plasma is reported. The presence of hydrogen in a test Ti-V getter sample was determined by identifying the emission in Balmer series.

Разработка дистанционных методов диагностики содержания водорода и его изотопов в стенках термоядерных установок является важным направлением исследований взаимодействия плазмы с поверхностью. В последнее время возобновился интерес к лазерным методам анализа в сочетании с оптической спектроскопией для локального измерения состава поверхности, включая спектроскопию лазерно-индуцированного пробоя, абляции и десорбции. Большое внимание привлекает неразрушающая методика LIDS, требующая для диагностики наличия фоновой диффузной плазмы [1, 2].

В работе представлены результаты диагностики методом LIDS тестового образца из титан-ванадиевого геттера. Данный материал характеризуется высокой способностью к накоплению водорода.

Эксперименты проводились на установке с находящейся в вакууме планарной ВЧ антенной, генерирующей высокочастотный индукционный (ВЧИ) разряд, который служил источником фоновой плазмы для LIDS диагностики [3]. Вкладываемая мощность лежала в диапазоне от 410 до 1000 Вт. Рабочий газ – аргон; давление – 5×10^{-3} Торр. Источником излучения служил лазер на неодимовом силикатном стекле (ГЛС-8) с ламповой накачкой, работающий в режиме свободной генерации на длине волны $\lambda = 1054$ нм, с длительностью импульса 0,5 мс.

Выходной диаметр пучка лазера составлял 12 ± 1 мм. На данном лазере были получены значения выходной энергии от 1 до 25 Дж.

Экспериментально определены оптимальные значения мощности ВЧИ ряда и энергии лазерного импульса, которые необходимы для получения хорошей повторяемости значений интенсивности излучения линий водорода при LIDS диагностике образца Ti-V геттера. Эти результаты могут быть использованы для создания более эффективных и точных методов диагностики плазмы в будущем.

По результатам измерений получены зависимости интенсивности линий излучения атомов водорода и аргона от мощности лазера при облучении поверхности образца. Один и тот же образец облучался подряд несколькими сериями (от 2 Дж до 13 Дж энергии лазера). Результаты показаны на рисунке 1.

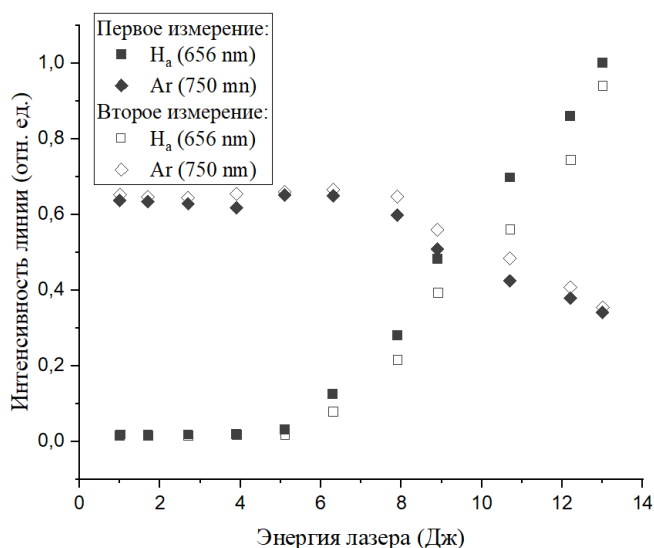


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения некоторых линий водорода и аргона от энергии лазерного импульса при облучении образца

Обнаружен эффект локального вытеснения фонового аргона в процессе высвобождения водорода с поверхности образца при энергии лазера более 8 Дж.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект №0723-2020-0043).

ЛИТЕРАТУРА

1. *C. Linsmeier* Development of advanced high heat flux and plasma-facing materials // Nucl. Fusion. – 2017. – Vol. 57. – No. 2.
2. *J.H. Yu, M.J. Baldwin, M.J. Simmonds, A. Zaloznik* Time-resolved laser-induced desorption spectroscopy (LIDS) for quantified in-situ hydrogen isotope retention measurement and removal from plasma facing materials // Rev. Sci. Instrum. – 2019. – Vol. 90 – No. 121.
3. *G.I. Rykunov* A compact setup for laser-induced desorption spectroscopy in background RF plasma // Proc. of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). – 2022. – Vol. 8. – No. 245.

ЦИФРОВОЙ МЕТОД КОРРЕЛИРОВАННОГО ПО ВРЕМЕНИ СЧЕТА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

DIGITAL METHOD OF TIME CORRELATED SINGLE PHOTON COUNTING FOR BARRIER DISCHARGE DIAGNOSIS

Селивонин И.В.¹, Кувардин С.Е.^{1,2}, Моралев И.А.¹
Selivonin I.V.¹, Kuvardin S.E.^{1,2}, Moralev I.A.¹

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412,
г. Москва, ул. Ижорская, 13/2*

²*Московский физико-технический институт, Россия, 141701, г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.
e-mail: inock691@ya.ru*

В работе для изучения развития поверхностного барьерного разряда был реализован метод подсчета одиночных фотонов с временной корреляцией (TCSPC) с цифровой постобработкой. Показано, что разрешение, полученное с цифровым TCSPC, не хуже 300 пс при времени нарастания функции фотоприемников 20 нс и частоте дискретизации осциллографа 10 ГГц. Метод позволил продемонстрировать многоимпульсный режим ПБР, получить пространственно-временные диаграммы его светового излучения и оценить скорость распространения отрицательных и положительных микрозарядов.

In this work the Time Correlated Single Photon Counting (TCSPC) method with digital post-processing was implemented to study the development of a surface barrier discharge. The resolution obtained with digital TCSPC was shown to be no worse than 300 ps with photodetectors function rise time 20 ns and oscilloscope sample rate 10 GHz. Selection of the pulses after at the postprocessing stage allowed to demonstrate the multipulse mode of the DBD, obtain the space-time diagrams of the discharge light emission and estimate the velocity of negative and positive microdischarges propagation.

Поверхностный барьерный разряд (БР) представляет собой слаботочный разряд высокого давления, который инициируется в электродной системе с диэлектриком на пути разряда. БР в атмосферных условиях существует в виде отдельных микрозарядов (МР). Начальная стадия развития МР происходит в субнаносекундные времена. Поскольку формирование МР является стохастическим процессом, изучение полного времени развития отдельного микрозаряда представляет собой нетривиальную задачу.

Для решения этой проблемы может быть использован метод коррелированного по времени счета одиночных фотонов (TCSPC), который обеспечивает высокое временное разрешение и хороший динамический диапазон. Суть метода заключается том, что вместо прямой регистрации динамики интенсивности вторяющихся световых импульсов (соответствующих микрозарядам) определя-

ется статистически усредненная корреляционная функция между двумя оптическими сигналами, поступающими от одного источника). В работе метод был реализован с цифровой постобработкой, что позволило выполнять отбор и сортировку световых импульсов по электрическим характеристикам микрозарядов.

В результате реализации метода были получены пространственно-временные диаграммы светимости отрицательных и положительных МР (рис. 1). По диаграммам можно оценить среднюю скорость распространения отрицательных и положительных, которая составила, соответственно $3 \cdot 10^5$ м/с и $5 \cdot 10^5$ м/с, что неплохо согласуется с литературными данными.

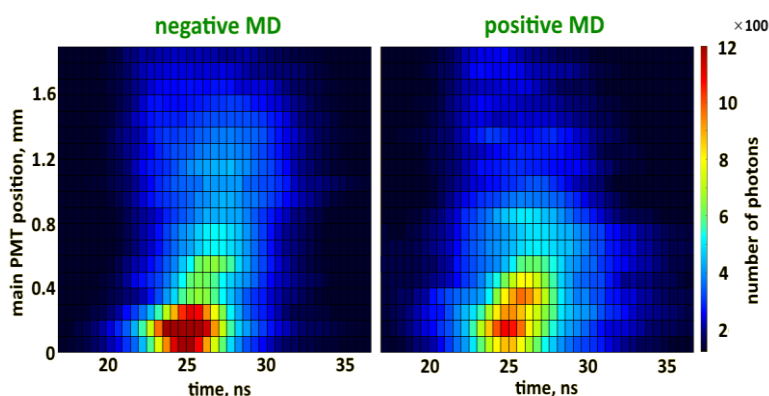


Рис.1. Пространственно-временные диаграммы светимости разряда

По времени нарастания интегрального импульса светимости (рис. 2) можно оценить временное разрешение метода, которое оказывается не хуже 300 пс (уровень 20–80%). Это намного выше разрешения оптического сигнала одиночного ФЭУ (время нарастания около 15 нс) и превышает полосу входных частот осциллографа. Предположительно, разрешение метода может быть увеличено до значения порядка 100 пс за счет увеличения количества собираемых фотонов.

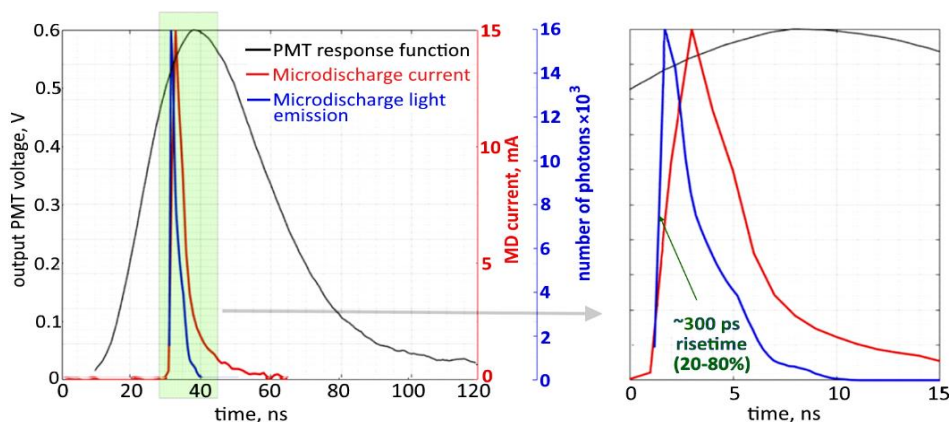


Рис. 2. Сравнение динамики светимости и тока МР

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

INVESTIGATION OF THE THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF A SHARED ELECTRIC DISCHARGE

Семенов М.Н.¹, Гайсин Аз.Ф.¹, Гайсин Ал.Ф.², Гайсин Ф.М.³.
Semenov M.N.¹, Gaisin Az.F.¹, Gaisin Al.F.², Gaisin F.M.³.

¹ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

²Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

³ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева -КАИ», Россия, 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10
e-mail: maxim.snt@inbox.ru

Исследованы термограммы поверхности струйного и металлического электродов в процессе горения разряда.

The thermograms of the jet and metal electrodes of the surface in the process of discharge burning have been studied

Газоразрядная плазма с жидкими (неметаллическим) электродами представляет собой быстро развивающуюся междисциплинарную область исследований, включающую в себя науку о плазме, гидрогазодинамике, тепломассопереносе, многофазной химии и фотолизе [1]. В отличие от разрядов между твердыми электродами (тлеющий, дуговой, искровой, коронный и др.) [2], разряды в плазменно-жидкостных системах генерируются постоянным или переменным током в межэлектродном промежутке, где один или оба электрода являются проточной или непроточной жидкостью [3]. В качестве жидкого электрода, как правило, применяются растворы солей различных концентраций в технической, дистиллированной или водопроводной воде. Для устранения флуктуаций при проведении эксперимента, обусловленных составом водопроводной воды, ее подвергают предварительной очистке. Зажигание разряда в плазменно-жидкостных системах осуществляется при различных типах и конфигурациях электродов в газоразрядной камере [4 – 13].

Для анализа распределения температуры исследуемой поверхности металлического и электролитического электродов в процессе горения ВЧ разряда использовалась тепловизионная камера марки «FLIRA6500SC» с пространственным разрешением детектора 640 x 512 пикселей при рабочем спектральном диапазоне 3,6 - 4,9 мкм. Тепловизор обеспечивал фиксирование температуры поверхности электродов в калиброванном диапазоне от 4 – 2400 °С. Для калиб-

ровки тепловизионной камеры использовался многоволновый пирометр. Применение пирометра было обусловлено тем, что при горении разряда могут образовываться оксидная пленка и окалина, которые могут приводить к погрешностям измеряемой температуры. Обработка полученных значений проводилась на ЭВМ с программным обеспечением «ALTAIR v5.91.010».

В качестве струйного электрода применялся 7% раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ в водопроводной воде, а качестве металлического электрода медная пластина марки М1. Из термограммы следует, что температура струи меняется в диапазоне $T_c = 60 - 77^\circ\text{C}$. Анализ распределения температуры вдоль поверхности медного электрода показывает, что в точке взаимодействия электродов температура равна $T = 74^\circ\text{C}$. Вдоль металлического электрода температура циклично меняется в диапазоне $T = 61 - 74^\circ\text{C}$, что обусловлено прохождением нагретой жидкости через зону формирования разряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Y.P. Raizer, J.E. Allen, V.I. Kisin Gas Discharge Physics.* – Berlin: Springer, 1997.
2. *К.Н. Каримов, Э.Ф. Вознесенский, Ю.А. Тимошина // Титан.* – 2022. – Т. 75. – № 33.
3. *Р.Н. Кашапов, Л.Н. Кашапов, Н.Ф. Кашапов // ТВТ.* – 2021. – Т. 59. – № 869.
4. *Р.И. Валиев, А.А. Хафизов, Л.Н. Багаутдинова // ТВТ.* – 2021. – Т. 59. – № 634.
5. *Э.Е. Сон, Р.Ш. Садриев, А.Ф. Гайсин // ТВТ.* – 2014. – Т. 59. – № 961.
6. *И.И. Галимзянов, А.Ф. Гайсин, И.Т. Фахрутдинова // ТВТ.* – 2018. – Т. 56. – № 306.
7. *С.Ю. Петряков, Д.Н. Мирханов, Ал.Ф. Гайсин // Прикладная механика и техническая физика.* – 2022. – Т. 63. – № 20.
8. *В.С. Желтухин, Ал.Ф. Гайсин, С.Ю. Петряков // ПЖТФ.* – 2022. – Т. 48. – № 24.
9. *Ал.Ф. Гайсин, Ф.М. Гайсин, В.С. Желтухин // Физика плазмы.* – 2022. – Т. 48 – № 71.
10. *А.Ф. Гайсин, А.Х. Гильмутдинов // Физика и химия обработки материалов.* – 2020. – Т. 2. – № 28.
11. *А.Ф. Гайсин, А.Х. Гильмутдинов, Д.Н. Мирханов // Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2018. – Т. 752. – № 69.
12. *А.И. Кунутдинова, Л.И. Ахмадуллина, А.Ф. Гайсин // Вестник Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева.* – 2020. – Т. 76. – № 10.
13. *M.F. Akhatov, R.R. Kayumov, R.R. Mardanov // Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 1870. – P. 012024.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ПРИ АБЛЯЦИИ ПОЛИМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE GAS-PLASMA FLOWS DYNAMICS DURING POLYMERS ABLATION UNDER THE VUV IRRADIATION

Павлов А.В.¹, Протасов Ю.Ю.¹, Скрябин А.С.¹, Телех В.Д.¹, Щепанюк Т.С.¹
Pavlov A.V.¹, Protasov Yu.Yu.¹, Skriabin A.S.¹, Telekh V.D.¹, Shchepanuk T.S.¹

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
e-mail: telekh@bmstu.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования светоэрозии и динамики разлета плазмы, возникающей при облучении полимерных образцов высокояркостным широкополосным излучением вакуумного ультрафиолетового диапазона спектра.

The experimental study results of light erosion and the plasma expansion dynamics that occurs when polymer samples are irradiated with high-brightness broadband radiation of the vacuum ultraviolet spectrum range are presented.

Исследование процессов, сопровождающих взаимодействие высокояркостного широкополосного излучения и высокоэнтальпийных газо-плазменных потоков с конденсированными средами (конструкционными материалами, диэлектриками, перспективными многокомпонентными покрытиями) представляется актуальным в связи с многочисленными техническими задачами, например для оптимизации режимов работы плазменных ускорителей и электродинамических устройств где светоэрозия (абляция) изолятора и электродов под действием излучения определяет массовый расход плазмообразующего вещества [1, 2]. К таким устройствам относятся лазерные ракетные двигатели и абляционные импульсные плазменные двигатели. В основе работы этих двигателей лежит возникновение удельного механического импульса отдачи при испарении полимера в условиях экстремального теплового и радиационного нагружения. Такие двигатели активно разрабатываются в настоящее время в связи с бурным развитием малых космических аппаратов – нано- и пико спутников [3, 4].

Для анализа особенностей приповерхностных процессов при светоэрозии был выполнен цикл исследований динамики и макроструктуры приповерхностных газопоплазменных потоков, возникающих при испарении конденсированных веществ (КВ) в поле широкополосного излучения УФ-ВУФ диапазона спектра. В качестве источника высокояркостного ВУФ излучения использовался коротковолновый излучатель несинхротронного типа на основе коаксиального сильноточного плазменного ускорителя – магнитоплазменного компрессора (МПК) эрозионного типа [5]. Особенность такого устройства является способность генерации мощного широкополосного излучения, чей спектр определяется

пропускательной способностью газовой среды в камере (буферный газ выполняет роль фильтра для жесткой компоненты эмиссионного спектра излучающей плазмы), коротковолновая граница спектра излучения таких разрядов определяется первым потенциалом ионизации фонового газа.

Для визуализации, качественного и количественного описания газодинамического отклика от образцов при ВУФ-облучении использовалась оптическая лазерная диагностика [6, 7]. Она включала в себя лазерную голографическую интерферометрию с двойной экспозицией и шпирен-фотографию по схеме Теплера в режиме светового поля. По полученным интерферограммам и шпирен снимкам установлено, что все исследованные материалы испаряются под действием излучения разряда при наличии высокоэнергетичных квантов, при этом над мишенью выделяются две зоны: зона ударно-сжатого газа (отделенная от фонового газа ударной волной (УВ)) и зона паров мишени (отделенная от ударно-сжатого газа контактной границей (КГ)). Таким образом, реализуется режим «плазменного поршня» – материал мишени испаряется, пары нагреваются, ионизируются и толкают, как поршень, окружающий газ, создавая в нем УВ.

Комплексный анализ и разработанная методика количественной обработки полученных интерферограмм позволяет определить параметры как ударной волны и ударносжатого слоя, так и плазменного слоя, образованного из паров материала образца в результате эффективной фотоионизации.

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tiankun Huang, Zhiwen Wu, Guorui Sun, Xiangyang Liu, William Yeong Liang Ling // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 173. – No. 69.*
2. *Phipps C. // Springer Series in Materials Science. – 2018. – Vol. 274. – No. 217.*
3. *Lemmer K. // Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 134. – No. 231.*
4. *Shumeiko A.I., Telekh V.D., Mayorova V.I // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 191. – Is. 2. – No. 431.*
5. *Kamrukov A.S. // High Temperature. – 1989. – Vol. 27. – Is. 1. – No. 141.*
6. *Pavlov A.V., Protasov Yu.Yu., Telekh V.D., Shchepanuk T.S. // Scientific Visualization. – 2019. – Vol. 11. – No. 3. – P. 111.*
7. *Pavlov A.V., Shchepanyuk T.S., Skriabin A.S., Telekh V.D. // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – No. 3940.*

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕПРЕРЫВНОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ

TIME-OF-FLIGHT MASS SPECTROMETER FOR DIAGNOSTICS OF A CONTINUOUS PLASMA FLOW

Усманов Р.А., Мельников А.Д., Гавриков А.В., Антонов Н.Н., Полищук В.П.
Usmanov R.A., Melnikov A.D., Gavrikov A.V., Antonov N.N., Polishchuk V.P.

*ОИВТ РАН, Российская Федерация, 125412,
г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
e-mail: usmanov.r@ihed.ras.ru*

Разработан и создан времяпролетный масс-спектрометр, основанный на модифицированном подходе двух полевого ускорения ионов. Спектрометр применен для диагностики непрерывного потока плазмы вакуумной дуги постоянного тока с горячим керамическим катодом. Вакуумная дуга инициировалась при температуре катода ≥ 2000 К при плотности тока ~ 10 А/см². Использовались два типа катодных материалов – диоксид церия и его смесь с порошком хрома. Разрешающая способность спектрометра составляла ~ 20 , что позволяло разрешать сигналы ионизированных молекул и атомов оксида с разницей масс 16 а.е.м. Представлены результаты определения ионного состава плазменных потоков, включая абсолютные измерения плотности ионов в зависимости от тока дуги и температуры катода.

The time-of-flight mass spectrometer based on modified two-field acceleration approach of Wiley and McLaren was applied for diagnostics of a continuous plasma flow of DC vacuum arc with hot ceramic cathode. Generation and studies of plasma flows of ceramic materials is relevant for coating technologies. DC vacuum arc was initiated on hot cathode ($T \geq 2000$ K) and has a diffuse cathode current attachment with current density about 10 A/cm². Two types of cathode materials were used – cerium dioxide and its mixture with chromium powder. The resolution of the spectrometer was ~ 20 , it allowed resolving signals of ionized oxide molecules and atoms with mass difference of 16 u. The results of ion composition of the plasma flows, including absolute measurements of ion densities, depending on arc current and cathode temperature are presented.

A diffuse vacuum arc [1] is a promising source of cathode material plasma for use in a number of applied problems. This discharge is distinguished by the stability of the burning voltage and the absence of drops of cathode material, which is achieved by maintaining the cathode at a sufficiently high temperature. It also becomes possible to initiate a discharge on dielectric substances [1]. The report is devoted to determination of ion composition of diffuse vacuum arc plasma of evaporated cathode made of cerium dioxide and its mixture with chromium powder.

One of the most informative diagnostic approach to get ion composition of plasma flow is mass spectrometry. To measure the ion composition of the continuous plasma flow of diffuse DC arc the time-of-flight mass spectrometer (TOFMS) based on modified two-field acceleration approach of Wiley and McLaren was designed [2]. The

resolution of the TOFMS was ~ 20 , it allowed resolving signals of ionized atoms and oxide molecules with mass difference of 16 u.

The discharge was initiated in vacuum chamber with residual gas pressure less than 10 mPa. The working substance of the arc (cathode) was placed in a molybdenum crucible with an outer diameter of about 24 mm and a height of 14 mm. The crucible was heated using an electron beam heater (EBH) with a power of up to 1.5 kW. The discharge anode was a molybdenum plate with a central hole of 14 mm in diameter for the plasma outlet. The interelectrode distance was about 3 cm. A feature of the system was that the operating temperature of the cathode crucible could be varied at a fixed discharge current by changing the EBH power. It will be controlled within the range of 1.5–2.5 kK, depending on the cathode material. The temperature of the side surface of the crucible was measured using a brightness pyrometer.

The inlet of the TOFMS was located at a distance of about 190 mm from the cathode of the discharge. The plasma concentration at the entrance to the spectrometer was about 10^{10} cm^{-3} , that was measured by single Langmuir probe.

The results of measurements show that in case of pure cerium dioxide cathode a significant part of the arc plasma is presented by ions of crucible material (Mo) as well as cerium and cerium monoxide ions (Fig 1) [3]. In contrast, when the mixture of cerium dioxide and chromium powder was used as the cathode plasma, the flow was consisted mainly by chromium ions (Fig. 1), and cerium ions appear only after long arc burning and depletion of chromium in the crucible.

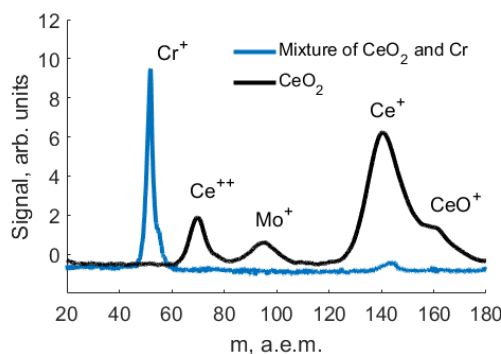


Figure. 1. Ion spectrum of diffuse vacuum arc plasma of CeO_2 cathode and the cathode made of CeO_2 and Cr powders

This study was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 21-72-00077), <https://rscf.ru/en/project/21-72-00077/>.

REFERENCES

1. V.P. Polishchuk // High Temperature. – 2020. – Vol. 58. – No. 476.
2. R. Usmanov // Review of Scientific Instruments. – 2022. – Vol. 93. – No. 73505.
3. A.D. Melnikov // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2023. – Vol. 43. – No. 347.

ХАОТИЧЕСКОЕ И НАПРАВЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ

CHAOTIC AND DIRECTED ION MOTION IN A VACUUM ARC PLASMA

Кириллов Д.В., Шимлых П.А., Рязанов В.А.
Kirillov D.V., Shimlykh P.A., Riazanov V.A.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005 г. Москва,
2-я Бауманская улица, 5, стр. 4.
e-mail: shimlykh@bmstu.ru*

Работа посвящена анализу средней энергии ионной составляющей плазмы вакуумного дугового разряда. Из анализа литературных данных было выдвинуто предположение, что в плазме содержатся ионы, имеющие как направленный характер движения (ионы в пучке), так и хаотически движущиеся ионы. Для проверки этого предположения были использованы два перпендикулярных плоских зонда для измерений соотношения содержания ионов в пучке и «тепловых» ионов. Показано, что предположение о содержании двух компонент ионной составляющей в плазме вакуумно-дугового разряда верно, а также получено соотношение концентраций между двумя этими составляющими.

This work is devoted to analysis of average energy of ion component of vacuum arc discharge plasma. A hypothesis put forward that in plasma exists both directed motion ions (beam ions), and chaotic motion ions. Two flat probes in mutually perpendicular planes were used to measure the relative ratio of the beam ions and chaotic motion ions. It is shown that the hypothesis about the two components of the ionic component in the plasma of a vacuum arc discharge is correct. The ratio of concentrations between these two components was obtained.

В процессе нанесения покрытия вакуумно-дуговым методом с поверхности катода из области катодного пятна летят электроны, незначительное количество нейтральных атомов, микрокапли материала катода и ионы, в основном формирующие покрытие. Считается [1, 2], что для расчета теплового состояния подложек, для точного контроля условия осаждения, анализа потенциала смещения, а также понимания процессов, происходящих в плазме разряда, необходимо учитывать энергию ионов. Основываясь на работах [1 – 3], было предположено, что в плазме вакуумно-дугового разряда существуют две фазы ионов: «тепловые» ионы и направленные ионы пучка. Работа посвящена проверке верности этого предположения и определению соотношения этих фаз.

В работе был принят ряд допущений: ток, проходящий на боковые поверхности и контакты зонда пренебрежимо мал, на зонды приходит только ионный ток, пропорциональный концентрации ионов, тепловые скорости ионов имеют распределение по Максвеллу, заряд «тепловых» ионов равен 1, а ионы пучка имеют моноэнергетическое распределение и прямолинейные траектории. Орбитальным движением пренебрегли ввиду высоких скоростей и малости зондов.

Эксперимент проводился с использованием торцевого стационарного вакуумно-дугового испарителя с титановым катодом диаметром 76 мм при давлении аргона в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Ток разряда составлял 100 А, а напряжение

– 19 В. Для определения соотношения ионных фаз использовалась система двух взаимно перпендикулярных плоских зондов. Зонд 1 (рисунок 1) располагался перпендикулярно потоку плазмы и принимал на себя ток направленных ионов и «тепловых» ионов. Зонд 2 располагался параллельно потоку и принимал на себя преимущественно ток «тепловых» ионов. Зонды были размещены на расстоянии $L = 250$ мм от поверхности катода. Материалом зондов была выбрана танталовая фольга толщиной 0,1 мм размером 3,2×3,2 мм.

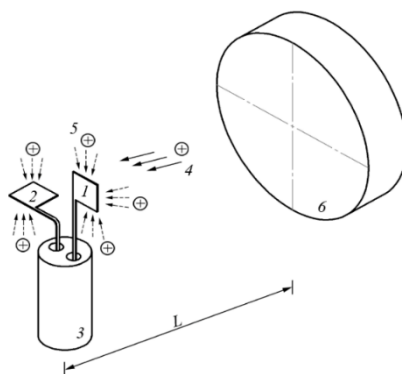


Рис. 1. Схема зондов для измерения токов «тепловых» ионов I_{iT} и направленных ионов пучка I_{ib} . 1, 2 – зонды, 3 – керамическая трубка, 4 – ионный пучок, 5 – «тепловые» ионы, 6 – катод вакуумного дугового испарителя

По экспериментальным данным были определены соотношения концентраций ионных фаз. Основными уравнениями, используемыми для расчета отношения концентраций ионных фаз, были уравнение Бома, закон Ома, уравнение квазинейтральности и отношение токов на зонды. При расчете было принято, что средний заряд ионов пучка для титана $Z = 2,1$, температура электронов $T_e = 5$ эВ, а скорость ионов пучка $V_i = 2,2 \times 10^4$ м/с [3].

В результате было получено соотношение токов на зонды $I_{ib}/I_{iT} = 3,3$ и соотношение ионных фаз при концентрации плазмы $1,9 \cdot 10^{16}$ м⁻³. Доля ионов пучка составил всего 15 %. Таким образом, «тепловые» ионы составляют большую часть ионного потока, приходящего на поверхность в зоне напыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bizyukov A.A., Chibisov A.D., Romashchenko E.V.* // Problems of atomic science and technology, Series: Plasma Physics. – 2021. – Vol. 27. – No. 69.
2. *Nikolaev A., Oks E., Frolova V.* High-Current Vacuum-Arc Plasma Source for Producing Supersonic Plasma Flows in Magnetic Fields // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 15th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2020.
3. *Oks E.M., Yushkov G.Yu., Anders A.* A summary of recent experimental research on ion energy and charge states of pulsed vacuum arcs // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – 2008. – Vol. 2. – No. 314.

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ СКИНОВОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В МЕГАГАУСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A CONDUCTOR EXPLOSION IN MEGAGAUSS MAGNETIC FIELDS OBTAINED IN THE OPTICAL RANGE WITH TIME RESOLUTION

Дацко И.М.¹, Чайковский С.А.^{1,2}, Русских А.Г.¹, Ванькевич В.А.¹,
Жигалин А.С.¹, Орешкин В.И.¹
Datsko I.M.¹, Chaikovskiy S.A.^{1,2}, Rousskikh A.G.¹, Van'kevich V.A.¹,
Zhigalin A.S.¹, Oreshkin V.I.¹

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН,
Россия, Томск 634055, проспект Академический 2/3*

²*Институт Электрофизики УО РАН,
Россия 620016, Екатеринбург, Амундсена 106
e-mail: datsko@ovpe.hcei.tsc.ru*

На тераваттном генераторе МИГ при наносекундном взрыве цилиндрических проводников и плоских фольг получены спектры излучения в оптическом диапазоне с временным разрешением. Показано отсутствие линейчатого излучения в этом диапазоне длин волн для проводников с начальным диаметром более 0,5 мм. Непрерывный спектр теплового излучения поверхности нагрузок имеет вид зависимости мощности излучения черного тела от длины волны с температурой около 1 эВ.

As a result of the experiments, the optical emission spectra of conductors (cylindrical conductors and flat foils) exploded in the skin mode on the MIG facility were obtained. The absence of line radiation in the visible range for conductors with an initial diameter of more than 0.5 mm is shown. The continuous spectrum of thermal radiation of the load surface has the form of a dependence of the radiation power of a black body with a temperature of about 1 eV on the wavelength.

Электрический взрыв проводников является одним из основных источников получения экспериментальной информации о транспортных и теплофизических свойствах "теплой" плазмы, когда вещество в ней находится в состоянии, в котором потенциальная энергия взаимодействия электронов с ядрами имеет один порядок с кинетической энергией электронов. Для такого состояния характерны значения массовой плотности вещества порядка твердотельной и температуры плазмы единицы-десятки электронвольт. Эксперименты по электрическому взрыву проводников (ЭВП) проводились на импульсном генераторе МИГ [1], который обеспечивает амплитуду тока до 2.5 МА при времени нарастания около 100 нс. Диагностика, использованная в экспериментах, включала в себя электротехнические измерения тока и напряжения. Для получения изображения проводников в видимом диапазоне спектра в различные моменты времени от начала протекания тока использовалась четырехкадровая оптическая камера HSFC Pro

с длительностью экспозиции одного кадра 3 нс. Спектральные измерения с временным разрешением производилась с помощью камеры «Universal streak camera C10910-05 Hamamatsu Photonics», синхронизированной с установкой МИГ. В эту камеру был установлен спектрограф «Action Spectra PRO SP-2300 Princeton Instruments». При съемках использовалась спектральная развертка длительностью 500 нс. Изображение взрывающихся проводников с помощью объектива Industar-37 строилось с увеличением в 5 раз в плоскости x - z (x - радиус, z - длина проводника), которая была параллельна плоскости расположения входной щели спектрометра (входная щель спектрометра была ориентирована поперек оси z проводника (и, соответственно, поперек направления протекания тока). Входная щель спектрометра была ориентирована на центр межэлектродного промежутка для исключения влияния приэлектродных процессов при регистрации спектров. Используя диафрагму перед входной щелью спектрографа, ориентированную вдоль оси z проводника, в экспериментах мог регистрироваться спектр любого участка проводника по его диаметру. Длина участка проводника, с которого излучение попадало на спектрограф, определялась шириной входной щели спектрометра и была ≈ 200 мкм с учетом $K_{ув}$ объектива. Спектральное разрешение прибора составляло 8 нм. Калибровка спектрометра по длинам волн осуществлялась при помощи искрового разряда в атмосфере водорода.

Получен спектр излучения при скиновом взрыве плоских и цилиндрических нагрузок. Показано отсутствие линейчатого излучения в видимом диапазоне. Непрерывный спектр теплового излучения поверхности нагрузок имеет вид зависимости мощности излучения черного тела от длины волны с температурой около 1 эВ. При этом датчики в ультрафиолетовом диапазоне регистрировали температуру порядка 10 эВ в приближении абсолютно черного тела. По-видимому, нагрев плазмы протекающим током в большей степени происходит внутри проводника, что подтверждают расчеты распределения плотности тока по радиусу во времени. При уменьшении диаметра проводника до 90 мкм наблюдалось линейчатое излучение в видимом диапазоне, но очень короткое время – менее 10 нс. Спектральные измерения при взрыве проводников на установке ИМРИ-5 (амплитуда тока 450 кА, фронт нарастания тока 500 нс.) подтвердили отсутствие линейчатого излучения у цилиндрических проводников с большим диаметром и его появление при уменьшении их диаметра до определенных значений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (гранты № 20-19-00364 и № 22-19-00686).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лучинский А.В., Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Шепелев А.Н. // Известия вузов. Физика. – 1997. – Т. 40. – № 12. – С. 67–75.

СВЕРХБЫСТРЫЙ ЭРОЗИОННЫЙ КЛАПАН ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗО-ПЛАЗМЕННЫХ ЛАЙНЕРОВ

ULTRA-FAST EROSIIVE VALVE FOR THE FORMATION OF GAS-PLASMA LINERS

Жигалин А.С.¹, Русских А.Г.¹, Орешкин В.И.¹, Артёмов А.П.¹
Zhigalin A.S.¹, Rousskikh A.G.¹, Oreshkin V.I.¹, Artyomov A.P.¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3
e-mail: Zhigalin@ovpe2.hcei.tsc.ru

В статье описан новый метод формирования газо-плазменной струи в вакууме. Использование электромагнитных и электродинамических газовых клапанов исключается из-за очень низкой скорости их открытия. Основными требованиями нового метода являлись: 1 - время открытия клапана должно быть существенно меньше времени формирования плазменной оболочки Z-пинча и 2 - газ должен быть ионизированным. В процессе проведения экспериментов регистрировалось изображение формируемой газо-плазменной струи, определялся её начальный радиус, скорость распространения и погонная масса в различные моменты времени.

The article describes a new method for the formation of a gas-plasma jet in a vacuum. The use of electromagnetic and electrodynamic gas valves is excluded due to their very low opening velocity. The main requirements of the new method were: 1 - the valve opening time must be significantly less than the time of formation of the Z-pinch plasma sheath and 2 - the gas must be ionized. During the experiments, the image of the formed gas-plasma jet was recorded, its initial radius, propagation velocity and linear mass were determined at various moments in time.

Эксперименты проводились на установке ИМРИ-5 [1]. На рис.1 показана принципиальная схема нового метода формирования газо-плазменной струи.

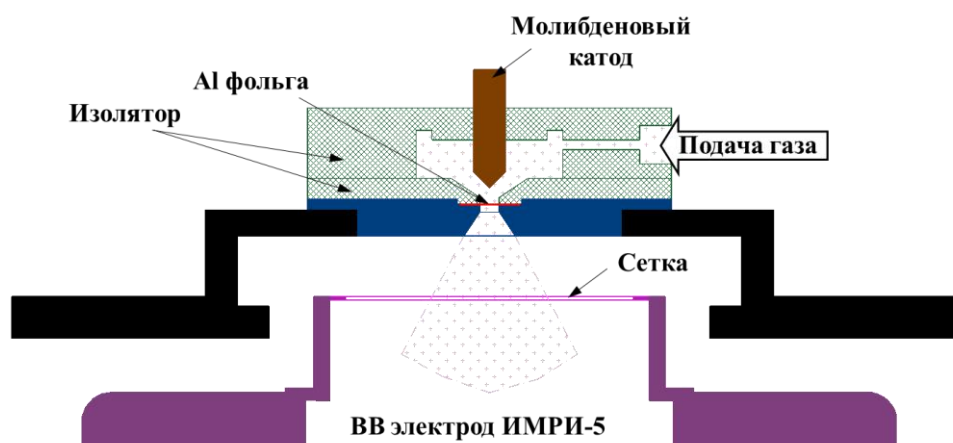


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Между молибденовым катодом и фольгой (анодом), которая закрывает центральное отверстие зажигается сильноточная дуга, которая достаточно быстро

(единицы микросекунд) испаряет фольгу открывая отверстие. В результате горения дугового разряда в потоке газа, газ ионизуется и формируется газо-плазменная струя. Через некоторое время после начала поступления плазмы в межэлектродный вакуумный промежуток сильноточного генератора ИМРИ-5 формируется плазменная среда с необходимыми нам параметрами (такими как диаметр и погонная масса). После того как необходимая нам нагрузка создана, включается сильноточный генератор, и подготовленная плазменная нагрузка сжимается собственным магнитным полем протекающего тока генератора.

Одним из важных элементов данной схемы является алюминиевая фольга, закрывающая выпускное центральное отверстие, разделяющее газовую и вакуумную камеры (см. рис.1). На рис.2 показана экспериментальная зависимость величины давления газа, при котором происходит разрушение фольги от её толщины. Диаметр отверстия 6 мм, края отверстия скруглены и отшлифованы до гладкого состояния.

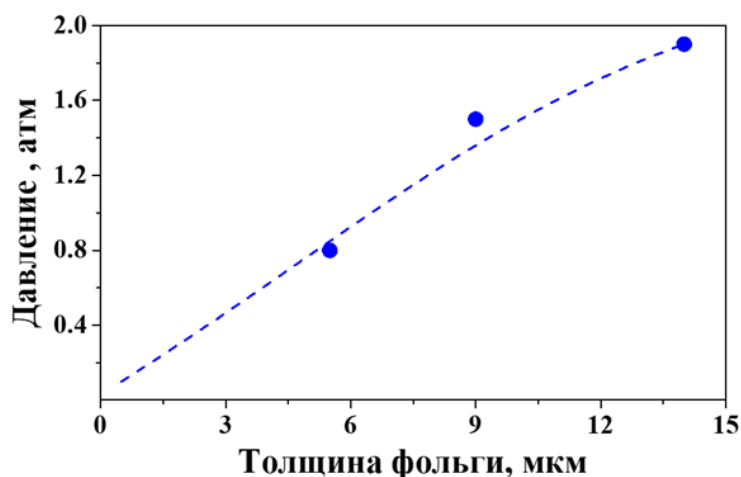


Рис. 2. Экспериментальная зависимость величины давления газа, при котором происходит разрушение фольги от её толщины

Покадровая съемка газо-плазменной струи в различные моменты времени от начала протекания тока дугового разряда, позволила определить время испарения фольги (которое составило 1.8 мкс) и скорость распространения плотной части плазменной струи (которое составило около 0.1 см/мкс в горизонтальном и 0.2 см/мкс в вертикальном направлении).

Данная работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-19-00686).

ЛИТЕРАТУРА

1. A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, N.A. Labetskaya, S.A. Chaikovsky, A.V. Batrakov, G.Yu. Yushkov, R.B. Baksht // *Physics of Plasmas*. – 2014. – Vol. 21. – No. 052701.

Секция 7

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ВЕЩЕСТВОМ

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-
МОДИФИЦИРОВАННЫХ Si, B, Mo, ИХ КАРБИДОВ И ГЕРМАНИЯ
ИЗ ЛЕТУЧИХ ГАЛОГЕНИДОВ ДЛЯ НОВЫХ ПРИМЕНЕНИЙ**

**PLASMA-CHEMICAL PRODUCTION OF ISOTOPICALLY MODIFIED
Si, B, Mo, THEIR CARBIDES AND GERMANIUM FROM VOLATILE
HALIDES FOR NEW APPLICATIONS**

Корнев Р.А., Буланов А.Д.
Kornev R.A., Bulanov A.D.

ИХВВ им. Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород,
ул. Тропинина, 49
e-mail: romanakornev@gmail.com

В докладе обсуждается возможность применения широкого спектра типов газовых разрядов для выделения Si, B, Ge и Mo из их летучих галогенидов в необходимых для новых применений формах, сочетающих изотопную и химическую чистоту, поли-, монокристалличность и дисперсность. Показаны преимущества и недостатки различных типов газовых разрядов. Показано влияние типа газового разряда и условий проведения процесса водородного восстановления летучих галогенидов на целевую форму полученного целевого вещества.

The report discusses the possibility of using a wide range of types of gas discharges for separating Si, B, Ge, and Mo from their volatile halides in the forms required for new applications, combining isotopic and chemical purity, poly-, single-crystallinity, and fineness. The advantages and disadvantages of various types of gas discharges are shown. The influence of the type of gas discharge and the conditions for carrying out the process of hydrogen reduction of volatile halides on the target form of the obtained target substance is shown.

В настоящее время заметно возрос интерес к высокочистым Si, B, Mo, их карбидам и Ge с измененным изотопным составом в кристаллическом и нанодисперсном состоянии. На базе ^{28}Si планируется создание полностью кремниевого квантового компьютера [1]. Отмечается перспектива применения наночастиц ^{29}Si в качестве контрастных агентов в МРТ. Основной фундаментальной задачей с применением детекторов на основе ^{76}Ge является исследование двойного бета-распада [2] и поиск «темной материи» с применением детекторов на основе ^{73}Ge [3]. Радиоизотопы ^{99}Mo и ^{100}Mo востребованы в ядерной медицине для получения нестабильного радиоизотопа $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [4]. Используя ^{10}B в виде металлокерамики карбида бора с окисью алюминия [5] можно существенно уменьшить размеры регулирующих стержней ТВЭЛ при одновременном увеличении их поглощающей способности по отношению к нейтронам. Изотопно-чистый наноразмерный порошок ^{10}B наиболее эффективно применять в ядерной медицине [6]. Для получения вышеуказанных изотопно-модифицированных веществ наиболее целесообразно применять плазмохимические методы.

В данной работе впервые проведено сравнительное исследование различных вариантов процессов плазмохимического водородного восстановления фторидов кремния, германия, бора, молибдена, а также хлорида бора в неравновесной плазме высокочастотного индукционного (ВЧИ) и емкостного (ВЧЕ) газовых разрядов пониженного давления и квазиравновесной плазме ВЧИ, высокочастотного дугового (ВЧД), а также импульсного оптического газовых разрядов повышенного и атмосферного давления. Определены условия и установлены основные химические реакции, ответственные за процессы восстановления указанных галогенидов и зависимость их протекания от параметров процесса восстановления, таких как давление, соотношение реагентов и энергозатрат. Предложен новый подход к получению высокочистых веществ с использованием газового разряда.

Контактными и бесконтактными методами проведена диагностика неравновесной химически активной плазмы в смесях летучих галогенидов Si, Ge, В и Мо с H_2 и Ar. Идентифицированы основные промежуточные частицы. Определена T_e и N_e свободных электронов в зависимости от состава смеси и концентрации галогенида. Показано, что основным в механизме образования Si, Ge и В является взаимодействие свободных электронов с молекулой галогенида с образованием промежуточного отрицательного иона, его последующая диссоциация на радикалы и восстановление атомарным водородом.

К термическим газовым разрядам применены методы термодинамического и газодинамического анализа, с помощью которых установлен состав равновесных продуктов, исследован тепловой баланс, а также установлено наличие особых температурных интервалов, каждый из которых обладает особыми условиями для реакций восстановления летучих галогенидов.

Исследован химический, изотопный и фазовый состав полученных в процессах плазмохимического водородного восстановления элементарных Si, Ge, В и Мо, и карбидов SiC, B_4C и Mo_3C_2 , полученных в процессах их синтеза. Установлено влияние типа разряда и условий проведения плазмохимических процессов на агрегатную форму полученных продуктов.

Работа выполнена при поддержке государственного задания министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0095-2019-0008.

ЛИТЕРАТУРА

1. *T.D. Ladd* // Phys. Rev. Lett. – 2002. – Vol. 89. – No. 017901.
2. *M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti* // Eur. Phys. J. – 2015. – Vol. 75. – No. 39.
3. *L.V. Inzhechik, V.A. Korobeinikov* // Physics of Atomic Nuclei. – 1997. – Vol. 60. – No. 1823.
4. *Л.И. Меньшиков, А.Н. Семенов, Д.Ю. Чувилин* // Атомная энергия. – 2013. – № 114. – С. 226.
5. *J.M. Blum, S. Martean* // Energie nuclearize. – 1972. – Vol. 14. – No. 33.
6. *R.F. Barth, A.H. Soloway* // Scientific American. – 1990. – No. 101.

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ИЗОЛЯТ ДИКОГО ШТАММА PHYTOPHTHORA SPP. ВЫДЕЛЕННОГО С ПОВЕРХНОСТИ КУЛЬТУР КАРТОФЕЛЯ

THE EFFECT OF LOW-TEMPERATURE PLASMA ON THE ISOLATE OF WILD STRAIN PHYTOPHTHORA SPP. EXTRACTED FROM THE SURFACE OF POTATOES

Горбатов С.А., Петрухина Д.И., Тихонов А.В.,
Тихонов В.Н., Иванов И.А., Басырова Д.В.

НИЦ КИ ФГБНУ ВНИИРАЭ, Россия, 249032 г. Обнинск,
Киевское шоссе, д.1.к.1
e-mail: gorbатовsa004@gmail.com

Уникальные применения нетепловой плазмы атмосферного давления связаны с ее огромным потенциалом для низкотемпературной плазмохимии и для обработки термочувствительных материалов. Выполнены эксперименты с использованием изолята дикого штамма *Phytophthora* spp., выделенного с поверхности культур картофеля. В ходе экспериментов показано значительное влияние воздействия плазмы на экспериментальные образцы.

Unique applications of non-thermal atmospheric pressure plasma with coverage of its potential for low-temperature plasma chemistry and for processing heat-sensitive materials. Experiments were carried out using an isolate of a wild strain of *Phytophthora* spp., isolated from the surface of a potato culture. During the experiment, there was a significant effect of plasma on the observed effects.

Плазма атмосферного давления (ПАД) обладает температурой близкой к комнатной, тем не менее, она может окислять различные микроорганизмы и разрушать не только их оболочки, но и ДНК вирусов и бактерий. Это дает возможность использовать активные факторы и компоненты ПАД для осуществления воздействия (например, с целью стерилизации) на такие термочувствительные материалы как полимеры и биологические ткани, в том числе *in vivo*. [1]

Проведены эксперименты с изолятом дикого штамма *Phytophthora* spp., выделенного с поверхности культур картофеля. Поверхностное культивирование фитофторы проводили на картофельно-сахарозном агаре. Смывы с недельных культур, выдерживали при 5 °С, затем высевали на чашки Петри. Обработку плазмой проводили непосредственно после посева на расстоянии 13 см от источника. В качестве источника ПАД применяли электродный СВЧ разрядник коаксиальной конфигурации [2]. Посевы культивировали при +20±2 °С.

Анализ результатов показал, что увеличение времени воздействия плазмы приводит к уменьшению количества жизнеспособных спор. После воздействия плазмы на недельную культуру на следующие сутки наблюдали деформирование формы колоний, в центре колоний стали образовываться пустоты. Деформация

продолжалась в течении 5 суток, далее с ростом колоний деформация прекратилась и пустоты стали зарастать. К концу 10 суток форма колоний частично восстановилась. Для исследования развития мицелия фитофторы под действием плазмы, кусочки мицелия размером 1 x 1 мм высаживали в центр чашки Петри. В течение 7 дней видимых различий в росте колоний не наблюдалось. Далее изучали влияние плазмы на суховоздушный мицелий фитофторы. Для этого обрабатывали высушенные при комнатной температуре образцы. Из обработанных плазмой и контрольных образцов готовили смывы, которые высевали на картофельно-сахарозный агар. Скорость роста и морфологию колоний оценивали визуально.

Предварительный анализ результатов показал значительное влияние плазмы на выживаемость старых сухих колоний фитофторы. Для получения количественных характеристик эксперимента необходимо продолжение работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: вступительный том: книга 2 (издание В.Е. Фортова). – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000.
2. *Иванов И., Тихонов В., Тихонов А.* СВЧ-комплекс для получения низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении // Журн. физ.: конф. сер. – 2019. – Т. 1393. – № 012042.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛТРИМЕТИЛСИЛАНА В РАЗРЯДАХ РАЗНОГО ТИПА

MODIFICATION OF THE SURFACE OF POLYVINYLTRIMETHYLSILANE FILMS IN DIFFERENT TYPES OF DISCHARGES

Зиновьев А.В.¹, Пискарев М.С.¹, Скрылева Е.А.², Сенатулин Б.Р.², Гатин А.К.³,
Гильман А.Б.¹, Сырцова Д.А.⁴, Тепляков В.В.⁴, Кузнецов А.А.¹
Zinoviev A.V.¹, Piskarev M.S.¹, Skryleva E.A.², Senatulin B.R.², Gatin A.K.³,
Gilman A.B.¹, Syrtsova D.A.⁴, Teplyakov V.V.⁴, Kuznetsov A.A.¹

¹*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
РАН, Россия, 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70*

²*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский просп., 1*

³*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
РАН, Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4*

⁴*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Россия,
119991, г. Москва, Ленинский просп., 29
e-mail: zinovev.97@inbox.ru*

Исследован процесс модифицирования поливинилтриметилсилана под воздействием разряда постоянного тока при пониженном давлении на аноде и катоде, в качестве рабочего газа использован фильтрованный атмосферный воздух. Установлено, что под действием плазмы поверхность образцов приобретала свойство гидрофильности. Химический состав исходной и модифицированных пленок исследован методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии, а морфология – методом атомно-силовой микроскопии. Показано, что воздействие плазмы приводит к образованию на поверхности слоя, по химическому составу близкому к оксиду кремния и увеличению шероховатости поверхности полимера. Установлено, что для модифицированной пленки коэффициент газопроницаемости и коэффициент диффузии по паре O₂/N₂ существенно возрастали.

The process of polyvinyltrimethylsilane modification by direct current discharge at a reduced pressure at the anode and cathode was studied; filtered atmospheric air was used as the working gas. It was found that by plasma, the surface of the samples acquired the property of hydrophilicity. The chemical composition of the original and modified films was studied by X-ray photoelectron spectroscopy, and the morphology was studied by atomic force microscopy. It is shown that plasma exposure leads to the formation of a layer on the surface that is similar in chemical composition to silicon oxide and an increase in the surface roughness of polymer films. It was found that for the modified film, the gas permeability coefficient and the diffusion coefficient for the O₂/N₂ pair increased significantly.

Поливинилтриметилсилан (ПВТМС) применяется для получения асимметричных полимерных мембран, которые могут быть использованы в процессах переработки, мембранной дистилляции, газоразделения и т.п. Недостатком газоразделительных ПВТМС мембран при высокой производительности является

уровень селективности для ряда газов, в частности, по паре O_2/N_2 , недостаточный для их эффективного применения в современных процессах газоразделения. В этой связи возникает необходимость улучшения разделительных характеристик ПВТМС, в том числе, путем модификации входной поверхности мембраны. В настоящее время наиболее эффективным, технологичным и экологичным методом модифицирования полимерных мембран с целью изменения их поверхностных свойств является воздействие низкотемпературной плазмы. Воздействие разряда постоянного тока для модифицирования ПВТМС ранее не исследовали. В данной работе было впервые проведено изучение этого процесса и исследование изменений, происходящих в составе и морфологии поверхности ПВТМС.

ПВТМС – стеклообразный полимер ($T_{ст}=155^\circ$), имеющий большой внутренний свободный объем и отличающийся высокой газопроницаемостью (Рис.1).

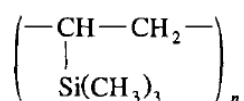


Рис.1. Структурная формула.

В работе использовали гомогенные пленки ПВТМС толщиной 60-80 мкм, Модифицирование проводили в разряде постоянного тока при пониженном давлении на установке и с использованием методики, которые подробно описаны в [1]. Образцы помещали на аноде или катоде, в качестве рабочего газа служил фильтрованный атмосферный воздух, давление в системе составляло ~ 20 Па, ток разряда 50 мА, время обработки варьировали от 10 до 60 с. Контактные свойства поверхности характеризовали величинами краевых углов смачивания (θ), измеренных с помощью прибора Easy Drop DSA100 (KRUSS, Германия) и программного обеспечения Drop Shape Analysis V.1.90.0.14 по двум рабочим жидкостям – деионизованной воде ($\theta_{в}$) и глицерину ($\theta_{гл}$). Величину работы адгезии, полной поверхностной энергии, ее полярного и дисперсионного компонентов рассчитывали по методике [2] на основании экспериментально величин θ . Исследование химического состава поверхности исходного и модифицированного образцов ПВТМС проводили методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), спектры регистрировали с помощью спектрометра PHI5500 VersaProbeII с монохроматическим излучением $AlK\alpha$ ($h\nu = 1486.6$ эВ). Атомные концентрации определяли по обзорным спектрам, а энергии связи спектров $C1s$, $Si2p$ и $O1s$ – по спектрам высокого разрешения. Морфологию поверхности изучали с помощью атомно-силового микроскопа “Solver HV” (НТ-МДТ, Россия) в атмосфере воздуха при нормальных условиях. Величины средней (R_a) и среднеквадратичной шероховатости (R_{ms}) определяли с использованием программного обеспечения NOVA версии 1.1.0.1851.

Исходная пленка ПВТМС имеет гидрофобную поверхность и характеризуется значениями $\theta_{в}=100^\circ$ и $\theta_{гл}=84^\circ$. Обработка в плазме приводит к быстрой гидрофилизации поверхности, величина $\theta_{в}$ уже через 30 с достигает 8° , наблюдается увеличение полной поверхностной энергии пленок в 4–5 раз и многократный (в

45–50 раз) рост ее полярного компонента. Пленка хорошо сохраняет гидрофильность в течение до 40 сут.

Методом РФЭС показано, что в результате модифицирования на поверхности пленок наблюдается появление высоких атомных концентраций кислорода, равных (при обработке на катоде) или превышающих (при обработке на аноде) концентрацию углерода, при этом отношение концентраций углерода и кремния снижается в 2 раза при обработке на катоде и более чем в 3 раза при обработке на аноде. Воздействие плазмы приводит к увеличению общей концентрации кислорода и росту отношения O/Si. Происходит практически полное превращение связей Si–C в связи Si–O и существенное уменьшение содержания атомов углерода. По-видимому, атомы углерода триметилсилильного фрагмента, были удалены за счет деструкции в плазме в составе летучих продуктов, тогда как атомы углерода основной цепи, в основном, остались в модифицированном слое; часть из них прореагировала с образованием кислородсодержащих функциональных групп. Вероятно, в результате воздействия плазмы поверхностный слой ПВТМС представляет собой композиционный материал, содержащий дисперсные частицы SiO₂, распределенные в модифицированной полимерной фазе, в составе которой представлено значительное количество кислородсодержащих групп CH₂–OH, C=O и C(O)OH.

Методом АСМ было показано, что воздействие плазмы приводит к заметному увеличению шероховатости поверхности полимера, значения R_a возрастают от 0.18 нм до 0.8 нм (обработка на аноде) и 2.1 нм (обработка на катоде), а R_{ms} увеличиваются от 0.23 нм до 1.44 (обработка на аноде) и 2.7 нм (обработка на катоде).

Определение газопроницаемости и селективности по паре O₂/N₂ проводили дифференциальным методом с газохроматографическим окончанием при перепаде парциального давления исследуемого газа на мембране ~ 1 атм., температуре 22–23 °С с газами-носителями Ar и He [3]. Было установлено, что коэффициент проницаемости возрастал от 3.8 до 10, а коэффициент диффузии увеличился от 3 до 5.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, номер темы FFSM-2021-0006 и РФФИ (грант № 20-08-00655). Измерения контактных свойств пленок проводили в Центре коллективного пользования "Центр исследований полимеров" ИСПМ РАН, а исследования методом РФЭС - на оборудовании центра коллективного пользования "Материаловедение и металлургия" НИТУ МИСиС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *T. Demina, D. Zaytseva-Zotova, M. Yablokov, A. Gilman., T. Akopova, E. Markvicheva, A. Zelenetskii // Surf. Coat. Techn. – 2012. – Vol. 207. – No. 508.*
2. *S. Wu Polymer Interfaces and Adhesion. – N.Y.: Marcel Dekker, 1982.*
3. *D.A. Syrtsova // Мембраны и мембр. технол. – 2023. – Т. 5. – № 117.*

NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF A PLASMA JET ON A METAL POWDER IN VARIOUS GASEOUS ENVIRONMENT

Kadyrov A.A., Frolov V.Ya., Yushin B.A.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Russian Federation,
Politekhnikeskaya st., 29, St. Petersburg, 195251
e-mail: ars.spb@bk.ru*

This article discusses the interaction of metal particles obtained by the PREP method in various gaseous environment, such as argon, helium and their mixtures. The main interest in this study is the trajectory, flight range, crystallization and cooling rate of the obtained particles. The data obtained in the course of this study are necessary for the development and construction of a full-fledged plasma equipment.

Analysis of the conditions for the formation of spherical metal powders under exposure to plasma jets, based on the accepted concept of physical and the thermal model of the arc is needed to calculate the distribution of velocity vectors flow and temperature during process simulation. In order to correctly obtain the established non-stationary mathematical models, it is also necessary to know the geometric characteristics of the plasma installation, the flow rate of the plasma-forming gas, the electromagnetic parameters of the arc, the properties and composition of the melted metal, and a number of other factors [1].

First of all, the problem was solved, according to the choice of plasma-forming and technical gas, to fill the working chamber of the plasma installation. The properties of gases were calculated, which will be necessary for further mathematical modeling of the physical processes of the plasma arc and its interaction with metal particles. The main parameters that needed to be found are: thermal conductivity, viscosity, heat capacity, density. The results of the plasma heat capacity distribution for various gases are shown in Figure 1.

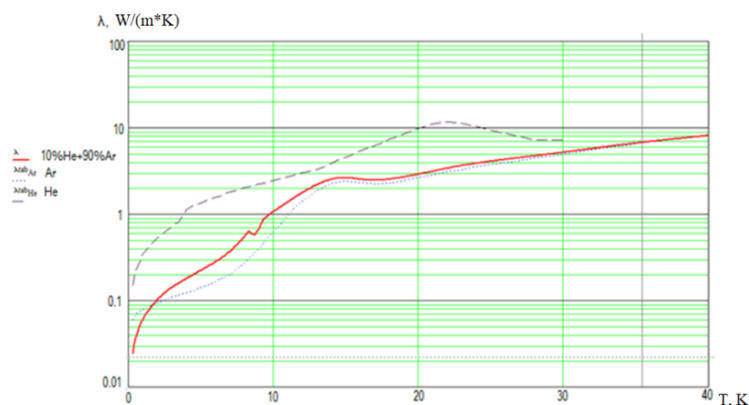


Figure 1. Graph of the distribution of the thermal conductivity of the plasma Ar + (He-10%), Ar, He

Thus, having studied the main operating characteristics of the plasma-forming medium, one can consider the ultimate goal of the study, namely the interaction of a plasma jet on a metal particle [2]. When modeling the process of plasma arc burning and metal melting, it can be seen that at the stage of separation of a particle from a rotating workpiece, it does not interact with the gaseous medium in the process chamber. This eliminates the gas components in the composition of the resulting liquid drop. However, already the stage of cooling and crystallization takes place in the technological chamber in an environment of inert gases of argon and helium; This composition of the gas mixture makes it possible to accelerate the solidification of the metal drop and exclude oxidation of its surface [3].

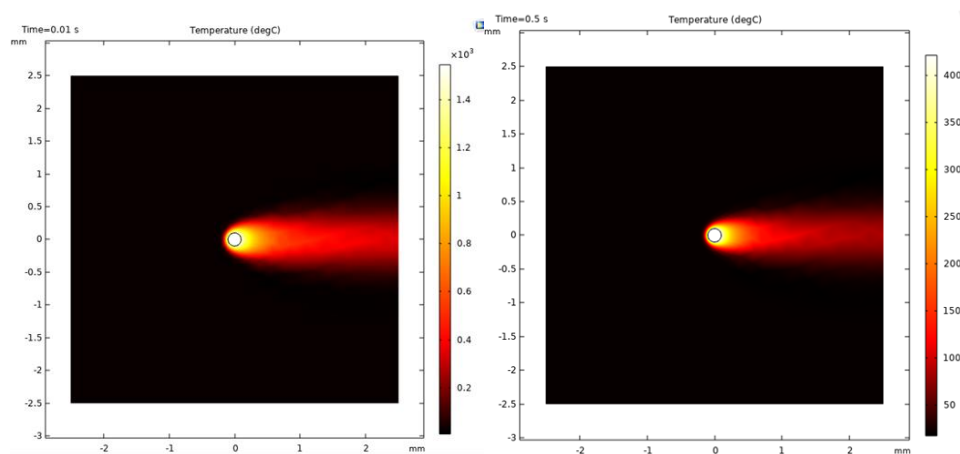


Figure 2. Pattern of particle cooling depending on time in argon
a) for $t=0.01\text{s}$ b) $t=0.5\text{s}$

Based on the results of mathematical modeling of particle cooling, it can be clearly concluded that the gaseous medium with a predominance of helium is the best option for filling the process chamber, which serves to cool and collect the resulting metal powder, because in it, cooling takes place 4 times faster than in pure argon. Knowing the values of the speed of the particle and the time of its cooling, it is possible to calculate the diameter of the process chamber. If we take a cooling time of 0.3 sec and a movement speed of 5 m/s, then the chamber diameter will be approximately equal to 1.5 meters.

REFERENCES

1. Magnetically enhanced vacuum arc thruster – iopscience (n.d.). – 2022.
2. Zhuang T., Shashurin A., Keidar M., Beilis I.I. Circular periodic motion of plasma produced by a small-scale vacuum arc // Plasma Sources Sci. Technol. – 2011. – Vol. 20. – No. 01500.
3. Obratsov N.V. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 643. – No. 012076.

АНАЛИЗ МОДИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ МЕЛАМИН ФОРМАЛЬДЕГИДА В ПЫЛЕВОЙ ЛОВУШКЕ

ANALYSIS OF MODIFICATION OF MELAMIN FORMALDEHYDE PARTICLES IN A DUSTY TRAP

Карасев В.Ю.¹, Дзलिएва Е.С.¹, Полищук В.А.², Томаев В.В.^{3,4},
Ермоленко М.А.¹, Новиков Л.А.¹, Павлов С.И.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., д.7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

² Государственный университет морского и речного флота имени
адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, 198035, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-
Петербург, Московский проспект, д. 24-26/49, литера А, 190013, Россия

⁴ Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский остров,
21 линия д.2, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

e-mail: plasmadust@yandex.ru

Анализируются результаты всесторонней деградации размера и модификации структуры поверхности исходных калиброванных частиц меламин-формальдегида в пылевой плазме. Экспериментальные результаты сопоставляются с механизмом разогрева и выбивания материала частиц ионами низких энергий в пылевой плазме.

The results of comprehensive degradation of the size and modification of the surface structure of initial calibrated melamine-formaldehyde particles in dusty plasma are analyzed. The experimental results are compared with the mechanism of heating and knocking out of the particle material by low-energy ions in a dusty plasma.

Изучение поверхностных слоев различных материалов и их модификации в связи с развитием нанотехнологий является актуальной темой исследований, в том числе, в пылевой плазме [1-3]. В [3-5] были опубликованы первые данные о воздействии пылевой плазмы на полимерные частицы. В настоящей работе мы продолжаем исследование частиц меламин-формальдегида, которые под воздействием плазмы уменьшаются в размерах и подвергаются всесторонней модификации поверхности [5-6].

Используемые «мягкие» пылевые частицы после улавливания из пылевой ловушки и изучения в электронном микроскопе обнаруживают деградацию размера и модификацию структуры поверхности. Оба эффекта зависят от времени и коррелируют между собой. Установлено, что скорость эффектов зависит от размера частиц и сорта плазмформирующего газа. Так в [5-6] зарегистрирована рекордно быстрая потеря материала частиц, за 40 минут нахождения в пылевой ловушке в тлеющем разряде теряется до 80% объема.

Немонотонное изменение потери массы частиц во времени показывает, что имеются три фазы процесса. Анализ вариации размера частиц и сорта газа, а также численные оценки указывают на роль тепловых процессов в первой фазе деградации. В [7] предложена гипотеза, объясняющая неравномерность изменение размеров частиц во времени.

Эффект всесторонней модификации левитирующих в пылевой ловушке частиц проявляется в существенном развитии рельефа. Распределение неоднородностей поверхности первоначально случайное (распределение Гаусса) в плазме со временем изменяется, стремясь к постоянному распределению. Существенно развивается шероховатость поверхности частиц.

Изменение рельефа пылевых частиц демонстрирует ряд особенностей, представляющих интерес для взаимодействия поверхности частиц с потоками на них плазмы в плазменно-пылевой структуре. Например, при развитии шероховатости и уменьшении размера частиц, уменьшается величина фрактальной размерности поверхности. Последняя зависит от размера частиц и изменяется со временем нахождения их в плазме.

В представленном сообщении содержится анализ экспериментов по модификации частиц меламин-формальдегида в пылевой плазме, а также представляются новые данные о взаимодействии пылевых частиц с плазмой тяжелых инертных газов.

Работа поддержана РФФИ, грант № 22-12-00002.

ЛИТЕРАТУРА

1. *A. Bouchoule* Dusty Plasmas: Physics, Chemistry, and Technological Impact in Plasma Processing. – Orlean: Wiley, 1999.
2. *М.С. Пускарев, А.Б. Гильман, А.Н. Щеголихин, Н.А. Шмакова, М.Ю. Яблоков* // Химия высоких энергий. – 2013. – Т. 47. – № 381.
3. *W.W. Stoffels, E. Stoffels, G.H.P.M. Swinkels, M. Boufnichel, G.M.W. Kroesen* // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 59. – No. 2302.
4. *В.Ю. Карасев, В.А. Полищук, А.П. Горбенко, Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко* // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – № 1007.
5. *V. Karasev, E. Dзлиева, S. Pavlov, O. Matvievskaya, V. Polischuk* // CPP. – 2019. – Vol. 59. – No. 201800145.
6. *Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, В.Ю. Карасев* // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – № 92.
7. *V. Karasev, V. Polischuk, E. Dзлиева, S. Pavlov* // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1556. – No. 012080.

СРАВНЕНИЕ АНОДНОГО И КАТОДНОГО РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНОГО РАСТВОРА ЖИДКОГО СТЕКЛА

COMPARISON OF ANODE AND CATHODE MODES OF PLASMA-ELECTROLYTE TREATMENT OF AQUEOUS SOLUTION OF LIQUID GLASS

Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}
Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}

¹ Казанский федеральный университет, Россия, 420008, ул. Кремлевская, д. 18,
Казань

² Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: kashlenar@gmail.com

Работа посвящена исследованию процесса плазменно-электролитной обработки раствора жидкого стекла. Установлено отличие анодного режима от катодного в формировании частиц размером меньше одного микрона.

The work is devoted to the study of the process of plasma-electrolyte treatment of a liquid glass solution. The difference between the anode regime and the cathode regime in the formation of particles with a size of less than one micron has been established.

Газовые разряды с жидкими электродами нашли широкое применение в различных технологических процессах, таких как улучшение физико-механических свойств изделий путем модификации поверхностных слоев или же методом нанесения функциональных покрытий. Помимо этого, с помощью газоразрядных систем на основе жидких электродов можно получать наноматериалы различных металлов и их оксидов [1]. Их преимущество перед другими способами заключается в относительной простоте и дешевизне. В аналитических методах исследования жидкостей, таких как высокоэффективная жидкостная хроматография используется специальный сорбент – носитель неподвижной фазы, который представляет собой микродисперсный сферический порошок оксида кремния, с средним размером частиц 5 мкм. Его роль является ключевой в процессе анализа, так как именно на нем происходит разделение во времени компонент исследуемой смеси. В данной работе преследуется цель исследовать процесс плазменно-электролитной обработки раствора натриевого жидкого стекла для определения возможности получения сорбента оксида кремния.

Для достижения поставленной цели необходимо определить результаты влияния низкотемпературной плазмы на раствор жидкого стекла при использовании отрицательной и положительной полярности жидкого электрода. Для этого использовалась экспериментальная установка, в которой металлический электрод, выполненный в виде стержня, находился над раствором жидкого стекла. К электродам подключался источник питания с возможностью регулирования сглаженного напряжения от 0 до 300 В. Для случая, когда металлический электрод является катодом, а жидкость анодом при достижении напряжения 40 – 50 В в месте контакта с поверхностью жидкого стекла наблюдается свечение, приводящее к образованию белого пористого покрытия, постепенно прорастающего в раствор жидкости. Что в свою очередь приводит к затуханию разряда. Дальнейшее повышение прикладываемого напряжения приводит к зажиганию разряда между пористым белым покрытием и раствором жидкого стекла. Наблюдается определенный рост в глубину раствора и затухание разряда. Повышая напряжение можно повторно инициировать процесс. При достижении значения прикладываемого напряжения до 214 В наблюдается постоянное горение разряда в разных местах белого пористого нароста, вплоть до достижения им поверхности стекла электролитической камеры и ее разрушения под действием термического воздействия. При анодной поляризации жидкого стекла образуется развитая сетчатая пористая структура, с толщиной стенки около 1 мкм. Сама структура состоит из крупных пор размером 50 – 100 мкм, также имеются поры от 2 до 20 мкм в стенках сетчатого каркаса. Наблюдаем образование сферических частиц порошка размером от 2 до 8 мкм. Был проведен элементный энергодисперсионный анализ, который показал, что полученный нарост состоит из: С - 5.43%, О - 65.11%, Na - 13.50%, Si - 15.95%. Содержание натрия является недопустимым для сорбентов неподвижной фазы колонки высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Для анодной поляризации металлического электрода отличительной чертой является образование частиц размером меньше 1 мкм.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *G. Saito, S. Hosokai, T. Akiyama // Mater. Chem. Phys. – 2011. – Vol. 130. – No. 79.*

РАСПЫЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ

SPUTTERING OF FUSED QUARTZ SURFACE BY CLUSTER ION BEAM

Коробейщиков Н.Г.¹, Николаев И.В.¹, Стищенко П.В.²

Korobeishchikov N.G.¹, Nikolaev I.V.¹, Stishenko P.V.²

¹*Новосибирский государственный университет,
Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

²*Омский государственный технический университет,
Россия, г. Омск, пр. Мира, 11
e-mail: korobei@ci.nsu.ru*

Экспериментально и с помощью МД-моделирования исследовано распыление поверхности плавленого кварца (SiO_2) ионно-кластерным пучком аргона. Изучена динамика столкновения кластеров с твердой поверхностью и особенности распыления, включая селективность распыления. Показано, что бомбардировка кластерными ионами позволяет сглаживать поверхностные неровности с латеральными размерами до 5 мкм. Установлено, что коэффициенты распыления Y обобщаются в виде нелинейных зависимостей Y/N от E/N как при наклонном, так и при нормальном падении кластеров.

Sputtering of the surface of fused quartz (SiO_2) by an ion-cluster beam of argon was studied experimentally and using MD simulation. The dynamics of collision of clusters with a solid surface and sputtering features, including sputtering selectivity, are studied. It was shown that bombardment with cluster ions makes it possible to smooth surface irregularities with lateral sizes up to 5 μm . It has been established that the sputtering yields Y are generalized in the form of nonlinear dependencies of Y/N on E/N both for oblique and normal incidence of clusters.

Ионно-кластерные пучки, сформированные из сверхзвуковых газовых струй (gas cluster ion beam, GCIB), используются для прецизионной обработки и аналитической диагностики поверхностей различных материалов. Основное преимущество таких пучков – возможность формировать интенсивный поток вещества с кинетической энергией, приходящейся на один атом в кластере, на уровне единиц эВ, что невозможно для классического ионного пучка и обеспечивает локальность воздействия на обрабатываемый материал [1, 2].

Проведено исследование взаимодействия кластеров аргона с поверхностью плавленого кварца (SiO_2). Исследования проводились при нормальном и наклонном (углы падения 45° и 60° от нормали) падении кластеров на мишень и при варьировании в широких пределах удельной энергии кластеров E/N от 10 до 140 эВ на атом в кластере, где E – кинетическая энергия кластеров, N – средний размер кластеров. Эксперименты проводились с несепарированным по размерам кластеров ионно-кластерным пучком, что обеспечивает высокую эффективность обработки. Для диагностики изменения топографии поверхности в результате

кластерной бомбардировки использовался атомно-силовой микроскоп NT-MDT Ntegra Prima HD. Динамика столкновения кластеров с твердой поверхностью изучалась с использованием молекулярно-динамического моделирования.

С использованием функции спектральной плотности шероховатости (PSD) показано, что кластерная бомбардировка позволяет дополнительно сглаживать исходно полированные поверхности до субнанометрового уровня шероховатости (среднеквадратичная шероховатость $R_q \approx 0,5$ нм) в широком диапазоне пространственных частот от 0,2 до 100 мкм⁻¹ [3].

Определены коэффициенты распыления Y поверхности плавленого кварца кластерными ионами аргона при различных условиях. Установлено, что для плавленого кварца удельный коэффициент распыления Y/N , характеризующий число атомов мишени, выбиваемых в среднем одним атомом кластера, нелинейно зависит от удельной энергии E/N . В частности, при $E/N \approx 10$ эВ/атом $Y/N \approx 0,01$, а при $E/N \approx 100$ эВ/атом коэффициент распыления резко возрастает до $Y/N \approx 1$. Подобные зависимости наблюдаются как при нормальном, так и при наклонном падении кластеров на мишень [4]. При всех режимах бомбардировки наблюдается преимущественное распыление атомов кислорода, что приводит к изменению стехиометрического состава поверхности [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №21-19-00046).

ЛИТЕРАТУРА

1. *I. Yamada Processing by Cluster Ion Beams: History, technology, and application.* – N.Y.: CRC Press, 2016.
2. *А.Е. Иешкин, А.Б. Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш // Успехи физических наук.* – 2022. – Т. 192. – № 722.
3. *N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, M.A. Roenko // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* – 2019. – Vol. 438. – No. 1.
4. *N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, M.A. Roenko, V.V. Atuchin // Appl. Phys. A.* – 2018. – Vol. 124. – No. 833.
5. *N.G. Korobeishchikov, P.V. Stishenko, Y.A. Popenko, M.A. Roenko, I.V. Nikolaev // AIP Conf. Proc.* – 2017. – Vol. 1876. – No. 020064.

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНЫХ ВЧ РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ИЗДЕЛИЙ

Абдуллин И.Ш.¹, Некрасов И.К.^{1,2}, Сагитова Ф.Р.³
Abdullin I.Sh.¹, Nekrasov I.K.^{1,2}, Sagitova F.R.³

¹ООО «Плазма-ВСТ», Россия, 420081

²ФГАОУ ВО КФУ, Россия, 423604

³ФГАОУ ВО КНИТУ, Россия, 420015

e-mail: igor05071997mail.ru

В работе представлено исследование распределений температуры в зависимости от давления (до 133 Па). Продемонстрировано, что наименьший градиент температуры достигается при давлении в 66,5 Па.

The paper presents a study of temperature distributions as a function of pressure (up to 133 Pa). It is demonstrated that the lowest temperature gradient is achieved at a pressure of 66.5 Pa.

Одним из зарекомендовавших себя плазменных способов модификации материалов является метод обработки в ВЧ разрядах пониженного давления [1]. Широкое распространение данный метод получил при обработке полимеров, кожи и меха, волокнистых материалов, металлических изделий. Главным механизмом обработки в ВЧ разрядах пониженного давления является низкоэнергетическая ионная бомбардировка поверхности обрабатываемого материала. Ионы, бомбардирующие поверхность, достигают энергий W_i до 100 эВ, что позволяет разрывать межатомные связи и инжектировать эти же ионы вглубь материала обрабатываемого изделия [1].

При обработке в ВЧ разрядах пониженного давления комбинируются следующие механизмы модификации: ионная имплантация при энергиях до 100 эВ, термическое воздействие, плазмохимические процессы.

Анализ литературы показывает, что исследования радиального и аксиального распределения температуры, скорости потока в ВЧИ разряде в основном проводились при атмосферном [2] и низком давлении ($p < 1$ Па) [3].

Струя ВЧИ разряда представлена на рис.1. Параметры экспериментов выбирались следующие: давление $p = 60-1200$ Па, мощность разряда $P = 2-2,5$ кВт, диаметр разрядной камеры – 30 мм, время обработки – 1-30 минут, плазмообразующие газы – аргон, воздух.

В экспериментах по измерению температуры использовали хромель-копелевую термопару, погрешность измерений которой составляла 5%. ВЧ наводки влияли на показания термопары, поэтому в момент измерения температуры ВЧ-генератор отключался.

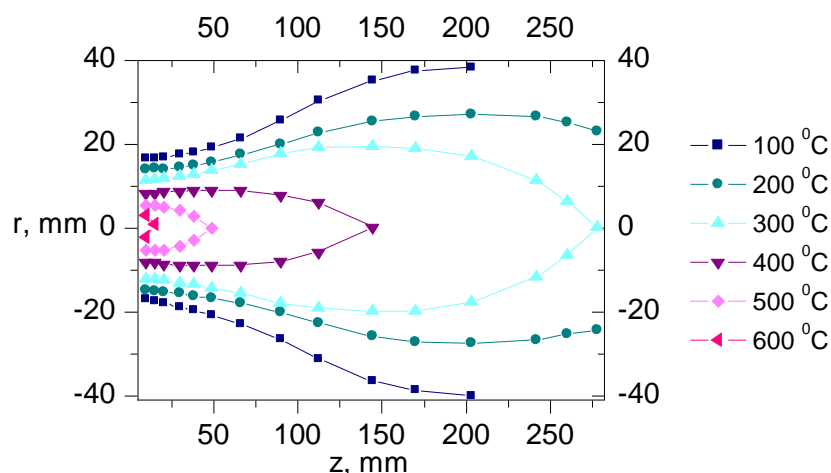


Рис 1. Поле температур ВЧИ плазменной струи пониженного давления при мощности разряда 2 кВт и потоке газа 0.1 г/с при давлении 66,5 Па

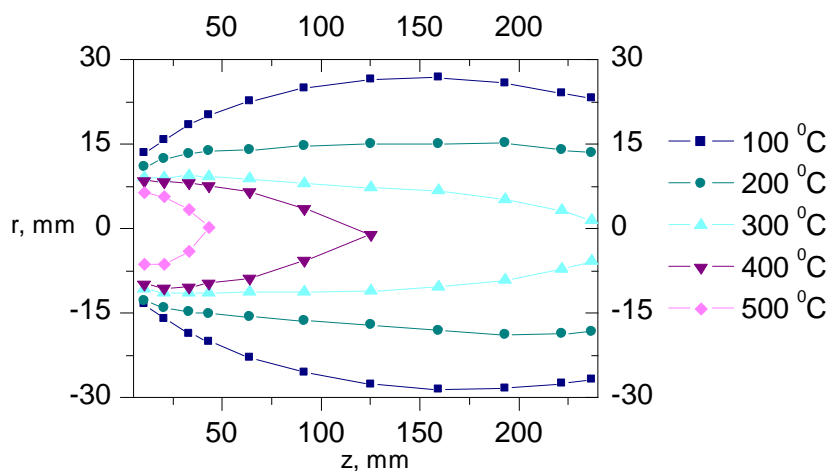


Рис 2. Поле температур ВЧИ плазменной струи пониженного давления при мощности разряда 2 кВт и потоке газа 0.1 г/с при давлении 133,3 Па

Как видно из рис.2-5, изменения давления существенно влияет на профиль распределения температуры. С уменьшением давления изотермы, соответствующие высоким температурам (400-500°) вытягиваются, а изотермы, соответствующие низким температурам (100-200°), при больших Z расширяются. Наименьший градиент наблюдается при давлении в 66,5 Па.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашанов Н.Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Издательство Казанского университета, 2000.
2. *Punjabi S.B., Sahasrabudhe S.N., Joshi N.K., Mangalvedekar H.A., Das A.K., Kothari D.C.* // Physics of Plasmas – 2014. – Vol. 21. – No. 013506.
3. *Kralkina E.A., Rukhadze A.A., Pavlov V.B., Vavilin K.V., Nekliudova P.A., Petrov A.K., Alexandrov A.F.* // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Vol. 25. – No. 015016.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ AL/MGF₂ ЗЕРКАЛ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВУФ ИЗЛУЧЕНИЯ

EXPERIMENTAL MODELING OF CHANGES IN AL/MGF₂ MIRROR PROPERTIES UNDER THE INFLUENCE OF VUV RADIATION

Пасынкова Д.С.¹, Новиков П.А.², Чесноков Д.А.², Жупанов В.Г.², Телех В.Д.¹,
Скрябин А.С.¹
Pasyunkova D.S.¹, Novikov P.A.², Chesnokov D.A.², Zhupanov V.G.², Telekh V.D.¹,
Skriabin A.S.¹

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, Москва, 105005, ул. 2-я Бауманская 5*

²*Акционерное общество "Научно-исследовательский институт Научно-произ-
водственное объединение "ЛУЧ", Российская Федерация, Подольск, 142103,
ул. Железнодорожная 24
e-mail: DaryaPasyunkova1503@yandex.ru*

В данной работе производится моделирование условий работы Al/MgF₂ зеркал путём облучения их источником вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения типа магнитоплазменный компрессор в среде различных газов. После облучения исследуется изменение отражательной способности, шероховатости и профиля поверхности образцов. Изменяя газ, в котором проводится облучение, происходит изменение спектрального состава излучения, приходящего на образец.

In this work modeling of operating conditions of Al/MgF₂ mirrors is performed by irradiating them with a source of vacuum ultraviolet (VUV) radiation (magneto-plasma compressor) in various gases. After irradiation the changes in the reflectivity, roughness and surface profile of the samples are investigated. By changing the gas in which the irradiation is performed, the spectrum of the radiation coming to the sample is changed.

«Хаббл» и «Спектр-УФ» – популярные космические проекты, использующие в своих телескопах Al/MgF₂ зеркала. Преимущество данных зеркал заключается в возможности детектировать наиболее яркую линию солнечного спектра – 121 нм. В космическом пространстве на зеркала воздействуют высокоэнергетичные фотоны, поэтому необходимо изучать взаимодействие фотонов с поверхностью данных зеркал.

В данной работе проводится облучение Al/MgF₂ зеркал на установке «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, описанной в работе [1]. Источником излучения является магнитоплазменный компрессор эрозионного типа [2-4]. Облучение производилось в среде различных газов (воздух, аргон, неон), тем самым, проводилось изменение спектрального состава излучения, приходящего на образец, а именно сдвигалась коротковолновая часть спектра. Образцами для изучения яв-

лялись Al/MgF₂ зеркала, габариты покрытия которых составляли 15 × 40 мм. Половина образца закрывалась экраном для последующей диагностики изменения свойств покрытия.

Результаты изменения отражательной способности покрытий представлены на рисунке 1. Рисунок 1а показывает незначительное изменение отражательной способности образца, облучённого на воздухе. Рисунок 1б – постепенное более значительное уменьшение отражательной способности с сохранением формы кривой образца, облучённого в аргоне. Рисунок 1в – полная потеря отражательной способности образца, облучённого в неоне.

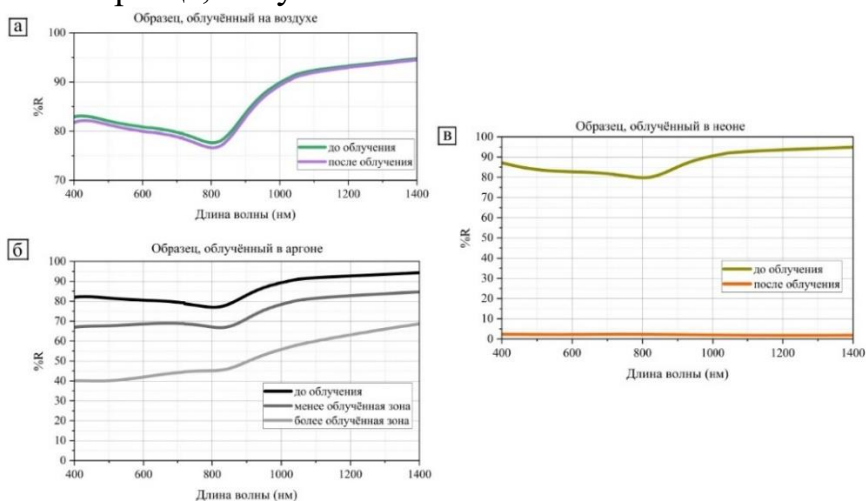


Рис. 1. Изменение отражательной способности образцов после облучения

Шероховатость и профиль поверхности изменялись аналогично отражательной способности. Причина именно такого изменения свойств заключена в использовании различного газа при облучении. Так при разряде в воздухе на образец приходит энергия фотонов менее 6 эВ, таким образом, высокоэнергетичные фотоны не доходят до образца, слой Al отражает практически 100 % данного излучения, а MgF₂ прозрачен для него. При разряде в аргоне (энергия фотонов до 15 эВ) часть излучения начинает поглощаться покрытием с наблюдением полного испарения защитного слоя MgF₂ в зоне, ближней к источнику излучения. При разряде в неоне на образец попадают фотоны с энергией до 21 эВ. Наблюдается полное испарение покрытия – отсутствие отражательной способности – глубокие трещины на поверхности подложки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации “Росатом” в рамках научного проекта № 20-21-00087 и проведено на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Pavlov, A.S. Skriabin, V.D. Telekh // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – No. 3940.
2. N.P. Kozlov, Yu.S. Protasov // *Phys. Lett. A*. – 1978. – Vol. 67. – P. 191–193.
3. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov // *Symmetry*. – 2021. – Vol. 13. – No. 927.
4. Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов, В.Д. Телех, Т.С. Щепанюк *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. – М.: Янус-К, 2014.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОГО БОРИДА

INFLUENCE OF DEPOSITION PARAMETERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM-MAGNESIUM BORIDE COATINGS

Ажажа И.И.¹, Ахмадеев Ю.Х.¹, Иванов Ю.Ф.¹, Шугуров В.В.¹
Azhazha I.I.¹, Ahmadeev Yu.H.¹, Ivanov Yu.F.¹, Shugurov V.V.¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томская обл., г. Томск, пр-кт Академический, 2/3
e-mail: vanya.azhazha@gmail.com

Проведена серия экспериментов по плазменно – ассистированному ВЧ – нанесению покрытий состава (Al + Mg + B) + (Ti + 2B) на подготовленные образцы твердого сплава ВК-8 и стали Р6М5. ВЧ-нанесения покрытий производили в различных режимах, представленных ниже.

A series of experiments on plasma-assisted HF coating deposition of (Al + Mg + B) + (Ti + 2B) composition on the prepared samples of hard alloy VK-8 and steel R6M5 were carried out. HF coating deposition was carried out in different modes presented below.

Таблица 1.

№	1	2	3
I _п , А	20	40	60
P _{Ар} , Па	0.6	0.6	0.6
U _{см} , В/О, %	50/75	35/85	35/85
P _{ВЧ} , Вт	300	400	700
t, мин	120	120	120

Распыляемая порошковая мишень состава (Al + Mg + B) + (Ti + 2B) (5) находящаяся в вакуумной камере (7) крепится на ВЧ – токовводе, который подключен к согласующему устройству (4), через которое происходит подача ВЧ-мощности на мишень. Образец (3) крепится к оснастке (6), на которую подается обратное смещение для обеспечения ускорения ионов Ar⁺ для разогрева, очистки и активации поверхности образца. Генератор объемной вспомогательной плазмы представлен плазменным источником с накаливаемым и полым катодом «ПИНК» для обеспечения плазменного ассистирования процесса нанесения покрытий. Измерения температуры происходит за счет подведенной в торец оснастки (6) термопары (2).

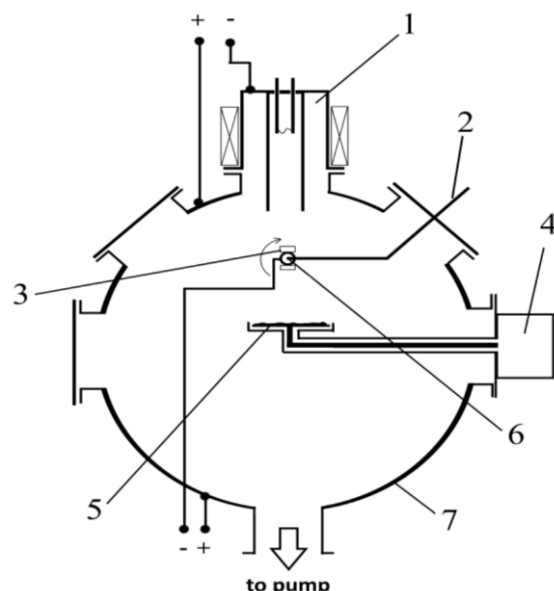


Рис. 1. Схема разрядной системы для ионно-плазменного ВЧ нанесения покрытий

После процесса нанесения покрытия были произведены исследования по толщине, твердости и скорости износа, которые показывают изменения триботехнических и механических параметров в зависимости от режима нанесения.

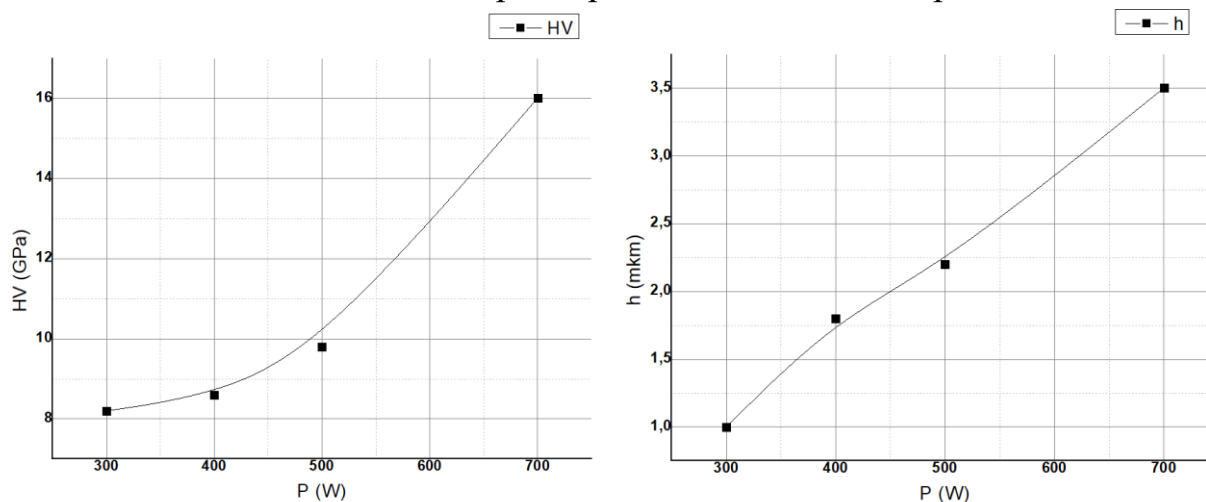


Рис. 2. Зависимости микротвердости и толщины получаемых покрытий от ВЧ – мощности

Данные зависимости имеют растущий характер, что показывает на улучшение механических параметров системы. Скорость объемного износа с увеличением подаваемой мощности снижается, что свидетельствует об улучшении триботехнических характеристик системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ

MODIFICATION OF CARBON FIBERS BY LOW-ENERGY ION FLUX

Шакиров Р. И., Шарифуллин Ф. С., Сагитова Ф. Р., Желтухин В.С.

Shakirov R. I., Sharifullin F. S., Sagitova F. R., Zheltukhin V.S.

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015, г.Казань, ул. К.Маркса, д.68
shakirovrail1999@mail.ru

Рассмотрена модификация углеродных волокон плазмой высокочастотного емкостного разряда пониженного давления. Установлена возможность применения модифицированных углеродных волокон при создании композиционных материалов.

Modification of carbon fibers by low-pressure radio-frequency capacitive discharge plasma is considered. The possibility of using modified carbon fibers in the creation of composite materials has been established.

В настоящее время на смену традиционным конструкционным материалам (металлам) приходят композиты на основе углеродных волокон (УВ), которые обладают высокими показателями огнестойкости, предела прочности и модуля упругости. Однако необходимо учитывать, что эксплуатационные и прочностные характеристики композитов зависят не только от свойств наполнителя и связующего, но и определяются их адгезией, взаимодействием на границе раздела фаз «волокно-матрица». Повышение межфазной адгезии, достижение наиболее полной пропитки волокна матрицей с увеличением количественного содержания наполнителя в композите может достигаться за счет модификации волокнистых материалов [1].

В качестве основных методов модификации УВ применяют методы обработки кислотами, электрохимического окисления, радиационного облучения, нанесения наночастиц. Данные методы экологически небезопасны, требуют специальных условий хранения и утилизации химических реагентов.

Эффективным методом модификации материалов различной физической природы является обработка в плазме высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда при пониженном давлении. К числу преимуществ данного метода относят возможность регулирования поверхностных свойств без ухудшения физико-механических показателей объекта.

В качестве объекта исследования выбрано волокно марки УМТ42-24К-ЕР на основе полиакрилонитрильного прекурсора со стандартной прочностью и повышенным модулем упругости при растяжении, применяемое в различных промышленных сферах, производства ООО «Алабуга-Волокно».

Для осуществления процесса модификации УВ плазмой ВЧЕ разряда при пониженном давлении использовалась опытная установка, описание которой приведено в [2]. Режимы плазменной обработки изменялись в следующих диапазонах:

мощность разряда W от 1,0 до 2,0 кВт, время обработки t от 10 до 40 минут, давление в разрядной камере $P=26$ Па, расход плазмообразующего газа (воздуха) $G=0,04$ г/с.

Для определения эффекта воздействия плазменной обработки на УВ исследовались такие показатели, как капиллярность, динамический краевой угол смачивания и разрывная нагрузка.

Результаты экспериментов по определению высоты поднятия эпоксидной смолы у контрольных и модифицированных образцов показали, что плазменная обработка приводит к увеличению данного показателя при любом выбранном режиме (рис.1).

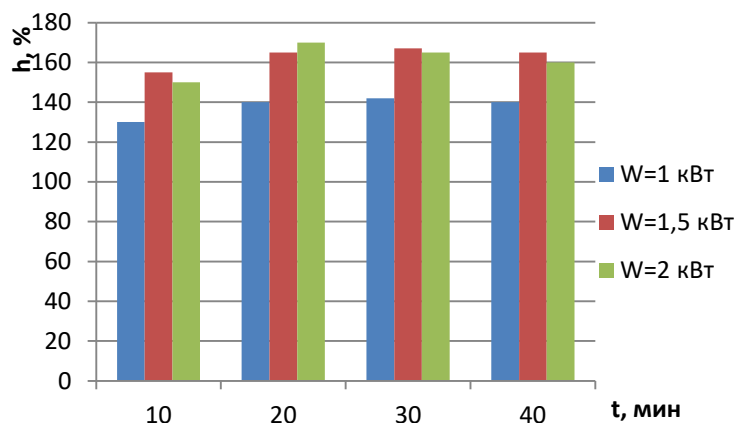


Рис. 1. Относительное изменение высоты поднятия эпоксидной смолы УВ в зависимости от мощности разряда и времени обработки ($P=26$ Па, $G=0,04$ г/с)

Результаты измерения динамического краевого угла смачивания показали, что ВЧЕ плазменная обработка позволяет уменьшить данный показатель на 40%, что можно объяснить увеличением кислородсодержащих функциональных групп на поверхности волокон, привитых плазменной обработкой.

Исследования по определению разрывной нагрузки УВ после ВЧЕ плазменной модификации показали, что разрывная нагрузка волокон не уменьшается, т.е. материал не подвергается деструктивному воздействию при модификации.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что ВЧЕ плазменная обработка является эффективным способом модификации УВ, что позволяет рассматривать возможность использования данного вида волокон при создании композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзуличанская Н.Н., Слынько Л.Е., Пясецкий В.Б. Композиционные материалы. Физико-химические свойства: учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. – 48 с.
2. Абдуллин И.Ш., Абуталлипова Л.Н., Желтухин В.С., Красина И.В. Высокочастотная плазменная обработка в динамическом вакууме капиллярно-пористых материалов. Теория и практика применения. – Казань: КГТУ, 2004. – 428 с.

ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ

PLASMA-ELECTROLYTE FORMATION OF THE MICRO-RELIEF OF TITANIUM IMPLANTS

Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}
Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}

¹ *Казанский федеральный университет, Россия, 420008, ул. Кремлевская, д. 18,
Казань*

² *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7*

³ *Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: kashlenar@mail.ru*

Работа посвящена исследованию процесса плазменно-электролитного формирования микро-рельефа титановых имплантатов. Увеличение времени обработки приводит к увеличению шероховатости поверхности, это объясняется большей степенью нагрева самого образца, что позволяет локально более интенсивно оплавливать образец. Шероховатость титановых имплантатов формировалась для Ra от 1,136 до 2,064 мкм.

The work is devoted to the study of the process of plasma-electrolyte formation of the microrelief of titanium implants. An increase in processing time leads to an increase in surface roughness, this is due to a greater degree of heating of the sample itself, which allows locally more intense melting of the sample. The roughness of titanium implants was formed for Ra from 1.136 to 2.064 μm .

Титановые имплантаты из-за высокой биосовместимости, механических свойств и коррозионной стойкости [1] являются основным видом протезов, применяемых в медицине для лечения переломов и замещения костных дефектов. Высокая гидрофильность поверхности является одним из решающих факторов увеличения приживляемости и остеоинтеграции протеза после имплантации [2]. Титан, обладая биоинертной поверхностью не может индуцировать быстрое формирование кости и часто создает фиброзную ткань между имплантатом и костью, что в свою очередь приводит к недостаточной остеоинтеграции [3]. Последние исследования сосредоточены на модификации поверхности титана для улучшения его биоактивности путем изменения химии и топологии поверхности. Это в свою очередь вызывает необходимость в разработке новых методов повышения гидрофильности поверхности титана. Одним из возможных эффективных методов является плазменно-электролитное формирование микро-рельефа поверхности, которое заключается в горении одиночных микро-разрядов на поверх-

ности обрабатываемого изделия, служащим катодом. Целью работы являлось исследование возможности формирования микрорельефа титановых имплантатов для увеличения гидрофильности поверхности.

Для достижения поставленной цели использовалась экспериментальная установка, в которой обрабатываемый образец, изготовленный из сплава ВТ-1 в форме прутка диаметром 5 мм, был погружен на глубину 2мм в 5% раствор гидрокарбоната натрия. Формирование микрорельефа реализовывалось при катодной поляризации образца и при использовании пульсирующей формы напряжения в диапазоне значений от 100 до 130 В. Использование данного диапазона значений напряжений обусловлено горением отдельных локальных микроархивов на поверхности образца, именно с помощью них реализуется локальное оплавление поверхности, приводящее к увеличению шероховатости и формирование развитого микрорельефа. При более низких напряжениях происходит протекание только электрохимических реакций, а для более высоких значений в связи с интенсивным тепловыделением может происходить полное оплавление образца. Длительность обработки составила от 20 до 160 секунд с дискретностью 20 секунд для каждого режима. Измерение шероховатости поверхности проводили с помощью профилометра TR-200, а анализ морфологии поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl ZEISS EVO 50.

Элементный анализ поверхности после плазменно-электролитного формирования микрорельефа показал 10% наличие кислорода. Наличие кислорода связано с окислением титана при его локальном оплавлении. Установлено, что увеличение времени обработки приводит к увеличению шероховатости поверхности, это объясняется большей степенью нагрева самого образца, что позволяет локально более интенсивно оплачивать образец. Для 20 сек. – Ra=1,136 мкм, для 40 сек. – Ra=1,187 мкм, для 60 сек. – Ra=1,241 мкм, для 80 сек. – Ra=1,375 мкм, для 100 сек. – Ra=1,619 мкм, для 120 сек. – Ra=1,637 мкм, для 140 сек. – Ra=1,728 мкм, для 160 сек. – Ra=2,064 мкм.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Z. Jorge, J.M. Granjeiro, S.C. Sartoretto, M.D. Calasans-Maia, A.T.N.N. Alves, L. Zarranz // Clin Oral Implants Res. – 2016. – Vol. 28. – P. 893–901.*
2. *D.D. Bosshardt, V. Chappuis, D. Buser // Periodontol 2000. – 2017. – Vol. 73. – P. 22–40.*
3. *X. Liu, P.K. Chu, C. Ding // Mater. Sci. Eng. R Reports. – 2004. – Vol. 47. – P. 49–121.*

СФЕРОИДИЗАЦИЯ ОКСИДА КРЕМНИЯ В УСТАНОВКЕ ТЕРМОПЛАЗМА-50

SPHEROIDIZATION OF SILICON OXIDE BY THERMOPLASMA-50 UNIT

Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}, Даутов И.Г.⁴, Васильев Н.О.¹
Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}, Dautov I.G.⁴, Vasiliev N.O.¹

¹ Казанский федеральный университет, Россия, 420008, ул. Кремлевская, дом 18, Казань

² Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2

⁴ Казанский научно-исследовательский технический университет-КАИ, Россия, 420111, Казань, ул. К. Маркса, дом 10
e-mail: kashlenar@gmail.com

Работа посвящена исследованию параметров сфероидизации частиц оксида кремния на установке ТЕРМОПЛАЗМА-50 с целью создания сорбента - носителя неподвижной фазы колонки ВЭЖХ. Было установлено, что порошок оксида кремния размером 10 мкм полученный в атриторе полностью сфероидизовался только режиме, когда была использована мощность 30 кВт, температура 3265°C и скорость 285 м/с.

The work is devoted to research of spheroidization parameters of silicon oxide particles on the installation THERMOPLASMA-50 in order to create a sorbent - a fixed phase carrier of HPLC column. It was found that silicon oxide powder of 10 microns in size obtained in the attritor was fully spheroidized only when the power of 30 kW, temperature 3265 °C and speed 285 m/s were used.

Хроматография является одним из наиболее важных методов анализа, используемых в научных исследованиях и в промышленности. ВЭЖХ (высокоэффективная жидкостная хроматография) является одним из видов хроматографии и используется для разделения и определения различных компонентов в жидких смесях. В процессе ВЭЖХ, неподвижная фаза колонки является ключевым элементом, который определяет эффективность и точность анализа. Создание качественного сорбента-носителя для колонок ВЭЖХ имеет важное значение в различных областях, таких как фармацевтика, пищевая промышленность, нефтепереработка и другие [1]. В последнее время, разработка и оптимизация сорбентов является активно развивающейся областью науки и технологии [2,3].

Целью работы являлось получение оптимальных параметров процесса сфероидизации частиц оксида кремния в дуговом плазмотроне с целью создания сорбента - носителя неподвижной фазы колонки ВЭЖХ.

Для проведения эксперимента был использован плазматрон и установка ТЕРМОПЛАЗМА-50. Были проведены испытания при трех различных режимах, с различными значениями мощности, температуры и скорости.

Режим №1: $P = 10$ кВт, $T = 1930$ °С, $v = 140$ м/с.

Режим №2: $P = 20$ кВт, $T = 2694$ °С, $v = 215$ м/с.

Режим №3: $P = 30$ кВт, $T = 3265$ °С, $v = 285$ м/с.

Для эксперимента был использован порошок оксида кремния, полученный путем измельчения в атриторе, с размерами менее 10 мкм. При проведении эксперимента были регулированы параметры плазматрона и установки, а также производилась подача порошка и улавливание его в процессе сфероидизации.

На основании проведенных экспериментов было установлено, что порошок оксида кремния полностью сфероидизовался только в третьем режиме, когда была использована мощность 30 кВт, температура 3265°С и скорость 285 м/с. Это свидетельствует о том, что в зависимости от размеров порошка требуются различные режимы сфероидизации и вкладываемой мощности.

Проведенные эксперименты показали эффективность процесса сфероидизации частиц оксида кремния в дуговом плазматроне для создания сорбента-носителя для колонок ВЭЖХ. Для достижения желаемого результата необходимо учитывать размеры порошка и регулировать параметры эксперимента и вкладываемую мощность. Представленная методика эксперимента может быть использована для дальнейших исследований и оптимизации процесса сфероидизации частиц оксида кремния.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Y. Wang, X. Liu, H. Gao et al.* One-step synthesis of uniform-sized mesoporous silica microspheres via spray drying using SiO₂ nanoparticles as building blocks // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2013. – Vol. 18. – P. 5681–5687.
2. *K.T. Chueh, K.C. Lin, H.Y. Wang et al.* Synthesis of uniform-sized silica microspheres with hierarchical pore structures via a sol-gel process using cyclodextrin as a pore-forming agent // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2010. – Vol. 345. – P. 342–349.
3. *G. Wang, Y. Zhang, J. Wang et al.* Facile synthesis of monodisperse silica microspheres with hierarchical macroporous-mesoporous structures // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2014. – Vol. 200. – P. 254–262.

ПЛАЗМЕННО-УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

PLASMA-ULTRASONIC ATOMIZATION OF METAL POWDERS

Кашапов Л.Н.¹, Кашапов Р.Н.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.^{1,3}

Kashapov L.N.¹, Kashapov R.N.^{1,2}, Kashapov N.F.^{1,3}

¹ *Казанский федеральный университет, Россия, 420008, ул. Кремлевская, д. 18,
Казань*

² *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7*

³ *Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
e-mail: kashlenar@gmail.com*

Работа посвящена исследованию параметров получения металлических порошков с помощью плазменно-ультразвукового распыления. Была разработана экспериментальная установка распыления и проведены исследования по влиянию ВАХ на процесс получения порошка нержавеющей стали 17-4 PH при частоте 17,5кГц.

The study is devoted to investigation of parameters of metal powders production by means of plasma-ultrasonic atomization. An experimental atomization unit was developed and the influence of the CVC on the process of obtaining stainless steel powder 17-4 PH at a frequency of 17.5 kHz was investigated.

В настоящее время, аддитивные технологии производства изделий из металла находятся на пике своей популярности и активно используются в промышленности. Одним из ключевых факторов, определяющих качество и производительность этих технологий, является сферичность и стабильность размеров частиц металлических порошков, которые используются в процессе 3D печати. Поэтому создание новейших методов получения металлических порошков является актуальной задачей.

Одним из таких новых способов получения металлических порошков является плазменно-ультразвуковое распыление металлов [1]. Этот метод позволяет получать порошок высокого качества за счет расплавления металла и последующей сферидизации частицы. Целью работы являлось создание экспериментальной установки для плазменно-ультразвукового распыления и определении параметров данного процесса.

Для определения оптимальных параметров получения порошка нержавеющей стали 17-4 PH – широко используемой в аддитивных технологиях производства - была изготовлена экспериментальная установка, реализующая процесс

ультразвукового распыления. Она состоит из камеры распыления; податчика заготовки для распыления в камеру; источника питания, подающий напряжение на электроды для расплавления заготовки; ультразвуковой колебательной системы, распыляющей жидкий металл, циклона для улавливания частиц и фильтровальной системы.

Исследования для определения оптимальных параметров процесса распыления были проведены для проволоки из нержавеющей стали 17-4 PH при частоте ультразвуковых колебаний распыляющей подложки равной 17,5 кГц, при изменяемом напряжении на электродах. Напряжения меняли от 20 до 30 В, с шагом 5В, при силе тока равной 60А. Затем определялся средний размер и сферичность полученных частиц для каждого случая.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что при увеличении напряжения на материал электрода увеличивается выход частиц из распыляемой металлической заготовки, при этом размер частиц остается одинаковым с преобладанием в районе 30-60 мкм с включениями нанопорошков. Также можно предположить, что частота колебаний значительно влияет на размер частиц и их сферичность.

В результате было определено, что использование плазменно-ультразвукового распыления материала позволяет получить порошки металлов с аналогичными характеристиками по сравнению с обычным методом атомизации, что делает этот метод производства особенно привлекательным для промышленных целей.

Разработка новых методов производства металлических порошков играет важную роль в развитии современной науки и промышленности. Плазменно-ультразвуковой метод распыления позволяет эффективно получать порошки металлов в лабораторных условиях, что делает этот метод производства особенно перспективным для будущих исследований и разработок.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *R. Kashapov, L. Kashapov, N. Kashapov, P. Sergeev // Journal of Physics: Conference Series – 2021. – Vol. 1923. – Is. 1. – No. 012026.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF TURBULENCE IN THE FLOW OF ELECTRIC ARC PLASMA

Крисковец Д.С.¹, Иванов Д.В.², Фролов В.Я.³, Юшин Б.А.⁴
Kriskovets D.S.¹, Ivanov D.V.², Frolov V.Y.³, Yushin B.A.⁴

¹ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лит. Ш

²ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лит. Ш

³ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лит. Ш

⁴ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лит. Ш

e-mail: dkriskovets@gmail.com

Представлен анализ теплообменных процессов в струе электродуговой плазмы между порошковым материалом и плазменной струей, находящейся в различных конвективных состояниях. Рассматриваются теплообменные процессы в плазменном потоке, создаваемом струйным дуговым плазмотроном для нанесения покрытий. Проведены расчеты и эксперименты в ламинарном и турбулентном режиме работы.

An analysis of heat exchange processes in an electric arc plasma jet between a powder material and a plasma jet in various convective states is presented. Heat exchange processes in a plasma flow created by a jet arc plasma torch for coating is considered, taking into account the turbulence of the plasma flow. Calculations and experiments were carried out in laminar and turbulent modes of operation.

В процессе работы выполнены экспериментальные исследования движения и нагрева частицы мелкодисперсного порошка в плазменной струе [1]. Произведен перекрестный анализ влияния турбулентности плазменного потока на движение и нагревание частицы мелкодисперсного порошка и обозначены результаты экспериментов, демонстрирующие положительное влияние степени турбулизации струи плазмы [2] на теплообменные процессы между плазмой и мелкодисперсным порошком - технологический КПД установки (Рис. 1).

В каждом исследовании искомые значения определялись при вариации параметров процесса напыления - скорости подачи материала и скорости подачи плазмообразующего газа (напрямую влияющих на степень турбулизации потока [3]). В результате - для процесса являются оптимальными: соотношение скоростей подачи плазмообразующего газа и распыляемого материала равное 1:1,5; режимы работы при переходном характере перемещения газовой среды [4].

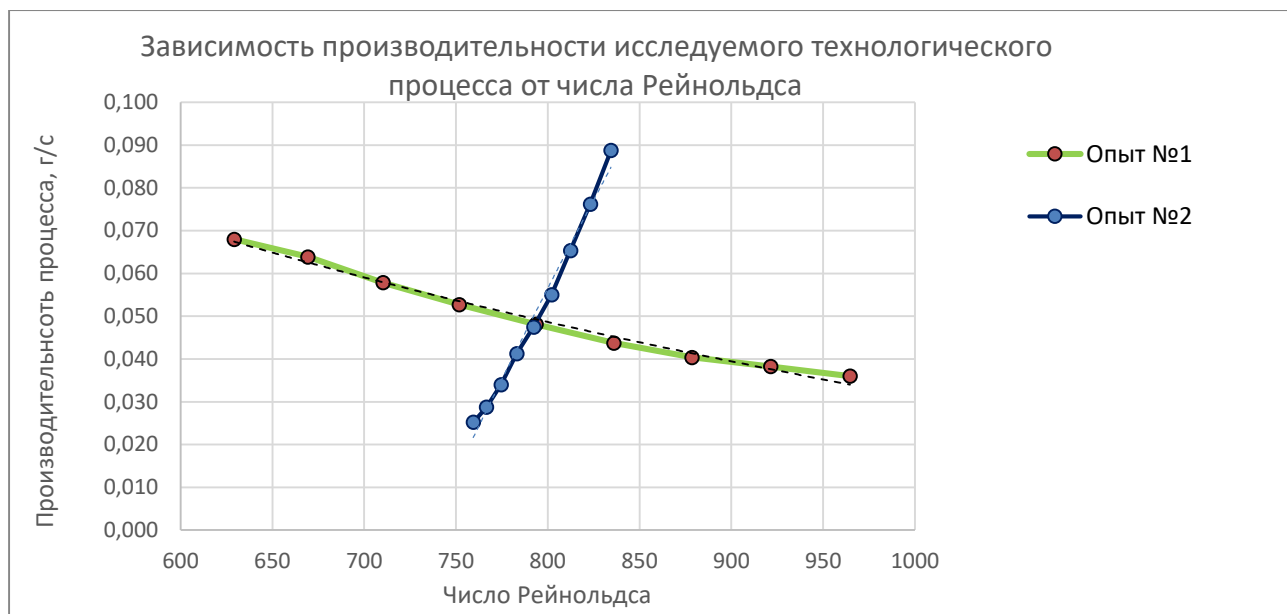


Рис. 1: Сравнительные результаты лабораторных исследований

Результаты лабораторного исследования демонстрируют, что падение производительности процесса в первом случае обусловлено тем, что обобщенное влияние значительного сокращения траектории движения частиц и увеличения скорости их движения приводит к тому, что время нахождения частиц в потоке становится недостаточным для расплавления частиц крупной фракции, что влечет за собой снижение массового прироста с ростом скорости подачи плазмообразующего газа (продольной составляющей). При этом стоит отметить, что в области перехода характера движения струи в турбулентный режим наблюдается незначительное сокращение крутизны падения исследуемой характеристики. При увеличении скорости подачи порошкового материала (поперечной составляющей) траектория движения частиц увеличивается, что увеличивает время нахождения частиц в плазменной струе, которое суммарно с положительным влиянием на процесс перехода характера движения потока к турбулентному приводит к росту производительности, а следовательно – КПД.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Я. и др. Электротехнологические промышленные установки. – СПб: Издательство Политехнического университета, 2010.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. и др. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992.
3. Derevyankin P.G., Kriskovets D.S., Frolov V.Y., Yushin B.A. // Proc. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. – No. 839.
4. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Теплообмен в плазме. – СПб: Издательство Политехнического университета, 2008.

ПЕРЕХОД ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КОНТАКТА В ПЛАЗМЕННЫЙ В РЕЛЬСОВЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

TRANSITION OF A SOLID-STATE CONTACT TO A PLASMA ONE IN THE RAILGUN

Козлов А.А., Козлов А.В., Поварёшкин А.М., Полищук В.П., Шурупов
А.В.

Kozlov A.A., Kozlov A.V., Povareshkin A.M., Polishchuk V.P., Shurupov A.V.

*Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Россия,
125412, Москва, Ижорская 13, стр.2
e-mail: alexk5577@yandex.ru*

При скорости метания дюралевых ударников, достигавшей $\sim 2,5$ км/с, твердотельный контакт между рельсами и ударником переходил в плазменный при скорости от $\sim 0,8$ до ~ 2 км/с

At the speed of duralumin projectiles, which reached ~ 2.5 km/s, the solid-state contact between the rails and the projectile turned into plasma one at the speeds of ~ 0.8 to ~ 2 km/s.

Расчётный режим работы рельсовых ускорителей с твердотельной арматурой характеризуется низким значением падения выходного напряжения на канале ускорителя V_m (~ 10 В). В этом режиме коэффициент преобразования энергии, запасённой в емкостном накопителе (ЕН), в кинетическую энергию ударника, достигает $\sim 45\%$. Если в контакте между ударником и рельсами возникает дуговой разряд, то напряжение V_m возрастает на один-два порядка, а коэффициент преобразования энергии уменьшается в два-три раза. На сегодняшний день максимальная скорость ударника, при которой сохраняется металлический контакт между ним и электродами, составляет $\sim 2,8$ км/с [1].

В наших экспериментах дюралевые ударники массой m_p от 7 до 90 г ускорялись в прямоугольном канале длиной ~ 1 м. Электроды изготавливались из меди, латуни и стали, изоляционные стенки – из стеклотекстолита и поликарбоната. Источниками энергии являлись многосекционные ЕН с запасаемой энергией от 1,2 до 4,8 МДж. Экспериментальная установка и методики основных измерений описаны в работе [2].

Ток в рельсотроне достигал ~ 1 МА, процесс ускорения длился ~ 1 мс. Полностью расчётный режим работы рельсотрона удалось сохранить при скорости метания 0,78 км/с ($m_p=40$ г). На рисунке 1 для этого режима приведены осциллограммы тока I , напряжения на входе в канал (V_b) и на выходе из него (V_m). Как видно, выходное напряжение V_m в течение всего «выстрела» составляло ~ 10 В.

При более высоких скоростях ударника рельсотрон переходил в режим плазменного контакта. Переход сопровождался увеличением напряжения V_m с

~20 до ~300 В, этот рост происходил за 50-100 мкс и начинался через 200-300 мкс после старта. Скорость, при которой металлический контакт переходил в плазменный, изменялась от ~0,8 до ~2 км/с. Максимальная скорость ударника при таком комбинированном режиме ускорения составила ~2,5 км/с ($m_p \sim 10$ г).

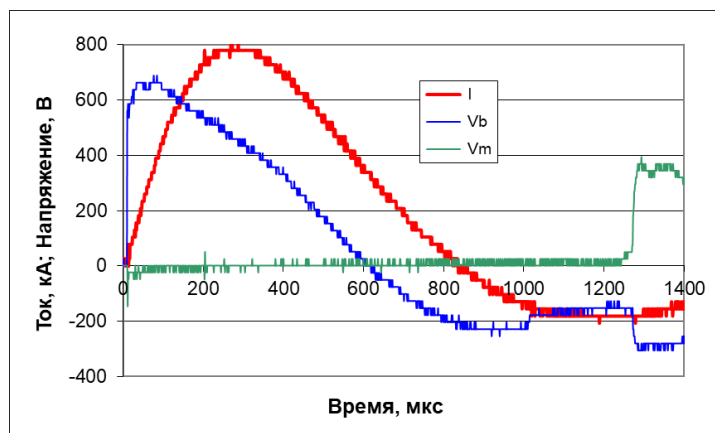


Рис. 1. Осциллограммы тока, входного и выходного напряжения

В работе обсуждается соответствие полученных результатов известным моделям деградации металлического контакта между ударником и рельсами [3]. Первое время считалось, что переход твердотельного контакта в плазменный обусловлен высокоскоростным скин-эффектом, вызывающим движение фронта плавления по поверхности ударника [4]. В соответствии с этой моделью после достижения фронтом плавления передней кромки ударника контакт между ним и рельсами становился плазменным. С недавних пор в качестве возможной причины деградации твердотельного контакта стала рассматриваться резонансная деформация канала рельсотрона под действием движущегося фронта высокого давления [5]. В работе [2] показано, что этот эффект препятствует достижению высоких скоростей в рельсотроне с «плазменной» арматурой. Полученные экспериментальные результаты не позволяют пока подтвердить или опровергнуть гипотезы, обсуждаемые в работах [3, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hundertmark S., Vincent G., Simicic D., Schneider M.* Increasing Launch Efficiency with the PEGASUS // IEEE Trans. Plasma Science. – 2017. – Vol. 45. – No. 7. – P. 1607–1613.
3. *Kozlov A.V., Kotov A.V., Polishchuk V. P., Shurupov A.V.* Electromagnetic Launcher with Massive Light-Plasma Initiator // Technical Physics. – 2019. – Vol. 64. – No. 9. – P. 1298–1307.
4. *Barber J.P., Bauer D.P., Jamison K., Parker J.V., Stefani F., Zielinski A.* A Survey of Armature Transition Mechanisms // Trans. On Magn. – 2003. – Vol. 39. – No. 1. – P. 47–51.
5. *Parks P.B.* Current melt-wave model for transitioning solid armature // J. Appl. Phys. – 1990. – Vol. 67. – No. 7 – P. 3511–3516.
6. *Reck B., Hundertmark S., Vincent G., Schubert F., Schneider M.* Investigation of Rail Deformation and Stress Wave Propagation in the ISL-NGL60 Railgun // IEEE Trans. Plasma Science. – 2019. – Vol. 47. – No. 5. – P. 2556–2559.

**ВЛИЯНИЕ ВИДА НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА
НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДУГОВЫХ ПРОБОЕВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ
ГЕЛИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧИ-РАЗРЯДА**

**INFLUENCE OF TUNGSTEN NANOSTRUCTURES GEOMETRY ON ARC
INITIATION UNDER HELIUM ION IRRADIATION IN AN ICP DISCHARGE**

Кукушкина М.С.^{1,2}, Казиев А.В.², Колодко Д.В.^{1,2,3}, Харьков М.М.², Рыкунов Г.И.^{1,2}, Цвентух М.М.¹
Kukushkina M.S.^{1,2}, Kaziev A.V.², Kolodko D.V.^{1,2,3}, Kharkov M.M.²,
Rykunov G.I.^{1,2}, Tsventoukh M.M.¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

³*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, г. Фрязино, Россия
e-mail: ritakuk10@rambler.ru*

Определены параметры дугового разряда и величины тока и напряжения смещения, характерные для пробоев на наноструктурированной поверхности вольфрама, полученной разными способами.

Arc discharge parameters and values of current and bias voltage typical for arc discharges on different nanostructured tungsten surface have been determined.

Модификация рельефа поверхности под воздействием плазменных потоков имеет важное значение как для первой стенки термоядерных установок, так и для широкой области технологических приложений [1]. Среди процессов модификации рельефа выделяется явление наноструктурирования поверхностных слоев вольфрама [2] — образование вольфрамового пуха (W fuzz). Оно привлекает внимание не только как новый малоизученный эффект взаимодействия плазмы с поверхностью, но и как фактор, облегчающий инициирование самостоятельных электрических разрядов на первой стенке термоядерных установок [3]. Поэтому для более глубокого понимания процесса формирования дуговых разрядов между плазмой и стенкой необходимо исследовать закономерности и механизмы возникновения взрывоэмиссионных ячеек катодного пятна на наноструктурированных вольфрамовых поверхностях, формирующихся в условиях первой стенки термоядерных установок [4–6].

Для исследования влияния структуры поверхности вольфрама на возникновение на ней дуговых пробоев использовались образцы, обработанные разными методами: 1) непосредственно путем облучения вольфрамовой фольги ионами

гелия из плазмы ВЧИ разряда и 2) путем осаждения вольфрамового слоя на вольфрамовую фольгу в магнетронной распылительной системе с гелием в качестве рабочего газа и последующего облучения полученной структуры ионами гелия из плазмы ВЧИ разряда. Эксперименты по облучению вольфрама ионами гелия проводились на установке «Белла». Для генерации плазмы высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда использовалась плоская катушка, размещенная непосредственно в вакуумном объеме. Рабочая частота источника ВЧ-мощности 13,56 МГц. Облучение производилось в диапазоне температур образцов от 1000 до 1500 К, при повышенном потенциале смещения на них ~ -800 В.

Пример осциллограммы тока и напряжения дугового разряда на вольфраме и изображение кратера на поверхности после пробоя показаны на рисунке 1.

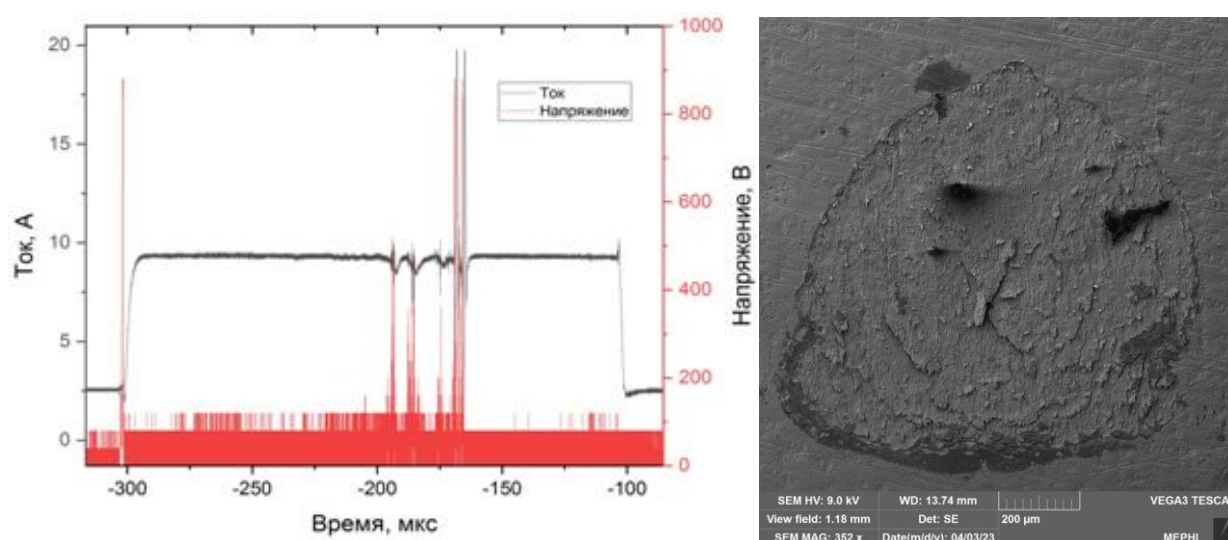


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения дугового разряда на вольфраме (слева); изображение кратера на поверхности после пробоя и дальнейшего облучения (справа)

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта 22-12-00274.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yu.I. Mamontov* // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2022. – Vol. 50. – Is. 9. – No. 2720.
2. *S. Kajita* // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – No. 30380.
3. *S. Kajita* // Proc. 28th ISDEIV (Greifswald, September 23–28, 2018).
4. *M.M. Tsvetoukh* // Phys. Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – No. 053504.
5. *M.M. Tsvetoukh* // Phys. Plasmas. – 2021. – Vol. 28. – No. 024501.
6. *Yu.A. Zemskov* // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2064. – No. 012004.

Секция 8
ПЛАЗМОХИМИЯ
И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

РАЗЛОЖЕНИЕ МЕТАНА ПРИ ПОМОЩИ ВЧ ПЛАЗМОТРОНА

METHANE DECOMPOSITION USING HF PLASMATRON

Водопьянов А.В.^{1,2}, Мансфельд Д.А.¹., Синцов С.В.^{1,2}., Нежданов А.В.²., Преображенский Е.И.¹., Чекмарев Н.В.¹, Машин А.В.².

Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A., Sintsov S.V., Nezhdanov A.V., Preobrazhensky E.I., Chekmarev N.V., Mashin A.V.

¹*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46.*

²*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, г. Нижний Новгород, пр-т. Гагарина, д. 23.*

e-mail: avod@ipfran.ru

В работе исследовался процесс плазмохимического разложения метана на водород и углерод при помощи высокочастотного индукционного плазматрона атмосферного давления. Исследованы зависимости степени конверсии метана, энергетической эффективности и скорости наработки водорода от условий процесса. Степень конверсии метана в водород может достигать значений, близких к 100%. Исследовались морфология и фазовый состав получаемого углерода.

In this work, the process of plasma-chemical decomposition of methane into hydrogen and carbon was studied using a high-frequency induction plasma torch of atmospheric pressure. The dependences of the degree of methane conversion, energy efficiency and hydrogen production rate on the process conditions were studied. The degree of conversion of methane to hydrogen can reach values close to 100%. The morphology and phase composition of the resulting carbon were studied.

Среди множества промышленных методов производства водорода паровая конверсия метана в настоящее время является наиболее популярным [1]. Основным недостатком такой технологии является большой объем углекислого газа, образующегося в процессе переработки метана. В связи с этим значительный интерес вызывают способы производства водорода свободные от выбросов парниковых газов. Одним из таких способов может оказаться пиролиз метана в плазме (плазмолиз) [2–6]. Способ получения водорода из метана при помощи плазмолиза, несомненно, является более энергозатратным по сравнению с паровым риформингом [7], но с учетом современных требований на декарбонизацию энергетики, может оказаться перспективным. В данной работе для конверсии метана предлагается использовать ВЧ разряд атмосферного давления, источником мощности для которого является генератор с частотой излучения 5.28 МГц и мощностью до 60 кВт. Выбор такого типа разряда обусловлен тем, что в ВЧ плазматронах можно создать однородный поток горячего плазмообразующего газа с необходимыми параметрами для полной конверсии метана. Описание установки и ре-

зультаты первых экспериментов можно найти в [8]. Первые эксперименты демонстрируют перспективность данного подхода, степень конверсии метана может достигать 100% при соотношении потоков метана и аргона равным 1/10 или менее. Максимальной производительности по водороду 3,5 м³/ч удается достичь при степени конверсии 60-70%.

Исследование особенностей морфологии и фазового состава углерода, который образовывался в результате плазмохимического разложения метана, проводилось при помощи техник фотолюминесценции, комбинационного рассеяния лазерного излучения, рентгеновской дифракции. В большинстве режимов, для которых характерны высокая производительность по водороду и не полное разложение метана, углерод осаждается в аморфном виде. Но в режимах с сильным разбавлением метана аргоном, в случае, когда метан попадает в наиболее горячую часть плазменного образования, в составе аморфной сажи отчетливо появляется фаза углеродных нанотрубок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. Barelli, G. Bidini, F. Gallorini, S. Servili* // *Energy*. – 2008. – Vol. 33. – P. 554–570.
2. *C. Guéret, M. Daroux, F. Billaud* // *Chem. Eng. Sci.* – 1997. – Vol. 52. – P. 815–827.
3. *M.S. Khan, B.L. Crynes* // *Ind. Eng. Chem.* – 1970. – Vol. 62. – P. 54–59.
4. *G. Chen, X. Tu, G. Homm, A. Weidenkaff* // *Nat. Rev. Mater.* – 2022. – Vol. 7. – P. 333–334.
5. *G. Fau, N. Gascoin, P. Gillard, J. Steelant* // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. – 2013. – Vol. 104. – P. 1–9.
7. *A.I. Pushkarev, A.M. Zhu, X.S. Li, R.V. Sazonov* // *High Energy Chem.* – 2009. – Vol. 43. – P. 156–162.
8. *L. Bromberg, D.R. Cohn, A. Rabinovich, N. Alexeev* // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1999. – Vol. 24. – P. 1131–1137.
9. *А.В. Водопьянов* // *Письма в Журнал технической физики*. – 2022. – Т. 48. – № 34.

ТРАВЛЕНИЕ РУТЕНИЯ В СМЕСИ Ar/O₂ RUTHENIUM ETCHING IN Ar/O₂ MIXTURE

Д.Г. Волошин¹, А.Н. Кропоткин¹, Д.В. Лопаев¹,
А.П. Палов¹, Т.В. Рахимова¹, И.И. Амиров²
D.G. Voloshin¹, A.N. Kropotkin¹, D.V. Lopaev¹,
A.P. Palov¹, T.V. Rakhimova¹, I.I. Amirov²

Отдел микроэлектроники, НИИ Ядерной физики им Д.В. Скобельцына,
МГУ им. М.В Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва,
119991, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, строение 2
Лаборатория технологии микро- и наносистемной техники,
Ярославский Филиал Физико-технологического института имени К.А. Валиева
РАН, Российская Федерация, г. Ярославль, 150007, ул. Университетская 26

e

m

Проведено экспериментальное и теоретическое изучение травления рутения в смеси Ar/O₂. В плазме индукционного разряда была исследована скорость травления в зависимости от газовой смеси и дополнительного постоянного напряжения. В рамках численной модели разряда рассчитаны потоки ионов и атомов O из плазмы на поверхность образца. Эти потоки использовались в Монте-Карло модели травления для расчета скорости травления.

v

Ruthenium etching in Ar/O₂ mixture was studied both experimentally and theoretically. ICP plasma was used to study etching rates as a function of gas mixture and additional dc bias voltage. The ICP discharge numerical model was used to calculate fluxes of ions and O atoms from plasma to the sample surface. These fluxes were used in the Monte-Carlo model of etching to calculate the etch rate.

h

С развитием микроэлектроники и уменьшением характерных размеров создаваемых структур идет поиск инновационных архитектур устройств, новых концепций интеграции, создания шаблонов и новых материалов. В настоящее время, вследствие совместимости с уже отработанными технологическими процессами, хорошей термической стабильности и относительной легкости травления, такие материалы как рутений Ru и диоксид рутения RuO₂ являются одними из кандидатов, предложенными для замены традиционного пакета электродов затвора из легированного поли-Si/SiO₂ в DRAM технологии.

В данной работе проведено экспериментально-теоретическое исследование процессов травления рутения. Впервые предложена модель травления рутения, позволяющая описать экспериментально измеренные скорости травления.

Экспериментальная установка представляет собой плазменный реактор на основе индукционного разряда. Разряд зажигался в смеси Ar/O₂ при ВЧ мощности 800 Вт, давлении 0.6 Па, и расходе газа – 70 sccm.

Для расчета потоков заряженных (ионы Ar⁺, O₂⁺, O⁺) и нейтральных (атомы O) частиц из плазмы была использована модель индукционного плазменного разряда в диффузионно-дрейфовом приближении [1]. Разработанная ранее программа MOTREV, основанная на трехмерной модели Монте-Карло процессов

зарядки и травления [2], была применена для моделирования травления рутения в смеси Ar/O₂. Модель включает в себя реакции распыления и окисления на поверхности материала.

Модель плазмы была протестирована в условиях эксперимента [3]. Было получено хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными по плотности атомов и потока ионов на стенку реактора. Данное согласие позволяет использовать рассчитанные в модели плазмы потоки заряженных и нейтральных частиц как входные данные для модели травления. Далее модель травления была использована для описания литературных данных по травлению рутения в смеси Ar/O₂ под плавающим потенциалом в зависимости от содержания кислорода в смеси и при подачи дополнительного постоянного напряжения [3]. После нормировки вероятностей реакций окисления на поверхности были получены результаты, показанные на рисунке 1. Видно, что скорость травления увеличивается с ростом доли кислорода в смеси Ar/O₂ и начинает выходить на насыщение при содержании O₂ = 60%.

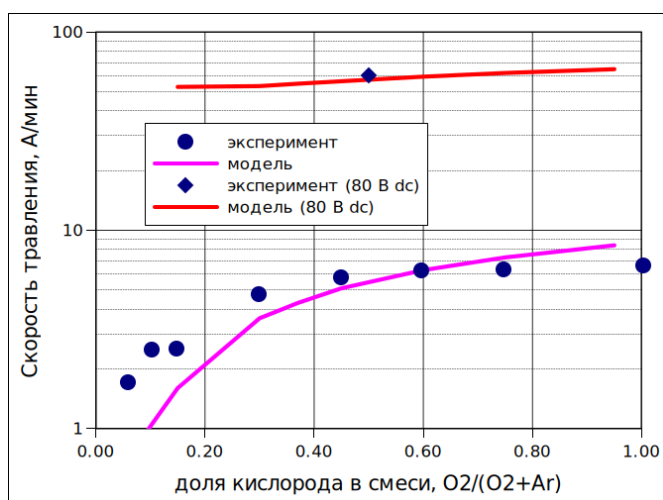


Рис. 1. Скорость травления, эксперимент и результаты модели

В условиях эксперимента в данной работе были измерены скорости травления в зависимости от состава смеси при дополнительном постоянном напряжении $V_{dc} = -80$ В, а также в зависимости от величины V_{dc} в чистом кислороде (с 5% добавками Ar или Kr в качестве актинометра). Такие измерения позволяют изучить совместное влияние распыления ионами и химического окисления поверхности при травлении в отличие от работы [3], где состав смеси варьировался только для травления под плавающим потенциалом.

Дальнейшая работа будет направлена на расширение модели травления для случая тройной смеси Ar/O₂/Cl₂. Добавление хлора позволяет получить значительное увеличение скорости травления.

ЛИТЕРАТУРА

1. А
2. A.P. Palov, Yu.A. Mankelevich, T.V. Rakhimova, D. Shamiryay // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. HVol. 43. – No. 075203.
3. C.C. Hsu, J.W. Coburn, D.B. Graves // J. Vac. Sci. & Tech. A. – 2006. – Vol. 24. – No. 1.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ КАДМИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

PLASMA-CHEMICAL SYNTHESIS OF CADMIUM CHALCOGENIDES FOR SOLAR CELLS

Мочалов Л.А., Кудряшов М.А., Прохоров И.О., Вшивцев М.А.
Mochalov L.A., Kudryashov M.A., Prokhorov I.O., Vshivtsev M.A.

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, 24
e-mail: Mvshivtsev@mail.ru*

В работе впервые применен метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) для прямого одностадийного синтеза гетероперехода CdTe/CdS для тонкопленочных солнечных элементов. Для инициирования химических взаимодействий между прекурсорами использовался низкотемпературный неравновесный плазменный разряд ВЧ (40 МГц). В качестве исходных веществ использовали кадмий, теллур и серу высокой чистоты.

In this work, for the first time, the method of plasma-chemical vapor deposition (PECVD) was applied for the direct single-stage synthesis of a CdTe/CdS heterojunction for thin-film solar cells. To initiate chemical interactions between precursors, a low-temperature nonequilibrium high-frequency plasma discharge (40 MHz) was used. High purity cadmium, tellurium, and sulfur were used as starting materials.

В настоящее время угроза глобального потепления и уменьшение запасов традиционных источников энергии вынуждает многие страны в мире наращивать темпы производства возобновляемых источников энергии, среди которых солнечная энергетика является наиболее перспективной. На сегодняшний день однокаскадные солнечные элементы на основе монокристаллического кремния (с-Si), доминирующие на рынке наземной солнечной энергетике (занимают более 90% рынка), достигли эффективности 25-26% и приближаются к теоретическому пределу [1], который согласно ограничению Шокли-Квиссера для кремния лежит в районе 29% [2]. Как показывает практика, единственным способом преодоления предела Шокли-Квиссера на сегодняшний день является использование многокаскадных солнечных элементов.

Целью данной работы является разработка новых подходов к синтезу комбинированных наноструктурированных материалов при помощи плазменного инициирования химических реакций на основе халькогенидов кадмия.

Осаждение халькогенидов кадмия осуществляется из высокочистых элементов Cd, S, Se и Te, которые подаются в плазмохимический реактор термическим испарением в вакууме, инициирование реакции взаимодействия летучих элементов производят плазменным разрядом, синтез халькогенидного материала

проводят в условиях неравновесной плазмы высокочастотного индукционного (или емкостного) разряда при пониженном давлении, а твердые продукты реакции осаждают на охлаждаемую/нагреваемую подложку. Схема установки представлена на рисунке 1 (рис. 1)

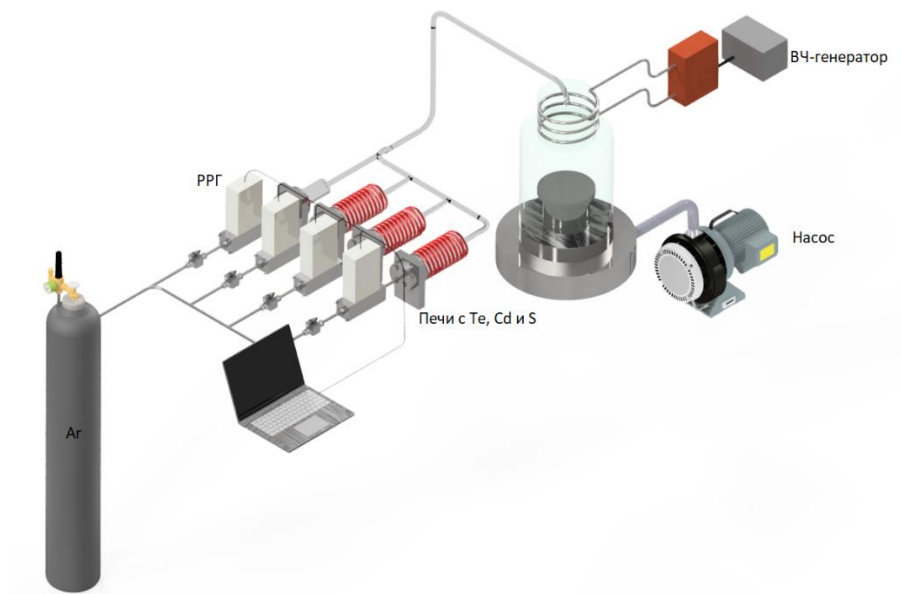


Рис. 1. Схема плазмохимической установки

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yoshikawa K.* // *Nat. Energy.* – 2017. – Vol. 2. – No. 17032.
2. *Shockley W., Queisser H.J.* // *J. Appl. Phys.* – 1961. – Vol. 32. – No. 510.

ПЛАЗМОАКТИВИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

PLASMA-ACTIVATED PROCESSING OF METALS AND SEMICONDUCTORS IN AIR AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Ивченко А.В., Комов А.Н.
Ivchenko A.V., Komov A.N. †

*Самарский университет, Россия, 443086, Самара, Московское шоссе 34
e-mail: fgrrt@yandex.ru*

Исследован процесс модифицирования металлов и полупроводников под действием поверхностного разряда в среде атмосферного воздуха. Продемонстрированы изменения свойств подложек в зависимости от режимов обработки.

The process for metals and semiconductors modification under the surface discharge action in atmospheric air is studied. The changes in the properties of the substrates depending on the processing modes are presented.

В настоящее время источники плазмы на основе поверхностных разрядов находят широкое применение в составе систем накачки газовых лазеров, а также плазмохимических генераторов для электросинтеза определенных веществ или обработки газообразных сред [1-2]. Одно из перспективных приложений поверхностных разрядов, связано с направленным воздействием плазмы на поверхности материалов в средах атмосферного давления с целью модифицирования свойств поверхностного слоя или образования покрытий [3].

В настоящей работе рассматривается применение слаботочной формы частотного поверхностного разряда [4] для опосредованной обработки металлов и полупроводников в среде атмосферного воздуха. В отличие от [5] процесс обработки не был связан с задачей очистки подложек и нацелен на

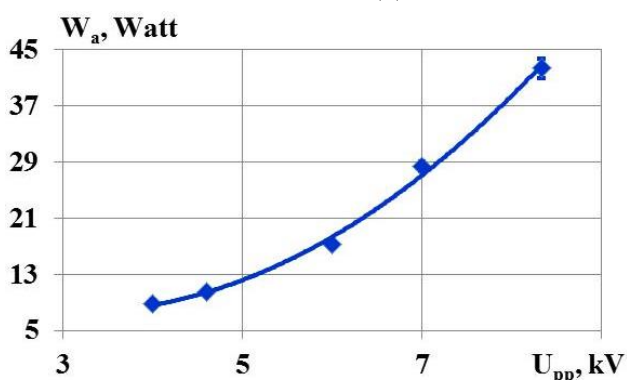


Рис.1. Зависимость активной мощности поверхностного разряда от напряжения U_{pp} на электродах

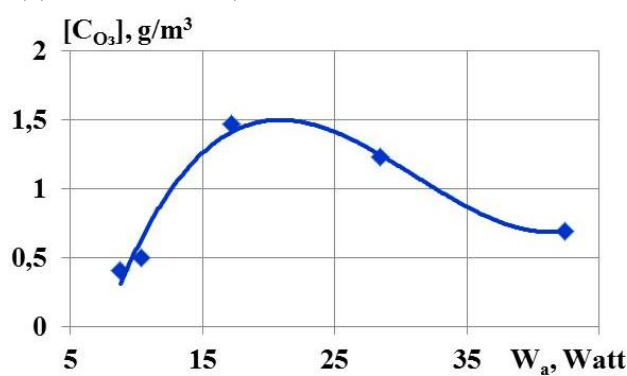


Рис.2. Содержание озона в воздухе при прокачке через газоразрядный генератор поверхностного разряда Расход газа 1 литр/мин

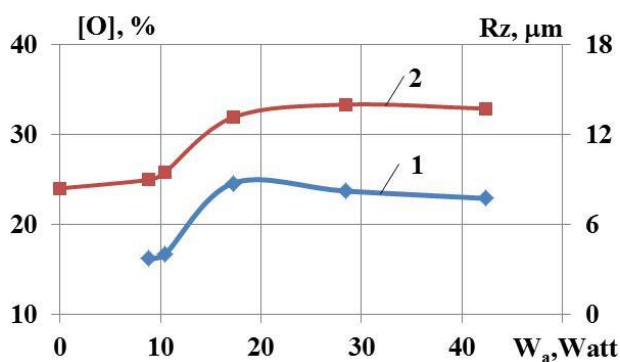


Рис.3. Зависимость свойств поверхностного слоя образцов из малоуглеродистой стали от активной мощности поверхностного разряда:
 1-содержание кислорода
 2-изменение шероховатости.
 Время обработки -120 мин

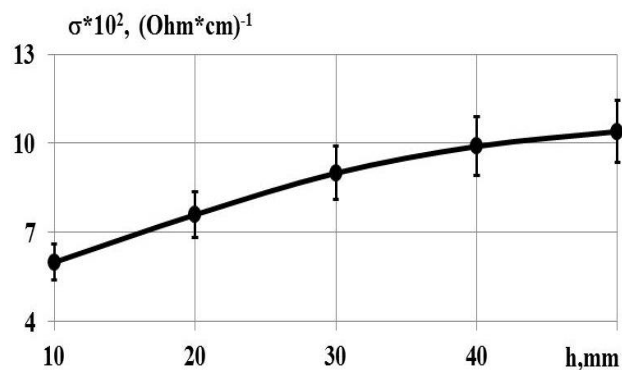


Рис.4. Зависимость проводимости пластин кремния (КЭФ-4) от расстояния до поверхностного разряда при продолжительности обработки 15 мин,
 $W_a \approx 42$ Вт

получение оксидных покрытий. В эксперименте разряд возбуждался на частоте $f = 8.33$ кГц при напряжении на электродах $U_{pp} < 8$ кВ и потреблял мощность не более 45Вт (рис.1). Плазма разряда генерировала УФ излучение ($\lambda=337$ нм), обеспечивала насыщение воздуха озоном (рис.2), являясь при этом источником тепла. При обработке образцы из малоуглеродистой стали ($[C]=0.2\%$) и кремния (КЭФ-4) устанавливались на расстоянии $h=10-50$ мм от плазменного листа разряда. Под действием факторов разряда поверхность образцов подвергалась окислению (рис.3). При этом если образцы из стали покрывались оксидным слоем со всех сторон, то образцы кремния изменяли свои свойства только у поверхностей, непосредственно обращенных к разряду (рис.4). Последнее подтверждает наличие эффекта совместного воздействия озона и УФ-излучения на подложку, а также возможности его использования при обработке.

В работе изучаются изменения свойств поверхностного слоя материалов в зависимости от режимов генерации поверхностного разряда. Рассмотрены примеры практического использования модифицированных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.А. Журавлев, В.В. Некрасов, В.П. Шорин Исследование процессов формирования плазменных электродов импульсных и импульсно-периодических CO_2 -лазеров атмосферного давления. – Самара: НПО «Импульс», 1997.
2. A. Fridman Plasma Chemistry. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
3. Te-En Li // Synthetic Metals. – 2019. – Vol. 256. – P. 1–6.
4. A.V. Ivchenko, P.E. Timchenko, V.P. Zakharov, V.L. Marinin The Properties of Colliding Surface Discharges in Air // Europhysics Conference Abstracts. – 2012. –Vol. 36F. – P. 1–4.
5. О.В. Левина, А.М. Пухов // Оптический журнал. – 1994. – № 5. – С. 50–52.
6. J.H. Tsai, I.C. Cheng, J.Z. Chen // J. Phys. D Appl. Phys. – 2018. – Vol. 51. – No. 025502.
7. А.В. Ивченко // Физическое образование в вузах. – 2019. – Т. 25. – № 2. – С. 125–141.

**КИНЕТИКА ДЕЙСТРУКЦИИ РОДАМИНА Б В ВОДНОМ РАСТВОРЕ
В ПРИСУТСТВИИ ФОТОКАТАЛИЗАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**KINETICS OF RHODAMINE B DESTRUCTION IN WATER
IN THE PRESENCE OF PHOTOCATALYST UNDER THE ACTION
OF DIRECT CURRENT DISCHARGE**

Карташов С.И., Иванов А.Н., Шутов Д.А., Овчинников Н.Л., Рыбкин В.В.
Kartashov S.I., Ivanov A.N., Shutov D.A., Ovchinnikov N.L.,
Rybkin V.V.

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, Иваново
e-mail: shutov@isuct.ru*

В работе исследована кинетика деструкции Родамина Б в жидком аноде и жидком катоде разряда постоянного тока атмосферного давления в воздухе в присутствии фотокатализатора на основе оксида титана. Показано, что в исследованных условиях вклад катализатора в деструкцию родамина отсутствует.

The kinetics of Rhodamine B degradation in liquid anode and liquid cathode of atmospheric pressure direct current discharge in air in the presence of titanium oxide photocatalyst was studied. It was shown that under the investigated conditions the contribution of the catalyst to the degradation of rhodamine is absent.

Родамин Б является распространенным органическим красителем, используемым в промышленности, но он имеет длительное время распада и канцерогенные свойства, представляя угрозу для окружающей среды. Известна работа [1], в которой обработка водных растворов родамина проводилась в проточном диэлектрическом барьерном разряде в присутствии фотокатализатора, представляющего из себя цеолитную основу с нанесенным на нее слоев TiO_2 .

В данной работе изучены возможность тлеющего разряда постоянного тока для деструкции родамина в его водных растворах в присутствии вышеупомянутого фотокатализатора. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Раствор родамина концентрацией 11 мг/л служил как жидким катодом, так и жидким анодом разряда постоянного тока 40 мА, горящего в воздухе атмосферного давления. Объем жидкого катода и анода составлял 100 мл. Во время горения разряда раствор перемешивался магнитной мешалкой, помещенный на дно стеклянного реактора. Кинетика деструкции родамина исследовалась в диапазоне времени горения разряда 0-600 с, как в отсутствии катализатора, так и при помещении навесок массой по 0,1 г в анодную и катодную ячейки. В качестве катализатора использовался гранулированный композит TiO_2/NaX , который был

приготовлен путем добавления гранул цеолита в раствор полигидроксикомплексов титана, с последующей гидротермальной обработкой, фильтрацией, сушкой и обжигом полученного композита.

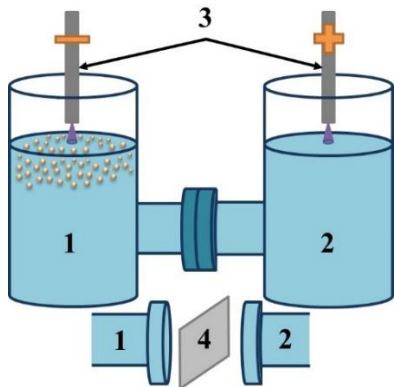


Рис. 1. Схема Н-образной плазменно-растворной системы. 1 – жидкий анод, 2 – жидкий катод, 3 – титановые электроды, 4 – целлофановая мембрана

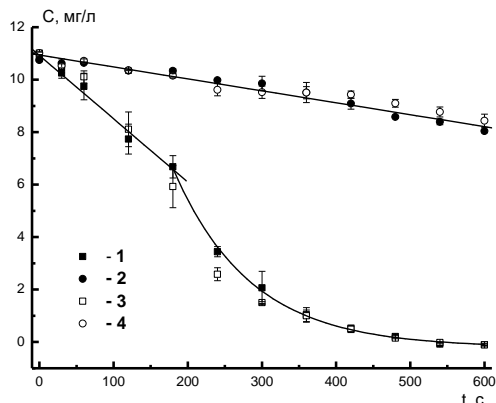


Рис. 2. Кинетика изменения концентрации Родамина Б под влиянием плазмы тлеющего разряда атмосферного давления: 1 - жидкий катод без катализатора, 2 - жидкий анод без катализатора, 3 - жидкий катод с катализатором, 4 - жидкий анод с катализатором

Концентрация родамина в растворе определялась спектрофотометрически (СФ-56, Россия) по полосе поглощения 555 нм. Для каждого времени обработки раствора проводилось не менее 3 независимых измерений.

На рис. 2 приведены кинетические кривые изменения концентрации родамина. Обращает на себя внимание то, что разрушение родамина в жидком аноде выражено намного слабее, чем в жидком катоде. Кинетика деструкции родамина в жидком аноде подчиняется формальному нулевому порядку. На кинетической кривой изменения концентрации родамина, обработанного в жидком катоде разряда, можно выделить два участка. На начальном участке кинетика описывается нулевым порядком, тогда как при временах обработки 200 с и выше, кинетика подчиняется первому порядку реакции. Эффективная константа скорости процесса деструкции составляет $\sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Вклад катализатора, во всяком случае, в диапазоне исследуемых условий и в пределах погрешности эксперимента, не выявлен.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FZZW-2023-0010. Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

ЛИТЕРАТУРА

1. M.F. Butman, A.A. Gushchin, N.L. Ovchinnikov // Catalysts – 2010. – V.10. – № 359.

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT OF THE SURFACE OF A METAL PRODUCT

Купутдинова А.И.¹, Гайсин Ал.Ф.², Закиров Д.У.¹
Kuputdinova A.I.¹, Gaisin Al.F.², Zakirov D.U.¹

¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева -КАИ», Россия, 420111 г. Казань,
ул. К. Маркса, 10

²Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412,
г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
e-mail: almaz87@mail.ru

Исследован процесс электролитно-плазменной обработки поверхности металлического изделия. Методом сканирующей электронной микроскопии исследована поверхность образца до и после обработки.

The process of electrolytic-plasma treatment of the surface of a metal product studied. The surface of the sample studied by scanning electron microscopy before and after treatment.

Разряды в плазменно-жидкостных системах генерируются постоянным или переменным током в межэлектродном пространстве, где в качестве одного из электродов применяется жидкость [1-3].

Интерес к плазменно-жидкостным системам обусловлен тем, что в данной области исследований сложным образом переплетены три подсистемы, описывающие соответственно физику процессов в плазменном (газовый разряд), жидком (непроточный и проточный электролит) и газовом (окружающий воздух) фазовых состояниях. Вместе с тем плазменно-жидкостные системы находят большой интерес для решения различных прикладных задач в области машиностроения, металлообработки, медицины и космической промышленности. Специалисты из различных научных школ исследуют применения разрядов с жидкими электродами для обработки изделий со сложной геометрией внешней и внутренней поверхности, изготовленных как с применением традиционных методов производства (штамповка, литье и др.) [4-13], так и с применением аддитивных методов лазерного спекания металлических порошков. В ряде зарубежной и отечественной печати представлены результаты по использованию плазменно-жидкостных систем для производства мелкодисперсных порошков металлов и получения наночастиц, нанесения функциональных покрытий на изделия, анализа содержания частиц в жидкости, плазмохимических реакторов, стерилизации и очистки твердых тел, воды и воздуха.

Исследовано воздействие электрического разряда с жидким (неметаллическим) катодом на микрорельеф поверхности металлического изделия при его погружении в электролит. Экспериментальные исследования разряда осуществлялись при параметрах напряжения $U = 600 - 900$ В, давления $p = 10^5$ Па, температуры электролита $T = 10-25$ °С, диаметра анода $d_a=5$ мм, удельной электропроводности электролита $\sigma = 0,1 - 0,12$ Ом⁻¹см⁻¹.

При погружении металлического анода в электролит и подачи потенциала на электроды вокруг изделия образуется парогазовая оболочка с микрозарядами которые воздействуя на поверхность изделия. Основной вклад в обработку вносит анодное растворение и эрозионное разрушение поверхности изделия за счет воздействия электрического разряда.

Для получения микрофотографий и измерения элементного состава образцов использовался сканирующий электронный микроскоп «Carl Zeiss Auriga Crossbeam» со встроенным энергодисперсионным спектрометром «Inca X-Max». Во время работы использовалось увеличение в 100 – 5000 крат.

Исходя из анализа микрорельефа поверхности изделия следует, что поверхность до обработки представляет собой регулярно шероховатую структуру с углублениями в виде полос, оставленных от механического воздействия. После электролитно-плазменной обработки поверхность сглаживается, отсутствуют механические полосы деформации. Поверхность приобретает блеск переходящий в полировку.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. Y.P. Raizer, J.E. Allen, V.I. Kisin / Gas Discharge Physics // Berlin: Springer, 1997.
2. К.Н. Каримов, Э.Ф. Вознесенский, Ю.А. Тимошина // Титан – 2022. – Т.75. – №33.
3. Р.Н. Кашапов, Л.Н. Кашапов, Н.Ф. Кашапов // ТВТ – 2021. – Т. 59. – №869.
4. Р.И. Валиев, А.А. Хафизов, Л.Н. Багаутдинова // ТВТ – 2021. – Т. 59. – №634.
5. Э.Е. Сон, Р.Ш. Садриев, А.Ф. Гайсин, // ТВТ – 2014. – Т. 59. – №961.
6. И.И. Галимзянов, А.Ф. Гайсин, И.Т. Фахрутдинова // ТВТ – 2018. – Т. 56. – №306.
7. Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин Ал.Ф. // Прикладная механика и техническая физика – 2022. – Т. 63. – №20.
8. В.С. Желтухин, Ал.Ф. Гайсин, С.Ю. Петряков. // ПЖТФ – 2022. – Т.48. – №24.
9. Ал.Ф. Гайсин, Ф.М. Гайсин, В.С. Желтухин // Физика плазмы – 2022. – Т.48. – №71.
10. А.Ф. Гайсин, А.Х. Гильмутдинов // Физика и химия обработки материалов – 2020. – Т.2. – №28.
11. А.Ф. Гайсин, А.Х. Гильмутдинов, Д.Н. Мирханов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2018. – Т.752. – №69.
12. А.И. Купутдинова, Л.И. Ахмадуллина, А.Ф. Гайсин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева – 2020. – Т.76. – №10.
13. M.F. Akhatov, R.R. Kayumov, R.R. Mardanov // Journal of Physics: Conference Series – 2021. – V.1870. – №012024.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И СИСТЕМЫ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С ПОДВИЖНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS AND CONFIGURATION OF FULL-FACE EROSION MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM

Одинокое В.В., Костюков Д.А., Шубников А.В., Овцын А.А., Хошев А.В., До-
ломанжи А.
Odinokov V.V., Kostyukov D.A., Shubnikov A.V., Ovtsyn A.A., Khoshev A.V.,
Dolomanzhi A.

*АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», Россия,
г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д.10
e-mail: aovtsin@niitm.ru*

Магнетронное распыление для нанесения пленок различных материалов стало необходимым процессом в самых разных областях промышленности. Его преимуществами являются: низкая температура подложки, нанесение качественных пленок с большой скоростью, низкая шероховатость поверхности, а также низкая стоимость полученных пленок [1]. Технология магнетронного нанесения используется при формировании оптических покрытий, для защиты от коррозии в фотовольтаике, но особенное место оно занимает в технологии напыления тонких проводящих пленок в микро- и наноэлектронике [2].

Работа посвящена оптимизации параметров процесса и системы магнетронного нанесения слоев различных металлов с вращающейся магнитной системой. В качестве примера рассматривается равномерность напыления пленки металла. Описываются технические и технологические приемы и методы, использованные для достижения высоких показателей равномерности пленки по толщине. К таким методам относятся: изменение геометрии рабочей камеры магнетрона, вариация конфигурации магнитной системы, регулировка скорости вращения магнитной системы, а также других технологических параметров процесса магнетронного нанесения пленок (мощность, давление и поток рабочего газа).

Исследования проводились на технологическом модуле магнетронного нанесения «Магна ТМ-150» в составе кластерной установки [3]. После процесса равномерность нанесенных покрытий определялась по параметру R_s при помощи четырехзондового метода на установке Signatone QuadPro 2 по 49 точкам. Эти данные позволяют построить двумерную карту распределения сопротивления по поверхности пластины с нанесенной пленкой.

Были получены некоторые оптимальные параметры процесса и системы магнетронного распыления, при которых неравномерность получаемых пленок

была улучшена почти в два раза с $\pm 6,3\%$ до $\pm 3,2\%$. Максимальный результат был достигнут при расстоянии мишень-подложка в 65 мм и скорости вращения магнитной системы в 360 об/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Asgary, S., Vaghri, E., Daemi, M. / Magnetron sputtering technique for analyzing the influence of RF sputtering power on microstructural surface morphology of aluminum thin films deposited on SiO₂/Si substrates // *Appl. Phys. A* – 2021. – V.127. – №752.
2. Rossnagel S M / *Physical vapor deposition Handbook of Semi-conductor Manufacturing Technology* eds R Doering and Y Nishi // Boca Raton, FL: CRC Press –2008. – P. 15-1–15-27.
3. Одинокоев, В. В. Роботизированный комплекс вакуумных установок в виде кластерной системы нанесения пленок методом магнетронного распыления / В. В. Одинокоев, Г. Я. Павлов, А. В. Шубников // *Вакуумная техника и технологии* – 2022. Труды 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 21–23 июня 2022 г./ под ред. Д. К. Кострина и С. А. Марцынюкова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – С. 64-67.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТАНОЛА В БАРБОТАЖНОМ РЕАКТОРЕ

PLASMA CHEMICAL SYNTHESIS OF METHANOL IN A BUBBLE REACTOR

Пушкарев А.И.¹, Рябов А.Ю.², Полисадов С.С.¹
Pushkarev A.I.¹, Ryabov A.Y.², Polisadov S.S.¹

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050*

²*Институт химии нефти СО РАН
Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, 634055
e-mail: aipush@mail.ru*

Представлены результаты моделирования неравновесного радикально-цепного синтеза метанола из метана в барботажном реакторе с металлическим расплавом. Моделирование выполнено по программе Kintecus, кинетическая схема реакций основана на схеме Веденева В.И., которая дополнена реакциями метана и кислорода с радикалами CH_3 и O .

The results of modeling the nonequilibrium radical-chain synthesis of methanol from methane in a bubble reactor with a metal melt are presented. The simulation was carried out according to the Kintecus program, the kinetic scheme of reactions is based on the scheme of Vedenev V.I., which is supplemented by reactions of methane and oxygen with CH_3 and O radicals.

Газофазное окисление углеводородов представляет собой цепной вырожденно-разветвленный процесс [1, 2], скорость которого ограничена термической диссоциацией исходных реагентов и низкой скоростью промежуточных реакций. Для инициирования цепного процесса перспективно использовать плазмохимические реакции [3]. В газовом разряде формируются дополнительные радикалы, которые иницируют неравновесный радикально-цепной процесс. Такой процесс будет проходить с гораздо большей скоростью, так как воздействие плазмы облегчает наиболее медленную стадию цепного процесса - термическое иницирование реакции.

В нашей работе представлены результаты моделирования неравновесного радикально-цепного синтеза метанола из метана в барботажном реакторе с металлическим расплавом. Моделирование выполнено по программе Kintecus [4] с использованием констант скорости реакций из базы данных NIST [5]. Кинетическая схема синтеза метанола основана на схеме Веденева В.И. [2, 6], которая дополнена реакциями метана и кислорода с радикалами CH_3 и O (см. таблицу). Моделирование выполнено для смеси метана и кислорода (в соотношении 10:1 об.) при объемной концентрации радикалов 0.1%, давлении 2-50 атм. и начальной температуре 600-1000 К.

Моделирование плазмохимического синтеза метанола показало, что дополнительные радикалы CH_3 и O значительно меняют схему цепного процесса и снижают вклад медленных реакций. Неравновесная объемная концентрация

радикалов, не превышающая 0.1 %, увеличивает скорость реакций в 5-10 раз и значительно повышает степень конверсии метана. Энергозатраты на плазмохимический синтез радикалов не превышали 20 Вт на 1 м³ смеси метана и кислорода.

Таблица 1 Константы скорости основных реакций с участием радикалов CH₃ и O

	Реакция	A, L/(mole·s)	n	E _a , kkal/mole
1	CH ₄ + O → CH ₃ + OH	2.1·10 ¹⁰	0	9.05
2	CH ₃ + CH ₃ → C ₂ H ₆	2·10 ¹⁰	-1.11	0.59
3	C ₂ H ₆ → C ₂ H ₅ + H	8.8·10 ¹⁰	0.10	9.25
4	CH ₄ + OH → CH ₃ + H ₂ O	2·10 ¹⁰	0	5
5	CH ₄ + H → CH ₃ + H ₂	1.5·10 ¹¹	0	11.9
6	CH ₃ + O → CH ₂ O + H	8.4·10 ¹⁰	0	0
7	CH ₃ + OH → CH ₃ OH	1.0·10 ¹¹	0	0
8	H + O ₂ → OH + O	1.8·10 ¹¹	0	16.8
9	H + O ₂ → HO ₂	1.8·10 ¹¹	0	4.5
10	OH + O ₂ → HO ₂ +O	2.2·10 ¹⁰	0	52.6
11	CH ₃ + O ₂ → CH ₃ O ₂	7.2·10 ⁸	1.2	0

Получено, что интенсивный отвод тепла при протекании газофазных экзотермических реакций в микропузырьках барботажного реактора с металлическим расплавом предотвращает реакции глубокого окисления и увеличение температуры, что обеспечивает значительное повышение селективности синтеза метанола.

Использование двух новых факторов (интенсивный отвод тепловой энергии из зоны экзотермических реакций и неравновесные радикально-цепные реакции) значительно расширяет возможности оптимизации процесса синтеза метанола из метана с целью увеличения степени конверсии метана и селективности выхода метанола.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Я. Штерн / Механизм окисления углеводородов в газовой фазе // М.: Изд-во АН СССР, 1960.
2. V. Arutyunov / Direct methane to methanol. Foundations and Prospects of the Process // Elsevier. 2014.
3. А.И. Пушкарев, Ю.Н. Новоселов, Г.Е. Ремнев. Цепные процессы в низкотемпературной плазме. Новосибирск: Наука, 2006.
4. Ianni James C., Kintecus – URL: www.kintecus.com (дата обращения 23.04.2023).
5. URL: <https://kinetics.nist.gov/kinetics/index.jsp> (дата обращения 23.04.2023).
6. В.И. Веденеев, М.Я. Гольденберг, Н.И. Горбань, М.А. Тейтельбойм // Кинетика и катализ – 1988. – Т. 29. – С. 7–14.

РАЗРЯДЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ НЕПРЕРЫВНЫМ МИЛЛИМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

ATMOSPHERIC PRESSURE DISCHARGES SUSTAINED BY CONTINUOUS MILLIMETER-WAVE

Синцов С.В., Водопьянов А.В., Масфельд Д.А., Преображенский Е.И.,
Чекмарев Н.В.

Sintsov S.V., Vodopyanov A.V., Masfeld D.A., Preobrazhensky E.I.,
Chekmarev N.V.

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46.
e-mail: sins@ipfran.ru*

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования двух типов неравновесных микроволновых разрядов, поддерживаемых в потоке газа при атмосферном давлении непрерывным миллиметровым излучением с частотами 24 и 263 ГГц. Обсуждаются особенности механизмов, ответственных за формирование существенно неравновесного распределения температурных характеристик в обоих типах разрядов.

This paper presents the results of an experimental study of two types of nonequilibrium microwave discharges maintained in a gas flow at atmospheric pressure by continuous millimeter radiation with a frequency of 24 and 263 GHz. The features of the mechanisms responsible for the formation of a substantially nonequilibrium distribution of temperature characteristics in both types of discharges are discussed.

Интерес к исследованиям возможности создания неравновесных разрядов при высоких, близких к атмосферному, давлениях газа обусловлен в первую очередь перспективами его применения в задачах неравновесной плазмохимии [1-3]. На сегодняшний день одним из перспективных способов создания плазменных сред с существенно неравновесным распределением температурных характеристик являются микроволновые разряды [4-7]. Использование мощного электромагнитного излучения позволяет получать плазму в широком диапазоне давлений с высокой электронной плотностью, величина которой близка к критическому значению для частоты греющего поля, а в некоторых специализированных плазмотронах и превышающую её [5]. Одним из способов увеличения удельного энергозатрата для поддержания неравновесной плазмы при атмосферном давлении является использование источников СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн [6,7].

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования двух типов микроволновых разрядов, поддерживаемых в потоке газа при атмосферном давлении непрерывным миллиметровым излучением. Для создания

первого типа разряда в качестве источника СВЧ излучения был использован технологический гиротрон с частотой излучения 24 ГГц и мощностью до 5 кВт [7], для второго – гиротрон с частотой излучения 263 ГГц и мощностью до 1,1 кВт [6]. Для организации обоих типов разрядов были использованы квазиоптические системы фокусировки миллиметрового излучения. В области перетяжки СВЧ пучка располагалась система газового напуска и локализирующая электродинамическая структура. Возникающий газовый разряд при атмосферном давлении представляет собой плазменный факел, ориентированный вдоль направления потока газа.

Для обоих типов микроволновых разрядов были экспериментально измерены такие основные плазменные параметры, как электронная температура, колебательная и вращательная температуры молекулярных газов, входящих в состав плазмообразующей смеси, температура газа, концентрация электронов. В работе представлены сравнения полученных плазменных характеристик в зависимости от частоты греющего электромагнитного поля. Продемонстрирована существенная неравновесность в распределении температурных характеристик плазмы: в некоторых режимах поддержания разряда электронная температура более чем на порядок превышает поступательную.

Показано, что пространственная структура исследованных газовых разрядов является неоднородной. В факелах, поддерживаемых непрерывным миллиметровым излучением, наблюдаются стационарные нитевидные плазменные каналы, электронная плотность в которых значительно превышает критическую для частоты греющего поля [8]. В работе обсуждается роль таких филамент в формировании неравновесного распределения температурных характеристик. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-72-00073).

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu A Lebedev // J. Phys.: Conf. Ser. – 2010. – V. 257. – №012016.
2. Brodskii Y.Y., Venediktov I.P., Golubev S.V., Zorin V.G., Kossyi I.A. // Technical Physics Letters – 1984. – V. 10. – №77.
3. G M Batanov, I A Kossyi // J Phys. D: Appl. Phys. –2002. – V.35. – P. 2687–2692.
4. Artem'ev K. V., Batanov G. M., Berezhetskaya N. K., Borzosekov V. D., Gritsinin S. I., Davydov, A. M., Shakhatov, V. A. // Plasma Physics Reports – 2020. –V. 46. – P. 311–319.
5. R. Rincón, J. Muñoz, M. Sáez, M.D. Calzada // Spectrochimica Acta Part B –2013. – V. 81. – P. 26–35.
6. Sintsov S. V., Vodopyanov A. V., Viktorov M. E., Morozkin M. V., Glyavin M. Yu. // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves – 2020. – V. 41. – P. 711–727.
7. Mansfeld D., Sintsov S., Chekmarev N., Vodopyanov A. //Journal of CO₂ Utilization. – 2020. – V. 40. – P.191-197.
8. С.В. Синцов, А.В. Водопьянов, А.Н. Степанов, Д.А. Мансфельд, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, А.А. Мурзанев, А.В. Ромашкин // Журнал технической физики – 2023. – Т. 93. – №1.

ПОЛУЧЕНИЕ БИНАРНЫХ ОКСИДОВ ЦИНКА И МЕДИ НА ЦЕОЛИТАХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

PRODUCTION OF BINARY ZINC AND COPPER OXIDES ON ZEOLITES IN LOW-TEMPERATURE PLASMA FOR CATALYTIC APPLICATIONS

Смирнова К.В.¹, Лебедев Ю.А.¹, Евреинов Е.Ю.¹
Smirnova K.V.¹, Lebedev Yu.A.¹, Evreinov E.Yu.¹

¹ *Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Россия, Ленинский пр-т., 29 строение 2, Москва, 119071*

e-mail: smirnovakv1@gmail.com

В работе показана возможность синтеза в низкотемпературной плазме бинарных оксидных соединений на поверхности цеолита. Плазменная обработка цеолитов с нанесенными на них нитратами меди и цинка приводит к образованию соответствующих оксидов в виде наночастиц и нанонитей.

The possibility of synthesizing binary oxide compounds on the surface of a zeolite in a low-temperature plasma was shown. Plasma treatment of zeolites coated with copper and zinc nitrates leads to the formation of the corresponding oxides in the form of nanoballs and nanowires.

В последние годы наблюдается большой исследовательский интерес к синтезу наноструктурированных гидроксидов/оксидов переходных металлов из-за их важных технологических применений. Например, ZnO - широкозонный полупроводник n-типа с большой энергией связи и может использоваться в оптоэлектронике, газоанализаторах и фотогальванике. CuO широко используется в гетерогенном катализе, материалах для газоанализаторов, и полевой эмиссии [1].

Двойные оксидные материалы являются перспективными для их использования в различных областях из-за сочетания свойств каждого из металла входящих в оксид. Цеолиты с нанесенными на них биметаллическими оксидами меди и цинка зарекомендовали себя как катализаторы для конверсии CO₂ в метанол [2], для фотодеградациии красителей (родамин синий, метиленового синего и т.д.) [3-4].

Традиционно двойные оксиды получают с помощью методов золь-гель, гидротермического, соосаждения, осаждение из газовой фазы. Все эти методы подразумевают использование сложного оборудования, большого количества реагентов и этапов образования и очистки [5]. Один из новых, малоизученных и перспективных методов синтеза основан на взаимодействии низкотемпературной плазмы с растворами или расплавами солей переходных металлов.

В данной работе в качестве исходных материалов мы использовали цеолиты марки NAX (Sorbus Group) с предварительно нанесенными на них нитратами цинка и меди. Для нанесения использовали водные раствор $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ и $Cu(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ с концентрацией 100 ммол/л. В исследования использовали три соотношения исходных нитратов $Zn(NO_3)_2$ и $Cu(NO_3)_2$ первое 100% $Cu(NO_3)_2$; 50% $Cu(NO_3)_2$ и 50% $Zn(NO_3)_2$; последнее 100 % $Zn(NO_3)_2$. 20 г цеолитов помещали в 20 мл раствора и сушили при температуре 50 °С 24 часа на воздухе. Полученные высушенные цеолиты обрабатывали низкотемпературной газоразрядной плазмой в течении 10 минут. Разряд зажигался между титановым остриём и стальной плоскостью, с током разряда 50 мА и напряжением 8,02 кВ.

Обработанные цеолиты с нанесенными на них нитратами исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопией и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (Tescan VEGA3, Чехия с приставкой для элементного анализа Aztec EDS, Oxford Instruments Ltd., Англия). После 10 минут обработки низкотемпературной газоразрядной плазмой мы получаем оксиды соответствующих металлов. В случае 100% $Cu(NO_3)_2$ получаем 100% CuO; 100 % $Zn(NO_3)_2$ получаем 100 % ZnO, а в случае 50% $Cu(NO_3)_2$ и 50% $Zn(NO_3)_2$ получаем 70% CuO и 30% ZnO. Плазменная обработка приводит к тому, что на поверхности образуются ноноволоски с нанопариками. Поверхность неоднородная и хорошо развитая, что делает ее перспективной для использования в качестве катализаторов. Дальнейшие исследования позволят лучше изучить структуру и свойства поверхности. Исследование каталитической активности покажет эффективность использования данных веществ для конверсии CO_2 в метанол.

Работа выполнена при поддержке в рамках Государственным заданием ИНХС РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Li, B. Tan, Y. Wu // Chem. Mater. – 2008. – V. 20. – P. 567–576.
2. M. Quezada Feliz, I. Polaert, A. Ledoux, C. Fernandez, F. Azzolina-Jury // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2021. – V. 54. – № 334003.
3. S.P. Mardikar, S. Kulkarni, P.V. // Adhyapak Journal of Environmental Chemical Engineering – 2018.
4. J. Lin, C. Yao, L. Wu, K. Jiang, Z. Hu, L. Li, N. Xu, J. Sun, J. Wu // J. Phys. Chem. C – 2021. – V.125. – P. 9119–9128.
5. B. Bems, M. Schur, A. Dassenoy, H. Junkes, D. Herei, R.Schlögl // Chem. Eur. J. – 2003. – V. 9. – P. 2039-2052.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ДАТЧИКА ИНВЕРСНО-МАГНЕТРОННОГО ВАКУУММЕТРА

RESEARCH OF THE LAYOUT OF THE INVERSE MAGNETRON SENSOR

Сумаренко А.А., Рязанов В.А., Манегин Д.С., Туманов Н.А.
Sumarenko A.A., Riazanov V.A., Manegin D.S., Tumanov N.A.

*МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5
e-mail: sumarenko@bmstu.ru*

В работе исследовались макет датчика инверсно-магнетронного вакуумметра и конструкция макета. Были проведены параметрические исследования макета датчика при различных давлениях и получены вольт-амперные характеристики газового разряда в макете. Показана несостоятельность некоторых решений, таких как, использование изоляторов из фторопласта и тонкого вольфрамового анода.

The paper investigated the layout of the inverse magnetron vacuum gauge sensor and the design of the layout. Parametric studies of the sensor layout were carried out at various pressures and volt-ampere characteristics of the gas discharge in the layout were obtained. The inconsistency of some solutions, such as the use of insulators made of PTFE and a thin tungsten anode, is shown.

Некоторые процессы требуют давления не просто ниже атмосферного, но и относительно глубокого вакуума – 10^{-6} Торр и ниже. Это касается как термоядерных [1] и синхротронных [2] установок, так и технологических процессов [3]. Для получения такого давления необходимо иметь не только соответствующий откачной агрегат, например [4], но и средство измерения давления. Для этого применяют в том числе ионизационные вакуумметры с холодным катодом. Целью работы являлась отработка спроектированного макета датчика инверсно-магнетронного вакуумметра (ИМВ). Для этого были проведены параметрические исследования и получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) газового разряда датчика ИМВ.

В работе использовались несколько версий макетов датчиков ИМВ. Версии макетов датчиков отличались типом изоляции, материалами и размерами анода и индукцией магнитного поля. В качестве анода использовались вольфрамовый и стальной стержни диаметром 0,8 мм и 2,5 мм соответственно. В качестве материалов изоляторов использовались фторопласт-4 и бериллиевая керамика, а также ABS-пластик. Корпус датчика был изготовлен из 12Х18Н10Т и имел монтажный фланец KF-40. Магнитная система устанавливалась в корпус и находилась под потенциалом корпуса. В качестве источника магнитного поля использовались неодимовые магниты N38. В разных версиях макетов использовались разные конфигурации магнитной системы. Индукция магнитного поля на оси

датчика лежала в диапазоне от 0,1 Тл до 0,19 Тл. В таком диапазоне обеспечивается практически линейная зависимость силы тока разряда от давления [5].

Испытания проводились на стенде с цилиндрической горизонтальной вакуумной камерой. Откачка производилась форвакуумным насосом Trivac D 65 В и турбомолекулярным насосом TURBOVAC MAG W 3200 СТ. Давление измерялось широкодиапазонным вакуумметром MKS DualMag 972В и баротроном MKS 600 Seria Baratron. Остаточное давление составляло не более $5 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Для подачи напряжения использовался источник питания ИВЭ-345. Подключение производилось через балластное сопротивление 6,85 кОм. В цепи анода стоял стрелочный амперметр М253 для измерения разрядного тока. Параллельно источнику питания был подключен конденсатор ёмкостью 3 нФ.

В результате были получены ВАХ датчика ИМВ (рисунок 1). Полученные ВАХ качественно повторяют аналогичные, представленные в работах [6], [7].

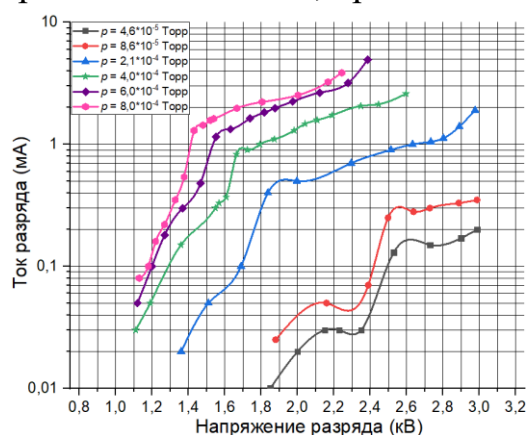


Рис. 1. ВАХ датчика ИМВ при различных рабочих давлениях на воздухе

В большом диапазоне напряжений наблюдалась пропорциональная зависимость силы тока от напряжений. Однако с повышением напряжения ток выходил в зону насыщения и уже не зависел от напряжения. Это может быть объяснено тем, что установилось термодинамическое равновесие между ионами, которые образовались в разряде, и ионами, прилетевшими на катод.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Д. А. Карпов, А. Г. Иванов, А. И. Лившиц, А. Н. Драничников // Физика плазмы – 2021. – Т. 12. – № 1152.
- 2 Михайлин В.В./ Синхротронное излучение в спектроскопии.// Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 2007.
- 3 Д.В. Духопельников, Д.В. Кириллов, К.В. Воробьёв, С.Г. Ивахненко, В.С. Булычёв, В.А. Рязанов, О.И. Афонин // Вакуумная техника, материалы и технология – 2017. –№ 162.
- 4 E.V. Svichkar, N.K. Nikulin, V.S. Klyucharov, K.E. Demikhov // AIP Conference proceeding – 2017. –V. 1. – №0200058.
- 5 Розанов Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов. Высшая школа, Москва, 2007.
- 6 Н. Мао, Y. Wang // Journal of Vacuum Science & Technology – 2007. – V. 25. – №281.
- 7 Розанов Л. Н. // Вакуумная техника и технология – 2017. –Т. 2. – №5.1.

ВЛИЯНИЕ АЛИТИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Ахмадеев Ю.Х., Иванов Ю.Ф., Лопатин И.В., Петрикова Е.А.,
Гончаренко И.М., Григорьев С.В., Москвин П.В.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томская обл.,
г. Томск, пр-кт Академический, 2/3
e-mail: ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru*

Проведена серия экспериментов по электронно-ионно-плазменному алитированию поверхностного слоя образцов сталей ст.20 и 40Х с последующим азотированием. Алитирование осуществляли двумя методами: 1) вакуумно-дуговым насыщением поверхностного слоя из газометаллической плазмы; 2) насыщением из расплава путем электронно-пучкового воздействия на предварительно сформированную пленку алюминия.

Комплексная двухступенчатая обработка стали на установке «ТРИО» (Рис. 1), сочетающая алитирование и последующее азотирование приводит к формированию многофазного поверхностного слоя, упрочненного на первой стадии наноразмерными частицами алюминидов железа и хрома, на второй стадии дополнительно к алюминидам частицами нитридов алюминия, железа и хрома.

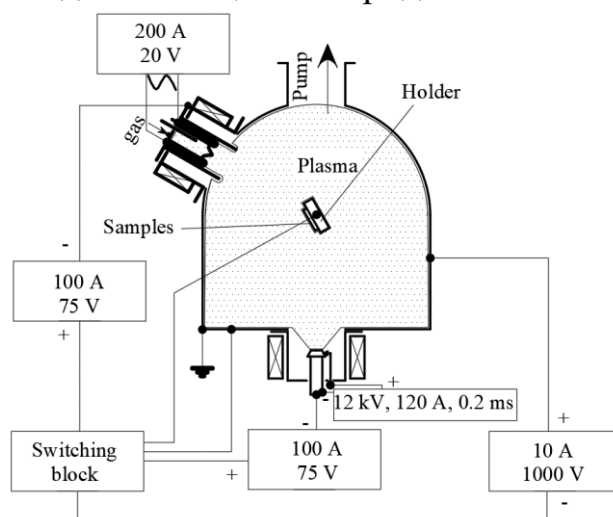


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по вакуумно-дуговому алитированию поверхности образцов с последующим азотированием в едином вакуумном цикле на установке «ТРИО»

В совокупности эти преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя стали приводят к повышению микротвердости до 3-4 раз, в зависимости от марки стали, и износостойкости до 3 раз для стали 40 Х и до 10 раз для стали Ст 20 в зависимости от используемого режима.

Комплексная электронно-ионно-плазменной обработка поверхности сталей 40Х и Ст.20, включающая три последовательных этапа: нанесения алюминиевого покрытия, электронно-пучковое воздействие и азотирование на установке «КОМПЛЕКС» (Рис. 2) приводит к увеличению микротвердости поверхности до рекордных 23 ГПа и 22,6 ГПа соответственно.

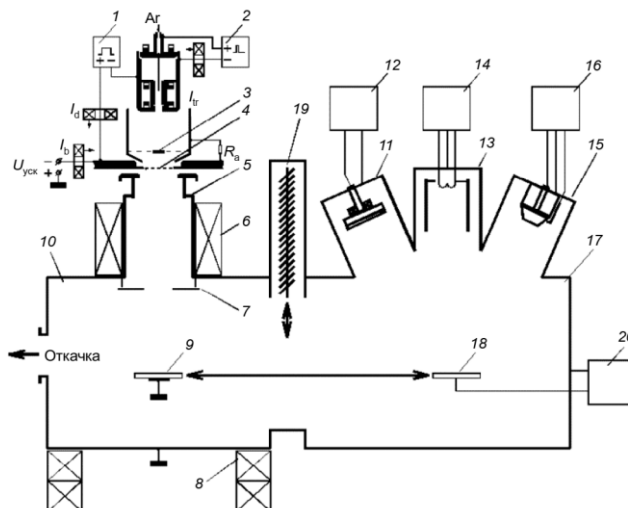


Рис. 2. Схема проведения экспериментов по электронно-пучковому алитированию поверхности образцов с последующим азотированием в едином вакуумном цикле на установке «КОМПЛЕКС»

Протяженность упрочненного слоя после комплексной обработки достигает 250 мкм для стали 40Х и 30 мкм Ст.20. (Рис. 3).

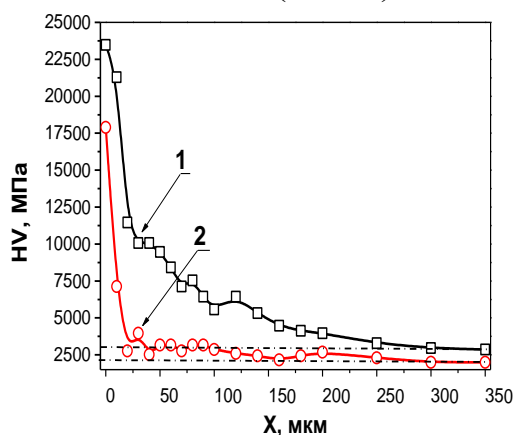


Рис. 3. Распределение микротвердости от поверхности образца из стали 40Х (1) и Ст.20 (2) после нанесения пленки Al толщиной 1 мкм, последующей обработки импульсным электронным пучком «100мкс» и азотирования

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0006 и при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» (научный проект № 20-21-00111).

ВЛИЯНИЕ МАЛОЙ ДОБАВКИ ПРОПАН-БУТАНА НА ГАФНИЕВЫЙ КАТОД ГЕНЕРАТОРА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АЗОТА И ВОЗДУХА

EFFECT OF SMALL PROPANE-BUTANE ADDITIVE ON HAFNIUM CATHODE OF NITROGEN AND AIR LOW-TEMPERATURE PLASMA GENERATOR

Гаджиев М.Х., Саргсян М.А., Ильичев М.В., Юсупов Д.И., Тюфтяев А.С.
Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Ilyichev M.V., Yusupov D.I. Tyuftaev A.S.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
e-mail: makhach@mail.ru

При малой добавке пропан-бутана (1%) к плазмообразующему газу (азот, воздух) плазматрона постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода и вихревой стабилизацией разрядной дуги отмечается «восстановительный» эффект катода из гафния. В азотной среде ионы углерода под действием приэлектродного падения потенциала осаждаются на границе раздела между гафнием и корпусом катода из меди со скоростью 0.1 мм/мин. В воздушной среде рост осаждающего материала не был зарегистрирован, также как и его убыль.

With a small addition of propane-butane (1%) to the plasma-forming gas (nitrogen, air) of the DC plasmatron with the expanding channel of the output electrode and the vortex stabilization of the discharge arc, the "reducing" effect of the hafnium cathode is noted. In a nitrogen environment, carbon ions under the action of a near-electrode drop of potential are deposited at the interface between hafnium and the copper cathode housing at a speed of 0.1 mm/min. In the air, the growth of the precipitating material was not recorded, as well as its decline.

В технологиях, где необходимо достичь наибольших значений температур, самыми эффективными и простыми по конструкции являются дуговые генераторы низкотемпературной плазмы (ГНП) постоянного тока [1-5]. При этом в промышленных масштабах имеет большое значение ресурс электродов, в частности, катода. В плазмохимии, где не важна чистота реакций для увеличения скорости протекания реакций в качестве плазмообразующего газа применяется технический азот и воздух. Для работы на воздухе в ГНП используют обычно катод со вставкой из гафния, т.к. у него меньше работа выхода по сравнению с вольфрамом, что дает возможность получить необходимый ток термоэмиссии при более низкой температуре поверхности. Кроме этого, вольфрам в кислородосодержащей среде очень быстро окисляется уже при 600 °С, а скорость испарения окислов вольфрама на несколько порядков превышает скорость испарения вольфрама [4]. Если в качестве плазмообразующего газа использовать нейтральный газ, например, азот, то скорость испарения уменьшается на несколько порядков по сравнению с вакуумом за счет снижения скорости диффузии паров вставки через азот [4], т.е. просматривается значимость рециркуляции атомов материала

вставки катода в снижении скорости эрозии и возможности механизма самовосстановления при использовании соответствующей среды. Такой средой может быть малая добавка пропан-бутана в плазмообразующий газ, где возможно из газовой фазы под действием приэлектродного падения потенциала на поверхность катода будет происходить осаждение ионов углерода. В связи с этим целью работы было исследование влияния добавки пропан-бутана к плазмообразующему газу техническому азоту и воздуху на состояние катодов со вставкой из гафния.

Для исследования возможности самовосстановления катода со вставкой гафния в плазме азота или воздуха с малой добавкой (1%) пропан-бутана использовался ГНП с вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом выходного электрода, где изолированное сопло выполнено со смотровыми окнами для скоростной видеорегистрации кончика катода [6-8].

При добавлении пропан-бутана одновременно протекают два процесса – унос материала электрода из центра катодного пятна и прирост материала по кромке катодного пятна в виде округлой чашечки. В азотной среде осаждающий элемент растет со скоростью ~ 0.1 мм/мин. В воздушной среде рост осаждающего материала не был зарегистрирован, так же как и его убыль, что говорит о равенстве скорости испарения и осаждения атомов. Исследование распределения элементов по глубине катода при работе в азоте с добавлением пропан-бутана по данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа показало, что медь около гафниевой вставки частично окислена и покрыта слоем гафния толщиной порядка $400 \div 500$ мкм. Слой гафния также частично окислен. Поверх гафния нанесен углеродный слой без признаков окисления толщиной порядка $1.5 \div 1.7$ мм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-79-30062.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 298 с
2. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 264 с.
3. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. 296 с.
4. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. 712 с.
5. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. 2-е изд. испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 264с.
6. Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Tyuftyaev A.S. // EPL-EUROPHYS LETT. – 2015. – V. 111. – I. 2. – №25001.
7. Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V. and Tyuftyaev A.S. // EPL-EUROPHYS LETT. – 2016. – V. 115. – №35002.
8. Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh., Tereshonok D.V. and Tyuftyaev A.S. // Physics of Plasmas – 2018. – V. 25. – №073511.

ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНОЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

PLASMA-LIQUID PRODUCTION METHOD METAL POWDER

Шакиров А.М.¹, Гайсин Ал.Ф.¹, Каюмов Р.Р.¹,
Купутдинова А.И.¹, Мирханов Д.Н.¹
Shakirov A.M.¹, Gaisin Al.F.¹, Kayumov R.R.¹,
Kuputdinova A.I.¹, Mirkhanov D.N.¹

¹ФРБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева -КАИ», Россия, 420111 г. Казань,
ул. К. Маркса, 10
e-mail: almaz87@mail.ru

Исследован процесс плазменно-жидкостной переработки изделий аддитивного производства в металлический порошок для его повторного применения в 3D печати. Методом сканирующей электронной микроскопии получены микрофотографии порошка, определены элементный и гранулометрический состав получаемых порошков.

The process of plasma-liquid processing of additive manufacturing products into metal powder for its reuse in 3D printing studied. Micrographs of the powder obtained by scanning electron microscopy, and the elemental and granulometric composition of the resulting powders were determined.

Электрические разряды, зажигаемые между двумя твердыми электродами, исследуется на протяжении длительное время. Как известно, если между двумя электродами, помещенными в газ, прикладывается достаточно большая разность потенциалов, последний распадается на положительные ионы и электроны, вызывая газовый разряд [1]. Данные типы разрядов нашли широкое применение в различных отраслях промышленного производства, в том числе для обработки металлов [2], накачки лазеров, зажигания рабочей смеси в двигателях и др.

Плазменно-жидкостные системы представляют собой быстро развивающуюся междисциплинарную область науки, включающую в себя науку о плазме, гидрогазодинамике, тепломассопереносе, многофазной химии и фотолизе [3 - 6]. В данных системах один или оба электрода являются жидкостью. В качестве жидкости, как правило, применяются растворы солей различных концентраций в технической, дистиллированной или очищенной водопроводной воде [7 – 10]. В настоящее время плазменно-жидкостные системы привлекают все большее внимание специалистов благодаря их высокому потенциалу в области полировки поверхности [11-13], стерилизации, биомедицины и пищевой промышленности.

Одним из перспективных направлений применения плазменно-жидкостных

систем является получение металлических порошков путем переработки готовые изделий, изготовленных с применением технологии селективного лазерного плавления.

Зажигание разряда осуществлялось контактным методом металлического анода с поверхностью электролитического катода. Вокруг металлического анода образуется парогазовая смесь в которой происходит пробой с горением разряда. Горение разряда сопровождается возмущением поверхности электролита, кипением, выделением конвективных паровоздушных потоков и акустическими хлопками.

Для стабилизации разряда металлический анод поднимался над поверхностью электролита с помощью автоматического манипулятора. Разряд формируется в виде сплошного плазменного столба вершина которого опирается на поверхность металлического анода, а основание на поверхность электролитического катода. Процесс горения разряда сопровождается активным распылением поверхности металлического анода с образованием частиц порошка, которые попадают в емкость с электролитом и оседают на его днище. После распыления изделия в разряде получаемый порошок собирался и высушивался.

Исходя из анализа порошок состоит из частиц различных фракций. Присутствуют фракции сферической формы и со сложной геометрией поверхности. Частицы могут иметь размеры от долей микрометра до десятых долей миллиметра. Сферические фракции порошка по своей морфологии соответствует исходному порошку, из которого изготовлено распыляемое изделие.

Исследование выполнено за счет гранта российского научного фонда № 22-29-00021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y.P. Raizer, J.E. Allen, V.I. Kisin / Gas Discharge Physics // Berlin: Springer, 1997.
2. К.Н. Каримов, Э.Ф. Вознесенский, Ю.А. Тимошина // Титан – 2022. – Т. 75. – №33.
3. Р.Н. Кашапов, Л.Н. Кашапов, Н.Ф. Кашапов // ТВТ – 2021. – Т. 59. – № 869.
4. Р.И. Валиев, А.А. Хафизов, Л.Н. Багаутдинова // ТВТ – 2021. – Т.59. – № 634.
5. Э.Е. Сон, Р.Ш. Садриев, А.Ф. Гайсин // ТВТ – 2014. – Т.59. – № 961.
6. И.И. Галимзянов, А.Ф. Гайсин, И.Т. Фахрутдинова // ТВТ – 2018. – Т. 56. – №306.
7. Петряков С.Ю.// Прикладная механика и техническая физика – 2022. – Т. 63. – № 20.
8. В.С. Желтухин, Ал.Ф. Гайсин, С.Ю. Петряков // ПЖТФ – 2022. – Т. 48. – № 24.
9. Ал.Ф. Гайсин, Ф.М. Гайсин, В.С. Желтухин // Физика плазмы – 2022. – Т. 48 – № 71.
10. А.Ф. Гайсин, // Физика и химия обработки материалов – 2020. – Т. 2. – № 28.
11. А.Ф. Гайсин//Металловедение и термическая обработка металлов – 2018. –Т.752.– №69.
12. А.И. Купутдинова, Л.И. Ахмадуллина, А.Ф. Гайсин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева –2020. –Т. 76. – № 10.
13. M.F. Akhatov, R.R. Kayumov, R.R. Mardanov // Journal of Physics: Conference Series –2021. – V. 1870. – P. 012024.

ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

PLASMA PRODUCTION OF TUNGSTEN CARBIDE

Дудник Ю.Д.¹, Кузнецов В.Е.¹, Сафронов А.А.¹, Васильева О.Б.¹, Ширяев В.Н.¹, Субботин Д.И.^{1,2}, Корнеев Д.В.^{1,2}, Павлова Е.А.²
Dudnik Yu.D.¹, Kuznetsov V.E.¹, Safronov A.A.¹, Vasileva O.B.¹, Shiryayev V.N.¹, Subbotin D.I.^{1,2}, Korneev D.V.^{1,2}, Pavlova E.A.²

¹ *ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18*

² *ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26
e-mail: julia_dudnik-s@mail.ru*

В работе рассмотрена экспериментальная установка и процесс плазмохимического синтеза карбида вольфрама. Синтез проведен в плазме водорода и метана в качестве плазмообразующих газов. Расход газовой смеси составил до 0.02 г/с, мощность плазмотрона до 3 кВт. Фазовый состав был определен рентгенофазовым анализом. Выяснено, что при синтезе получен карбид вольфрама WC.

An experimental setup for the plasma-chemical synthesis of tungsten carbide has been developed. The synthesis was carried out by the plasma in a mixture of hydrogen and methane as a plasma gas. The flow rate of the gas mixture was up to 0.02 g/s, the power of the plasma torch was up to 3 kW. The phase composition was determined by X-ray phase analysis. It was found that the tungsten carbide WC phase was obtained.

Вольфрам и его карбиды широко применяются в современной промышленности. Благодаря высокой твердости, коррозионной и износостойкости карбид вольфрама используется при производстве фрез [1], абразивных материалов, резцов, свёрл, долот и т. д. Данное соединение применяют для газотермического напыления [2] и наплавки с целью повышения износостойкости благодаря созданию твердой поверхности. Также карбид вольфрама служит материалом для пулевых и снарядных сердечников, ювелирных изделий и т. д.

Известно множество способов синтеза карбида вольфрама, основанных на восстановлении вольфрама из его оксида с последующей карбидизацией вольфрама. Одним из перспективных способов синтеза карбида вольфрама является его получение, основанное на плазмохимических системах, в которых вещества обрабатываются электродуговым разрядом, что и является целью изучения данной работы.

Разработанная методика получения карбида вольфрама заключается в следующем: измельченный оксид вольфрама WO₃ подается в поток горячего метана

СН₄ нагретого с помощью электрической дуги температура, которой может достигать до 10000 К. При этом брутто-уравнение будет выглядеть следующим образом:



Синтез карбида вольфрама выполнялся на экспериментальной плазмохимической установке [3], состоящей из плазмотрона переменного тока, реакционной водоохлаждаемой камеры, питателя для подачи материала (оксид вольфрама) и системы улавливания готового продукта. Эксперименты проводились в диапазоне мощности плазмотрона от 0.7 кВт до 3 кВт (зависит от состава плазмообразующего газа). Соотношение метана и водорода составило ~ 1:1 по массе. В результате работы был получен порошок в виде мелкодисперсных частиц. Для исследования фазового состава применяли рентгенофазовый анализ с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000.

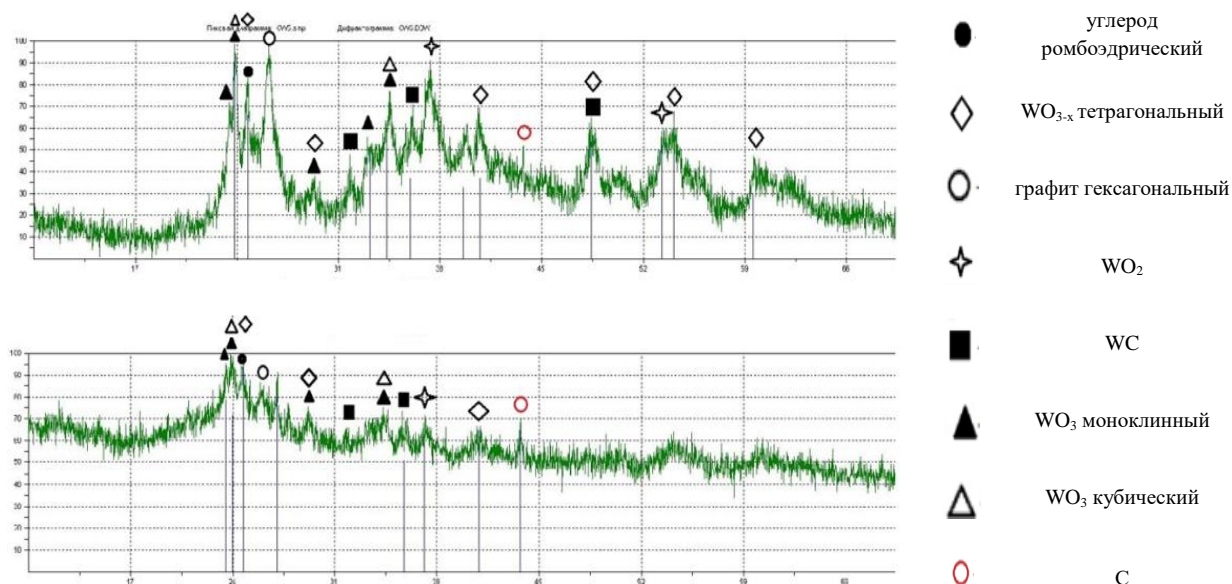


Рисунок 1 – Дифрактограммы полученных образцов

Из рентгенофазового анализа следует, что нагрев порошкообразного оксида вольфрама в плазменной среде принципиально возможен. По содержанию оксида вольфрама и углерода можно судить о не полном протекании реакции. Для более полного превращения оксида вольфрама в карбид вольфрама необходимо увеличить время пребывания реагентов, а также другие условия синтеза (мощность, расход метана).

ЛИТЕРАТУРА

1. D.J. Devan, F. Almaskari, J. Sheikh-Ahmad // Mech Sci Technol – 2022. – V. 36. – № 2499.
2. J. Esteve, G. Zambrano, C. Rincon, E. Martinez // Thin Solid Films – 2009. – V. 373. – №282.
3. В.Е. Кузнецов, Ю.Д. Дудник, А.А. Сафронов, В.Н. Ширяев, О.Б. Васильева // Прикладная физика – 2022. – Т. 2. – №72.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

MATHEMATICAL MODEL OF RF-PLASMA MODIFICATION OF ULTRA-HIGH-MOLECULAR POLYETHYLENE AT INTERMEDIATE PRESSURE

Некрасов И.К.¹; Сагитова Ф.Р.²; Абдуллин И.Ш.³; Желтухин В.С.¹

Nekrasov I.K.¹; Sagitova F.R.²; Abdullin I.Sh.³; Zheltukhin V.S.¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, РФ,
Казань, ул. Кремлевская, 18, 420008

² Казанский национальный исследовательский технологический университет,
РФ, Казань, ул. К.Маркса, 68, 420015

³ООО «Плазма-ВСТ»,
e-mail: vzheltukhin@gmail.com

Представлена молекулярно-динамическая модель модификации поверхности СВМПЭ слабым потоком низкоэнергетических ионов Ar, генерируемым ВЧ-разрядом пониженного давления. Установлено, что ионная бомбардировка инициирует разрыв внутримолекулярных связей и образование радикалов на поверхности СВМПЭ, в результате чего он приобретает гидрофильные свойства.

A molecular-dynamic model of UHMWPE surface modification by a low-intensity flow of low-energy Ar ions generated by an intermediate-pressure RF discharge is considered. It was found that ion bombardment initiates the rupture of intramolecular bonds and the formation of radicals on the UHMWPE surface, it takes on hydrophilic properties as a result.

Рассмотрена молекулярно-динамическая модель модификации поверхности СВМПЭ потоком ионов Ar, генерируемых ВЧ емкостным разрядом в динамическом вакууме. Под динамическим вакуумом понимается средний вакуум с непрерывным продувом газа в диапазоне давлений $p=13.3-133$ Па и расходом газа $G=0.01-0.25$ г/с.

Характеристики плазмы ВЧ-разряда в динамическом вакууме отличаются от свойств разряда без продува газа: степень ионизации $10^{-5}-10^{-4}$, концентрация электронов $n_e=10^{15}-10^{18}$ 1/м³, электронная температура $T_e=1-4$ эВ, температура атомов и ионов $0,03-0,06$ эВ. Образец, помещенный в поток плазмы ВЧ-разряда в динамическом вакууме, подвергается воздействию потока ионов с энергией $70-100$ эВ и плотностью ионного тока $0,1-3$ А/м² [1].

Модель взаимодействия ионов с полимерным материалом описывается системой уравнений классической молекулярной механики

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{1}{m_k} \sum_{k \neq l} F_{kl}, \quad \frac{dr_k}{dt} = v_k, \quad F_{kl} = -\text{grad } U_{kl}, \quad (1)$$

$$v_k(0) = 0, \quad r_k(0) = r_{k0}, \quad k, l = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Здесь v_k – вектор скорости k -ой частицы, r_k – ее радиус-вектор, r_{k0} – координаты начального положения частиц, F_{kl} – сила, действующая на k -ую частицу со стороны l -ой частицы, m_k – масса k -й частицы, t – время, U_{kl} – потенциал взаимодействия частиц с индексами k и l , N – количество атомов в модели.

Рассматривалась полноатомная модель (*all atom model*) с потенциалом $U_{k,l}$ Леннард-Джонса (LJ 12-6) с длиннодействующими кулоновскими силами, AIREBO-M [2], ReaxFF [3].

Модель реализована с помощью универсального программного пакета молекулярно-динамического моделирования LAMMPS [4, 5]. Для решения системы уравнений (1)-(2) использован алгоритм Верле. Модель реализована с помощью пакета LAMMPS [13, 14]. Численное интегрирование системы уравнений (1)-(2) проводилось с шагом по времени $\delta t = 0.1$ фс. Визуализация результатов расчета проводилась в пакете VMD, OVITO [6, 7].

Моделировалась ионная бомбардировка кристаллита СВМПЭ размером $9 \times 7.6 \times 75$ Å с энергиями ионов 10, 50 и 100 эВ. Наиболее приемлемую картину с точки зрения соответствия существующим представлениям о взаимодействии низкоэнергетичных ионов с материалами даёт потенциал AIREBO-M.

Установлено, что при энергии иона до 10 эВ значительных изменений в структуре полиэтилена не происходит. При энергиях 50 эВ и 100 эВ атомы аргона проникают внутрь материала на глубину 1.8 и 2.8 нм, соответственно. Вдоль траектории движения атома происходит разрыв молекулярных цепочек, вследствие чего образуются короткие алкеновые радикалы. С поверхности полиэтилена эмитируются отдельные атомы углерода и водорода, а также короткие молекулы углеводородов.

Результаты экспериментов показали, что активные алкеновые радикалы реагируют с кислородом воздуха при выносе обработанных образцов из вакуумной камеры после ВЧ-плазменной обработки и на поверхности СВМПЭ волокон возникают функциональные карбонильные группы ($-\text{C}=\text{O}$), вследствие чего поверхность СВМПЭ приобретает гидрофильные свойства [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф./ Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения. // Изд-во Казан. ун-та, Казань, 2000.
2. O'Connor, T.C. // J. Chem. Phys. –2015. – V. 142. – №24903
3. Duin van, A.C.T. // J. Phys. Chem. A – 2001. – V. 105. – №9396.
4. Plimpton S. // J. Comp. Phys. – 1995. – V. 117. – №1.
5. LAMMPS: Molecular Dynamics Simulator URL: <https://www.lammps.org/> (23.04.2023).
6. URL: <http://www.ks.uiuc.edu/Research/vmd/> (дата обращения 23.04.2023).
7. URL: <https://www.ovito.org/> (дата обращения 23.04.2023).
8. Kudinov V.V., Krylov I.K., Abdullin I.Sh., Korneeva N.V., Mamonov, Gerov M.V. // Inorganic Materials: Applied Research – 2012. – V. 3. – №257.

МОДИФИКАЦИЯ СТЕКЛОВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЧ-ПЛАЗМЕ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

MODIFICATION OF GLASS FIBER MATERIALS IN RF PLASMAS AT INTERMEDIATE PRESSURES

Ершов И.П.¹, Зенитова Л.А.¹, Абдуллин И.Ш.², Желтухин В.С.¹
Ershov I.P.¹, Zenitova L.A.¹, Abdullin I.Sh.², Zheltukhin V.S.¹

¹*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
РФ, 420015, Казань, ул. К.Маркса, 68*

²*ООО «Плазма-ВСТ», РФ, 420081, Казань, ул. Курская, 27, оф. 1000
e-mail: vzheltukhin@gmail.com*

Исследовано влияние плазмы высокочастотного емкостного (ВЧЕ) и индукционного (ВЧИ) разрядов пониженного давления ($p=13\text{--}133$ Па, расход плазмообразующего газа $G=0\text{--}0,6$ г/с) на стекловолокно и стеклоткань. Показано, что ВЧ-плазменная обработка приводит к избирательному удалению замасливателя: аппреты не деструктируют при обработке и остаются на поверхности стекловолокна, а технологический замасливатель разрушается и при последующей обработке удаляется полностью.

The effect of plasma of RF capacitively or inductively coupled discharges at intermediate pressure ($p=13\text{--}133$ Pa, plasma-forming gas flow rate $G=0\text{--}0.6$ g/s) on glass fiber and glass cloth is studied. It is shown that RF plasma treatment leads to selective removal of the lubricant: coupling agents do not degrade during processing and remain on the surface of the glass fiber, while the technological lubricant is destroyed and completely removed during subsequent processing.

Одним из перспективных направлений практического применения плазмы ВЧ-разрядов с продувом газа в диапазоне давлений 13.3-133 Па (пониженное давление) является очистка различных материалов от загрязнений.

При производстве стеклоткани (СТ) на стекловолокно (СВ) наносятся специальные технические покрытия – аппреты, обеспечивающие улучшение адгезии поверхности стекловолокна с матрицей в полимерных композиционных материалах и стеклопластиках (прямые замасливатели) и защищающие элементарные волокна и нити от истирания, образования микротрещин и разрушения при переработке (технологические, или текстильные, замасливатели). После получения стеклоткани необходимо удалить с поверхности технологический замасливатель, препятствующий адгезии наполнителя к полимерной матрице и оставить аппрет.

Использование ВЧ разряда при пониженном давлении (ВЧР ПД) относится к сухим и экологически чистым процессам, не требующим использования токсичных химических реагентов, поэтому исследование возможностей применения данного метода для очистки СТ и СВ от замасливателя является актуальной задачей.

В результате экспериментальных исследований установлено, что физико-механические характеристики композиционного материала, изготовленного из полиамида с наполнителем из СВ, модифицированного плазмой ВЧ-разряда пониженного давления, увеличиваются на 20% по сравнению с композиционным материалом с наполнителем из необработанного СВ.

В результате обработки стекловолоконных материалов потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых в плазме индукционного и емкостного ВЧР ПД, увеличиваются капиллярность и смачиваемость поверхности СВ и СТ с одновременным повышением прочностных характеристик.

Показано, что обработка СВ в ВЧР ПД с продувом газа приводит к более тесному сплетению пучков, вследствие чего увеличивается удельная площадь поверхности контакта СВ с матрицей в композиционном материале. В результате увеличивается сила адгезионного взаимодействия с матрицей и улучшаются физико-механические свойства СВ. Наилучшие значения адгезионной прочности физико-механических свойств достигаются при обработке СВ в индукционном ВЧР ПД в среде аргона или воздуха, а СТ – в плазме емкостного ВЧР ПД в смеси газов аргон и воздух в соотношении 7:3.

Установлено, что при плазменной обработке СВ в индукционном ВЧР ПД модификации подвергается вся поверхность СВ, включая торцевые части, на которых отсутствует аппрет, что является одной из причин увеличения адгезионной прочности наполнителя к матрице в композиционном материале. При ВЧ-плазменной обработке СТ адгезионная способность улучшается за счёт объемной активации СТ. В результате увеличивается прочность соединения композиционной трубчатой мембраны на основе СТ.

Разработаны физическая и математическая модели модификации стекловолоконных материалов в плазме ВЧР ПД с продувом газа. Для оценки плазменного воздействия на технологический замасливатель выполнено моделирование методом Монте-Карло низкоэнергетической (50–100 эВ) ионной бомбардировки поверхности СВ и СТ. В результате установлено, что плазменная обработка приводит к изменению фракционного состава замасливателя с образованием газообразных и легко-кипящих фракций. Удаление этих фракций приводит к изменению молекулярно-массового распределения компонент замасливателя.

Сопоставление результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований показывает, что при плазменной обработке стеклоткани в среде аргона ионная бомбардировка, как фактор физического воздействия плазмы, играет основную роль, химическое воздействие плазмы имеет существенно меньшее значение. Основными факторами воздействия ВЧИР- и ВЧЕР-ПД на слой замасливателя на поверхности СВ материалов является ионная бомбардировка и рекомбинация ионов. В результате уменьшается толщина прямого замасливателя и удаляется технологический замасливатель.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF RADIO FREQUENCY PLASMA TECHNOLOGIES

Зверев С.Г., Иванов Д.В., Грачев С.Ю.
Zverev S.G., Ivanov D.V., Grachev S.Yu.

*ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
e-mail: s.zverev@spbstu.ru*

Перечислены существующие высокочастотные плазменные технологии. Детально рассмотрена технология очистки и сфероидизации мелкодисперсных порошков. Описаны основные этапы разработки плазменной технологии. Приведены примеры.

The existing radio frequency plasma technologies are listed. The technology of purification and spheroidization of fine powders is considered in detail. The main stages of the development of plasma technology are described. Examples are given.

Научная школа высокочастотной электротермии, основанная в Ленинградском политехническом институте А.В. Донским в 1930-е годы, и продолженная С.В. Дресвиным, сохранилась, и в настоящее время на базе Высшей школы электроэнергетических процессов (ВШЭС) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) продолжают исследования высокочастотных индукционных (ВЧИ) плазмотронов и высокочастотных плазменных технологий [1–6].

В настоящее время ВЧИ плазмотроны применяются для таких технологий, как: спектральный анализ; очистка и сфероидизация мелкодисперсных порошков; обработка поверхностей; получение нанопорошков; плазмохимические технологии. Главное направление исследований в ВШЭС СПбПУ – очистка и сфероидизация мелкодисперсных порошков.

Полученные в результате дробления и помола по существующим технологиям порошки имеют много загрязнений и дефектов. При подаче таких материалов в плазменную струю под действием высокой температуры частички порошка, имеющие первоначально неправильную форму, расплавляются и под действием сил поверхностного натяжения приобретают сферическую форму (см. рис. 1). При последующем охлаждении приобретаемая частичками сферическая форма фиксируется. Кроме того, в обработанном порошке снижается содержание легкоплавких примесей, уменьшается удельная поверхность, увеличивается текучесть.

На первом шаге разработки плазменной технологии проводится математическое моделирование. Подробно разработанные модели описаны в работах [7, 8]. В результате моделирования определяются распределенные параметры плазмы (температура, скорость и др.) в расчетной области (внутри плазмотрона и в области плазменной струи), траектории движения мелкодисперсного порошка (см. рис. 2), его скорость и температура, а также интегральные параметры плазмы (мощность в плазме, мощность потерь в стенку плазмотрона, мощность плазменной струи, среднемассовая энтальпия, среднемассовая температура и др.). В результате приближенно определяются режимы работы плазмотрона и питателя порошка.

Далее выполняется экспериментальная проверка полученных режимов работы, коррекция и адаптация математической модели (при необходимости).

Отработаны технологии обработки мелкодисперсных порошков (со средним диаметром 100-300 мкм) тугоплавких оксидов (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 и др.) в воздушной плазме. Возможна также обработка металлических порошков в плазменной струе инертных газов.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).



Рис. 1. Порошок SiO_2 после обработки (фото с увеличением)

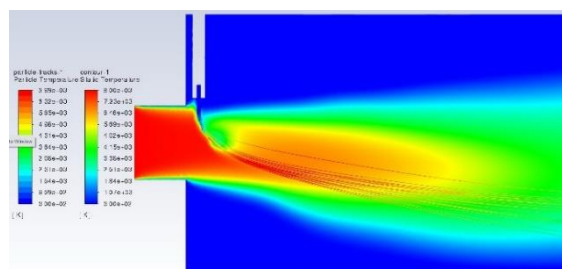


Рис. 2. 3D моделирование обработки мелкодисперсного порошка в плазменной струе

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика и техника низкотемпературной плазмы // С.В. Дресвин, А.В. Донской, В.М. Гольдфарб, В.С. Клубникин, под общ. ред. С.В. Дресвина. – Москва: Атомиздат, 1972.
2. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны // С.В. Дресвин, А.А. Бобров, В.М. Лелёвкин и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. (Низкотемпературная плазма; Т. 6).
3. С.В. Дресвин, С.Г. Зверев / Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии. // Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.
4. С.В. Дресвин, С.Г. Зверев. / Теплообмен в плазме. // Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2008.
5. V. Frolov, D. Ivanov, M. Shibaev // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures – 2014. – V. 9. – №1233.
6. В.Я. Фролов, В.Н. Иванов, Д.В. Иванов // Электричество – 2018. – Т.7. – №54.
7. D.V. Ivanov, S.G. Zverev // IEEE Transactions on Plasma Science – 2017. – V. 45. – №3125.
8. D.V. Ivanov, S.G. Zverev // IEEE Transactions on Plasma Science – 2022. – V. 50. – №1700.

СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ НАНОПОРОШКОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПЛАЗМОТРОНЕ

SYNTHESIS OF OXIDE NANOPOWDERS IN AN ELECTRIC ARC PLASMATRON

Лисенков В.В.^{1,2}, Огородников А.И.², Подкин А.В.¹, Тихонов И.Н.²
Lisenkov V.V.^{1,2}, Ogorodnikov A.I.², Podkin A.V.¹, Tikhonov I.N.²

¹ *Институт электрофизики УрО РАН, Россия, Екатеринбург, ул. Амандсена, 106.*

² *Уральский федеральный университет, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19
e-mail: lisenkov@iep.uran.ru, v.v.lisenkov@urfu.ru*

В работе представлены результаты эксперимента по синтезу наночастиц оксида алюминия и алюмо-магниевого шпинели с помощью электродугового плазматрона. В качестве сырья использовались металлические порошки алюминия и магния, а так же их смесь. Частицы металлических порошков сгорали почти полностью, обеспечивая появление нужных оксидов в газовой фазе, что является необходимым условием для синтеза наночастиц. Исследованы характеристики полученных наночастиц.

The paper presents the results of an experiment on the synthesis of nanoparticles of aluminum oxide and aluminum-magnesium spinel using an electric arc plasmatron. Metal powders of aluminum and magnesium, and their mixture, were used as raw materials. Particles of metal powders burned almost completely, providing the appearance of the necessary oxides in the gas phase, which is a necessary condition for the synthesis of nanoparticles. The characteristics of the obtained nanoparticles are investigated.

Развитие способов получения нанопорошков является актуальной задачей. Среди большого количества различных физических и химических методов плазменные методы занимают свое достойное место. Использование плазматрона является наиболее распространенным способом генерации плазмы. Однако, создание плазмы с температурой кипения тугоплавких оксидов является сложной задачей. Поэтому для их получения используют различные легкоразлагаемые химические соединения, содержащие нужный металл или металл с кислородом. Однако, как исходные реагенты, так и продукты реакции являются небезопасными, а то и вовсе ядовитыми, как например в работе [1], где сообщается о синтезе нанопорошка оксида титана. Хорошей альтернативой в такой ситуации является использование реакции горения металл, которая инициируется и поддерживается плазматроном и так же позволяет получать оксидные молекулы в газовой фазе способные конденсироваться в наночастицы. Этот процесс изучался ранее в работах [2, 3] для оксидов алюминия и магния. Однако нигде не сообщалось о синтезе нанопорошка Al-Mg шпинели таким способом. Между тем, с помощью

лазерного испарения механической смеси порошков Al_2O_3 и MgO нанопорошок Al-Mg шпинели был успешно получен в работах [4, 5].

В данном эксперименте был использован электродуговой плазмотрон собственной разработки с алюминиевыми электродами, с целью избежать загрязнения нанопорошка посторонним материалом. Металлический порошок поступал в плазменную струю, где в результате совместного теплового действия плазмы и реакции окисления образовывались оксиды в газовой фазе, которые затем конденсировались в наночастицы. Далее горячий газ, содержащий наночастицы, проходил через систему охлаждения и подавался на тканевый фильтр аналогичный использованному в [5], где происходило осаждение наночастиц. На рис. 1 представлено фото (а) и функция распределения полученного нанопорошка.

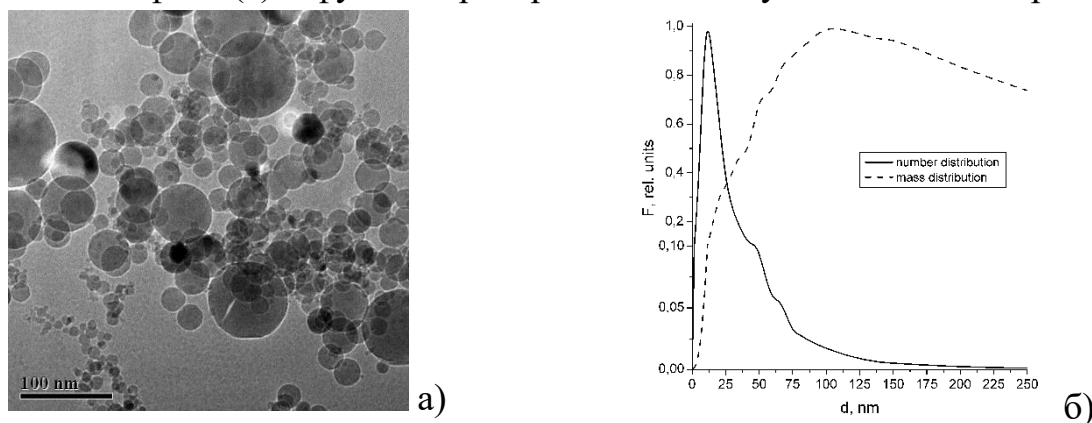


Рис.1. Фото (а) и функция распределения по размерам наночастиц Al_2O_3 (б)

Микроскопия и определение фазового состава наночастиц осуществлялось методами аналогичными [4, 5]. Согласно этим данным все наночастицы Al_2O_3 были в кубической фазе. В нанопорошке, полученном из смеси металлических порошков алюминия и магния содержались Al-Mg шпинель (52%), Al_2O_3 (32%) и MgO (16%) в кубической фазе. Видно, что соотношение свободных оксидов Al и Mg почти такое же, какое нужно при синтезе шпинели из смесевых порошков.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.V. Kartaev, V.P. Lukashov, S.P. Vashenko, S.M. Aulchenko, O.B. Kovalev D.V. Sergachev // *Int. Journal of Chemical Reactor Engineering* – 2014. – V. 12. – № 1.
2. G.P. Vissokov, K.D. Manolova, L.B. Brakalov // *J. Material Science* – 1981. – V. 16. – №1716.
3. Е.И. Гусаченко, Л.Н. Стесик, В.П. Фурсов, В.И. Шевцов // *Физика горения и взрыва*. – 1974. – Т. 10. – № 669.
4. I.V. Beketov, A.I. Medvedev, O.M. Samatov, A.V. Spirina, K.I. Shabanova. *J. Alloys // Compounds* – 2014. –V. 586. – №S472.
5. V.V. Osipov, V.I. Solomonov, V.V. Platonov, E.V. Tikhonov, A.I. Medvedev // *Applied Physics A* – 2019. – V. 125. – №48.

**ИЗУЧЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНЫХ
И ВТОРИЧНЫХ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ
В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ РАЗРЯДЕ**

**RESEARCH OF OXIDATION PROCESSES OF PRIMARY
AND SECONDARY ALIPHATIC ALCOHOLS
IN A HIGH-FREQUENCY ELECTRODELESS DISCHARGE**

Лубин А.А.^{1,2}, Чистолинов А.В.¹, Якушин Р.В.², Перфильева А.В.²
Lubin A.A.^{1,2}, Chistolinov.A.V.¹, Yakushin R.V.², Perfilieva A.V.²

¹ *Объединенный институт высоких температур РАН
Российская Федерация 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2*
² *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
Российская Федерация 125047, Москва, ул. Миусская площадь, 9
e-mail: aalub@bk.ru*

Исследовано окисление алифатических спиртов в водном растворе под действием высокочастотного безэлектродного разряда в газовых пузырьках в тонком капилляре. Исследование проводилось на примере этилового и изопропилового спиртов. Анализ продуктов окисления исследуемых спиртов проводился методами ЯМР спектроскопии и аналитической химии.

The oxidation of aliphatic alcohols in aqueous solution under the action of high-frequency electrodeless discharge in gas bubbles in a thin capillary was studied. The study was carried out on the example of ethyl and isopropyl alcohols. Analysis of the oxidation products of the studied alcohols was carried out by NMR spectroscopy and analytical chemistry.

Одной из задач современной плазмохимии является разработка новых высокоэффективных методов получения важных для промышленности продуктов, основываясь на принципах «зеленой химии» — минимизации избыточного введения химических веществ, безреагентности и ресурсосбережения. Другой важной задачей плазмохимии является очистка газов и жидкостей от органических примесей путём их деструкции под действием активных частиц, образующихся в плазме [1-3]. Публикации в данной области мотивировали нас к исследованию процесса частичной деструкции спиртов под действием плазмы в высокочастотном безэлектродном разряде.

В качестве объектов исследования были взяты этиловый и изопропиловый спирты. В ходе эксперимента была проведена плазмохимическая обработка электропроводящего водного раствора спиртов посредством ёмкостного высокочастотного безэлектродного разряда. Обработка раствора была проведена в потоке в тонком капилляре. Внутрь этого капилляра вместе с потоком раствора вводились пузырьки воздуха, в которых и происходил электрический разряд.

Перед проведением экспериментов по окислению алифатических спиртов, были проведены модельные эксперименты для выявления оптимальных условий осуществления электрического разряда в пузырьках. Модельные реакции проводились на трёх растворах электролитов: 1,5% раствора гидроксида натрия (NaOH), 1,0% раствора азотной кислоты (HNO₃) и 4,0% раствора нитрата натрия (NaNO₃). В ходе модельного эксперимента был определён оптимальный объёмный расход электролита, который составил 7 см³/мин.

Для исследования окисления алифатических спиртов в растворе была разработана лабораторная установка плазмохимической обработки жидкости. Лабораторная установка состояла из реактора с системой капиллярных трубок, к которому было подведено высокое напряжение, перистальтического насоса и источника высокого напряжения. В ходе экспериментов по окислению алифатических спиртов, варьировалась скорость потока и концентрация спирта в водном растворе. Концентрация спирта в растворе составляла от 10 до 40%.

Анализ продуктов реакций был проведён методом ЯМР-спектроскопии. Было показано, что в ходе реакции окисления изопропанола образуются этанол, ацетон, уксусная кислота и муравьиная кислота. В ходе реакции окисления этанола образуются этаналь, уксусная кислота и муравьиная кислота.

Определение кислот с помощью ЯМР-спектроскопии было затруднено из-за наличия широкого пика воды. Поэтому для уточнения полученных результатов были проведены качественные реакции на муравьиную (реакция серебряного зеркала) и уксусную кислоту (реакция с хлоридом железа III). Посредством этих реакций было подтверждено образование муравьиной и уксусной кислот как при реакции окисления изопропилового спирта, так и при реакции окисления этилового спирта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. De Visscher Alex // Plasma Sources Science and Technology – 2007. – V.17.1. – №015004.
2. Titov V. A. // "Plasma-chemical destruction and modification of chitosan in solution." High Energy Chemistry – 2016. – V. 50. – P. 411-415.
3. Penetrante B. M., Schultheis S. E. (ed.)/ Non-thermal plasma techniques for pollution control: part b: electron beam and electrical discharge processing. // Springer Science & Business Media 34 (2013).

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО В ХОДЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

ANALYSIS OF CARBON BLACK OBTAINED DURING ELECTRIC ARC CONVERSION OF NATURAL GAS

Мартьянов Д.Э.¹, Субботин Д.И.¹, Попов С.Д.¹
Martyanov D.E.¹, Subbotin D.I.¹, Popov S.D.¹

¹ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, дом 18.
E-mail: den211200@icloud.com*

В работе приводятся результаты комплекса физико-химических исследований одного из побочных продуктов интенсивно разрабатываемого в настоящее время метода электродуговой конверсии природного газа для получения экологически чистого и дешевого водорода – технического углерода. Приводятся результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС), инфракрасной спектроскопии (ИК), рентгеновской дифрактометрии (РФА) образца.

The paper presents the results of a complex of physico-chemical studies of one of the by-products of the currently intensively developed method of electric arc conversion of natural gas to produce environmentally friendly and cheap hydrogen – carbon black. The results of scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), infrared spectroscopy (IR), and X-ray diffraction analysis (XRD) of the sample are presented.

В настоящее время все большую популярность набирают плазмохимические методы синтеза, основанные на обработке веществ электродуговым разрядом. Одним из наиболее практически важных направлений в данной области является разработка метода синтеза водорода путем плазмохимической конверсии природного газа. В промышленных масштабах получения водорода, как ценного энергоносителя, данный метод выгодно отличается от дорогостоящего электролиза и паровой конверсии природного газа, характеризующейся значительно большим выбросом CO₂. Побочным продуктом плазмохимического синтеза водорода является технический углерод, который и стал объектом исследований в рамках данной работы.

С помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH с приставкой для ЭДС Oxford Instruments были получены данные о морфологии, а также элементный состав образца. На рисунке виден углеродный скотч, поверхность которого покрыта частицами образца. Следует отметить, что анализ углеродного материала на углеродной подложке допустим ввиду того, что поверхность углеродного скотча была полностью покрыта слоем исследуемого образца достаточной толщины.

Данные ЭДС свидетельствуют о присутствии в пробе помимо ожидаемых углерода и кислорода (адсорбированного из воздуха), ряда других элементов таких, как медь и сера общим содержанием менее 1 масс. %. Присутствие атомов

меди в образце объясняется тем, что генератор плазмы, в котором проводился синтез, содержит медные расходные электроды. Появление же серы в образце объясняется наличием в природном газе некоторого количества сероводорода.

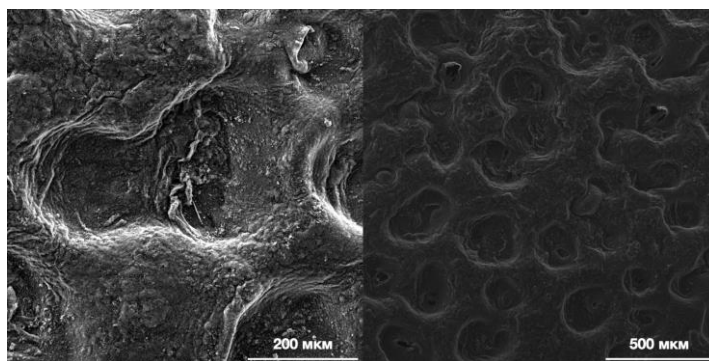


Рис. 1. Микрофотографии образца технического углерода

В рамках качественного анализа на спектрометре Shimadzu IRTracer-100 был получен инфракрасный спектр образца. Данный спектр характеризуется наличием плоскостных (1130 см^{-1} , 1076 см^{-1} , 1030 см^{-1} , 1001 см^{-1}) и внеплоскостных (827 см^{-1} , 773 см^{-1}) колебаний связей С-Н в полиароматических структурах. При 947 см^{-1} наблюдаются маятниковые колебания группы CH_2 . Полосы низкой интенсивности наиболее длинноволновой части спектра также могут быть атрибутированы, как принадлежащие полициклическим ароматическим соединениям. Деформационным колебаниям спиртовых и фенольных ОН групп отвечает полоса при 1350 см^{-1} , а малоинтенсивное поглощение при 1285 см^{-1} свидетельствует о вероятном присутствии в образце ароматических аминов. Также данный спектр характеризуется наличием широкой полосы поглощения в области 3441 см^{-1} , отвечающей скорее всего валентным колебаниям внутри- и межмолекулярных водородных связей гидроксильных групп. Полосы средней интенсивности при 2959 см^{-1} , 2924 см^{-1} относятся к валентным асимметричным колебаниям метильных и метиленовых групп соответственно. Волновое число 2855 см^{-1} также принадлежит валентным симметричным колебаниям связи С-Н метоксигруппы группы в составе ароматического простого эфира. В области 1655 см^{-1} наблюдаются колебания двойных связей $\text{C}=\text{C}$.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Shimadzu XRD 7000. Полученная дифрактограмма характеризуется отсутствием каких-либо пиков, отвечающих ожидаемым структурам типа графита. Наиболее интенсивные пики дифрактограммы относятся к подложке, выполненной из корунда на которой находился образец во время анализа. Из вышеуказанных обстоятельств можно заключить, что изучаемый образец рентгеноаморфен.

Для наиболее полной характеристики образца в дальнейшем планируется проведение рамановской спектроскопии и масс спектрометрии, а также экстракция образца в аппарате Сокслета, с последующим изучением экстракта с помощью ИК-спектроскопии и электронной спектроскопии.

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ УГЛЕВОДОРОДОВ

ELECTRIC ARC METHOD FOR PRODUCING HYDROGEN FROM HYDROCARBONS

Мартьянов Д.Э.¹, Субботин Д.И.¹, Попов С.Д.¹
Martyanov D.E.¹, Subbotin D.I.¹, Popov S.D.¹

¹ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186, г.
Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, дом 18.
E-mail: den211200@icloud.com*

В работе описывается новый метод получения водорода путем разложения углеводородов в электрической дуге. Кратко освещаются основные результаты мирового научного сообщества по данной тематике. Представлена схема плазмохимического пиролиза в плазматорне, разработанном научным коллективом института электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН). Формулируются актуальные и уже решенные проблемы по теме.

The paper describes a new method for producing hydrogen by decomposing hydrocarbons in an electric arc. The main results of the world scientific community on this topic are briefly highlighted. The scheme of plasma chemical pyrolysis in a plasma torch developed by the scientific team of the Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of the Russian Academy of Sciences (IEE RAS) is presented. Actual and already solved problems on the topic are formulated.

Среди плазменных технологий значительную долю занимают плазмохимические методы обработки материалов: газификация твердых органических веществ, риформинг газообразных углеводородов (УВ) [1], уничтожение токсичных веществ [2]. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является разработка плазмохимического метода получения водорода из природного газа.

Природный газ, состоящий в основном из метана, может разлагаться под действием равновесной плазмы. При пропускании метана через плазменную дугу происходит его разложение на водород и технический углерод. В сущности, плазмохимическая диссоциация УВ представляет собой процесс высокотемпературного пиролиза. Данный метод получения водорода выгодно отличается от большинства других отсутствием выбросов углекислого газа. Тем не менее в результате пиролиза возможно образование побочных продуктов, таких как ацетилен и прочих непредельных УВ. Их концентрация может быть снижена за счет поддержания необходимых температур и времен пребывания реагентов [3].

Плазмохимический пиролиз УВ исследовался в работе [4] в высокотемпературном плазменном реакторе, содержащем 3 электрода, подключенных к 3-фазному напряжению. Выход водорода, как утверждают авторы, составил 100% без всякого выделения CO₂. Авторы [5] считают, что плазменный пиролиз потенциально может снизить затраты на производство водорода по меньшей мере на 5%

по сравнению с крупномасштабным производством путем парового риформинга метана с последующим удалением диоксида углерода [5].

Научным коллективом ИЭЭ РАН была создана высоковольтная электродуговая плазмотронная горелка переменного тока, использующая в качестве плазмообразующей среды смесь газообразных УВ с балластным газом, который необходим для удаления углеродного материала из электроразрядной камеры плазмотрона для предотвращения налипания технического углерода к изоляторам плазмотрона, что обеспечивает длительную и безотказную работу плазмотрона. В качестве балластного газа может быть использован аргон, азот, углекислый газ, водяной пар и другие газы. В данной работе использовался аргон по причине его химической инертности. В то же время технологии извлечения аргона из газовых потоков известны и в достаточной степени разработаны.

Суть плазмохимического пиролиза состоит в следующем. На первом этапе в плазменную горелку поступает ток метана или природного газа, подается электрическая энергия. Метан и балластный газ поступают в плазмотрон, в котором происходит реакция с образованием газообразного водорода и твердого технического углерода, который отделяют от смеси газов на следующем шаге. Затем делят и саму смесь газов в специальной установке, получая чистый водород. Балластный газ и некоторое количество непрореагировавшего метана заново отправляют в начало схемы.

Реализация технологии получения водорода методом плазменного пиролиза УВ требует решения проблемы разделения газовых потоков, отделения твердых частиц от газовых потоков и нагрева УВ до высоких температур. Первая и вторая задачи уже решены мировой и российской промышленностью. Задача нагрева УВ осложняется неприменимостью классических методов нагрева газов, например, в трубчатых печах, к УВ газам и парам ввиду того, что при пиролизе поверхность нагревательных элементов покрываются сажей за очень короткий промежуток времени [3]. Тем не менее плазменный нагрев представляется наиболее перспективным методом для пиролиза УВ. Это подтверждается, например, успешно функционирующей установкой, созданной компанией Monolith [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Surov, S.D. Popov, V.E. Popov, D.I. Subbotin, E.O. Serba, V.A. Spodobin, Gh.V. Nakonechny, A.V. Pavlov // *Fuel* – 2015. – V. 48. – № 1007.
2. E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, A.R. Boccaccini // *Journal of Hazardous Materials* – 2009. – V. 161. – №614.
3. S.D. Popov, V.E. Popov, D.I. Subbotin, A.V. Surov, E.O. Serba, A.V. Nikonov, Gh.V. Nakonechny, V.A. Spodobin // *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects* – 2022. – №702.
4. L. Fulcheri, N. Probst, G. Flamant, E. Grivei, X. Bourrat // *Carbon* – 2002. – V. 40. – № 169.
5. I. Dincer, C. Acar // *International Journal of Hydrogen Energy* – 2015. – V. 40. – №11094.
6. Monolith : сайт. – URL: <https://monolith-corp.com> (дата обращения: 25.01.2023)

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ МИКРОСФЕР С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ В СРЕДЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

SYNTHESIS OF MICROSPHERES NANOPARTICLES WITH FERROMAGNETIC PROPERTIES IN A LOW-TEMPERATURE PLASMA ENVIRONMENT

Саубанов Р.Р.¹, Рахимов Р.Р.¹, Исрафилов И.Х.¹
Saubanov R.R.¹, Rakhimov R.R.¹, Israfilov I.Kh.¹

¹ *Набережночелнинский институт (филиал) КФУ, Россия,
423822 РТ, Набережные Челны, пр. Мира, 13
E-mail: rafisih88@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований комбинированного плазменного генератора с проточным реактором, производящим наноразмерные с ферромагнитными свойствами микросферы. Было определено влияние времени охлаждения и нормализации.

The paper presents the results of experimental studies of a combined plasma generator with a flow reactor producing nanosized microspheres with ferromagnetic properties. The effect of cooling time and normalization has been determined.

Синтезирование наноразмерных порошков на сегодняшний день является актуальным и наиболее распространенным методом синтеза наночастиц оксида железа. В связи с этим необходимо решать научную задачу по масштабируемости и устойчивости системы технологических режимов для вывода плазменной технологии синтеза наноразмерных порошков на новый технический уровень. Использование низкотемпературной плазмы в качестве источника нагрева в химической термодинамике является предметом научных экспериментов в области синтеза нанопорошков для различных отраслей промышленности (рис. 1)[1, 2].

В настоящее время большинство публикаций посвящено исследованию разрядов с жидким электролитным катодом и немало научных трудов микроволнового нагрева в системах периодического действия [1-5].

В работе представлены результаты исследования комбинированного плазменного генератора с проточным реактором, производящим наноразмерные с ферромагнитными свойствами микросферы. Определено влияние времени охлаждения и нормализации, что позволило синтезировать наноструктуры с гидродинамическим диаметром ядра порошка в диапазоне от ~ 15 до 250 нм. По сравнению с частицами, полученными безреакторном нагревом, наблюдались аналогичные размеры отдельных ядер, хотя и с меньшими гидродинамическими диаметрами.

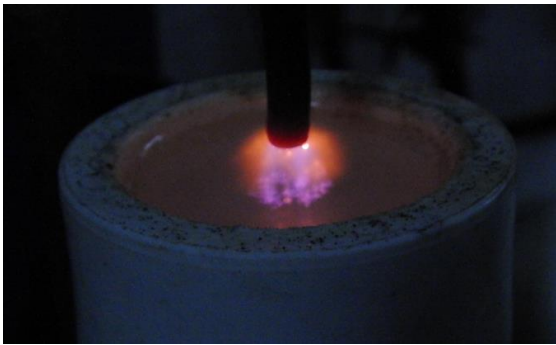


Рис. 1. Фотография разрядной камеры проточными системами реактора и многоканального разряда с жидким электролитным катодом

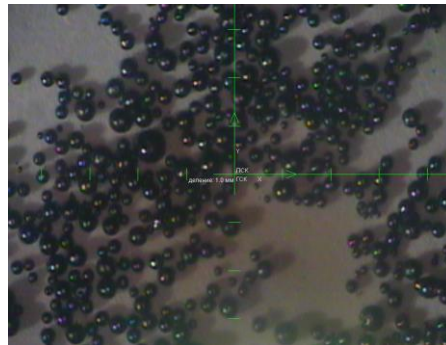


Рис. 2. Фотография наноразмерных микросфер с ферромагнитными свойствами диаметром ядер порошка в диапазоне от ~ 15 до 250 нм до сепарации

Гранулометрический состав наноразмерного порошка был определен методом просеивания пробы через набор сит и в гравитационной концентрационной установке для нано дисперсных материалов. Для анализа формы и размера частиц использовался металлографический микроскоп ММР-4.

Синтезирование многоядерных структур представляет собой многокритериальную модель, особенно в отношении контроля количества и размеров частиц. Гидродинамический диаметр наноструктур микросфер регулировали в пределах от 20 до 70 нм, изменяя время пребывания продукта в проточном реакторе и приложенную мощность установки от плотности тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.Р. Саубанов, В.В. Звездин, И.И. Хайбуллин, Р.Р. Рахимов, Р.Р. Саубанов / Об одном способе синтеза оксидного порошка в неравновесной низкотемпературной плазме с повышением показателей качества процесса // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий – 2015. – Т. 1. – № 6. – С. 243-247.
2. Р.Р. Саубанов, И.И. Хайбуллин, Ф.М. Гайсин, И.Х. Исрафилов, Р.Р. Саубанов / Управление синтезом оксидного порошка в неравновесной низкотемпературной плазме с уменьшением издержек производства материалов из порошковых деталей // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2014. – Т. 1. – № 5. – С. 64-66.
3. Саубанов Р.Р., Хайбуллин И.И., Гайсин Ф.М./ Синтез оксидного порошка в неравновесной низкотемпературной плазме с нетрадиционными электродами // 21 Век. Фундаментальная наука и технологии – Москва, 2013. – С.189-191.
4. Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М. Многоканальный разряд в проводящей жидкости при атмосферном давлении теплофизика высоких температур. 2010. – 135с.
5. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е., Шакиров Ю.И. Объемный разряд в парогазовой среде между твердыми и жидкими электродами/ - М.: Изд-во ВЗПИ, 1990. – 90 с.

НАРАБОТКА ОЗОНА В ДБР В СМЕСИ ВОЗДУХ-МЕТАН

OZONE PRODUCTION IN DBD IN AIR-METHANE MIXTURE

Торбин А.П.¹, Демьянов А.В.², Кочетов И.В.^{2,3}, Михеев П.А.¹
Torbin A.P.¹, Demyanov A.V.², Kochetov I.V.^{2,3}, Mikheyev P.A.¹

¹Самарский филиал ФИАН, Россия, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221, 443011

²ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, 108840

³ФИАН, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, 119991

E-mail: torbin.ap@yandex.ru

В работе создана численная плазмохимическая модель диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в смесях кислорода и воздуха с метаном. Хорошее согласие созданной модели с экспериментальными зависимостями концентраций озона от мощности ДБР получено только при учете структуры микрозарядов. Моделирование показало разный характер возникновения микрозарядов в кислородной и воздушной смеси. Полученные результаты важны для развития существующих моделей ДБР и разработки эффективных систем плазменно-инициированного горения углеводородных топлив.

The numerical plasma-chemical model of a dielectric barrier discharge (DBD) in oxygen-methane and air-methane mixtures was created. Good agreement between the created model and the experimental discharge power dependences of ozone number densities was obtained only when taking into account the structure of microdischarges. The simulation showed different nature of the microdischarges occurrence in the oxygen and air mixtures. The results obtained are important for the development of existing DBD models and the development of systems for plasma-initiated combustion of hydrocarbon fuels.

Плазменное инициирование и поддержание горения целесообразно применять в энергетических установках, использующих обедненные топливно-воздушные смеси (ТВС). Диэлектрический барьерный разряд представляет особый интерес в этой области благодаря относительной простоте технической реализации в различных конфигурациях газовых потоков. Существующие в настоящее время кинетические модели, используемые для описания плазменного инициирования, из-за многообразия учитываемых процессов и неполноты данных по константам и сечениям элементарных процессов обладают недостаточной предсказательной способностью и требуют верифицирования на максимально большом наборе экспериментальных данных.

В качестве примера на рис. 1 представлены типичные измеренные зависимости концентраций озона на выходе ДБР в смеси воздух/СН₄ от мощности разряда и результаты численного моделирования. Нарботка озона осуществлялась в ДБР коаксиального типа, состоящего из кварцевой трубки, внутреннего алюминиевого электрода и внешнего электрода в виде кольца из стальной сетки. Ширина разрядного промежутка составляла 1 мм, а резонансная частота – 70 кГц.

Концентрация озона измерялась по поглощению УФ излучения от светодиода. Расчеты проводились с помощью пакета программ Chemical Workbench (CWB 4.3.26294, www.kintech.ru). Модель включает в себя систему кинетических уравнений для заряженных (электронов, положительных и отрицательных ионов) и нейтральных частиц, а также продуктов их взаимодействия в энергообменных и химических процессах. В модели учитывается более 400 процессов. Микроструктура разряда учитывалась как отношение суммарной площади серии микроразрядов к общей площади разряда. Из анализа полученных экспериментальных данных и результатов моделирования следует, что O_3 в ДБР образуется преимущественно в области поверхностного разряда из-за того, что температура там существенно ниже, чем в filamentах.

Хорошее согласие экспериментальных результатов и моделирования в воздухе и смесях воздух/ CH_4 получено в предположении, что микроразряды ДБР возникают не хаотично в пространстве, а перемещаются вдоль по потоку так, что каждый следующий микроразряд распространялся “по следу” предыдущего. Однако, для корректного описания концентраций озона в кислороде и в смесях O_2/CH_4 распределение микроразрядов должно быть принято стохастическим. В настоящее время не существует объяснения для данного механизма «эффекта памяти» в воздухе и его отсутствия в кислороде. По этой причине толщина области поверхностного разряда l_s в модели является подбираемым параметром, который учитывается при вычислении величины частоты тепловых потерь $\nu_T = 8\lambda/c_p l_s^2$, где c_p – теплоемкость газа, λ – теплопроводность. Подробнее с результатами и описанием модели можно ознакомиться в работе [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р. Torbin, А.В. Demyanov, I.V. Kochetov, P.A. Mikheyev, А.М. Mebel // Plasma Sources Science and Technology – 2022. – V. 31. – №035017.

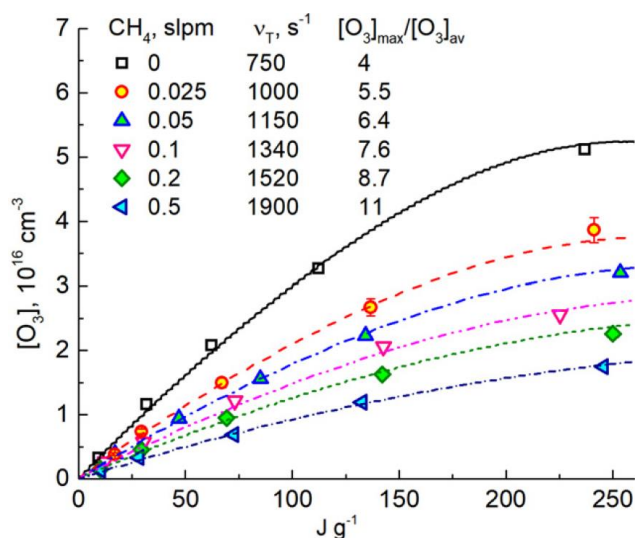


Рис. 1. Сравнение экспериментально полученных зависимостей концентраций O_3 на выходе ДБР в смеси воздух/ CH_4 с моделью (линии) при атмосферном давлении и скорости потока 9 л мин^{-1} (данные из работы [1])

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАЛОГАБАРИТНОГО МАГНИТО-ПЛАЗМЕННОГО
КОМПРЕССОРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

**SPECTRAL STUDY OF COMPACT MAGNETOPLASMA COMPRESSOR
IN ATMOSPHERIC PRESSURE AIR**

Чебыкин Е.О., Володин Л.Ю., Полевой Д.Е., Егошин Д.А., Чувашев С.Н.
Chebykin E.O., Volodin L.Y., Polevoi D.E., Egoshin D.A., Chuvashhev S.N.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, 105005,
2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
E-mail: evgeny.chebykin@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик излучения плазмы, создаваемой магнитоплазменным компрессором эрозионного типа. Генерация плазменного потока осуществляется в воздухе атмосферного давления. Приводится анализ спектральных и динамических характеристик излучения при уровнях запасаемой энергии до 450 Дж.

The paper presents the results of experimental studies of the spectral characteristics of plasma radiation generated by an erosion-type magnetoplasma compressor. Plasma flow generation is carried out in atmospheric pressure air. The analysis of the spectral and dynamic characteristics of radiation at stored energy levels up to 450 J.

Импульсные плазменные струи рассматриваются как перспективный инструмент для инициирования детонации в газовых и конденсированных средах, зажигание протяженных пиротехнических составов [1,2]. К плазменному потоку предъявляются требования по температуре, скорости истечения, составу и спектрально-энергетическим характеристикам излучения.

Магнитоплазменные компрессоры (МПК) рассматриваются как источники вакуумного УФ излучения [3], перспективные двигатели для микроспутников [4], источники высокоскоростных плазменных потоков и ударных волн [1]. В большинстве исследований [5,6] они работают в вакууме и позволяют достигать высоких скоростей и яркостных температур плазмы.

Характеристики плазмы зависят от параметров разрядного контура, плазмообразующего вещества и внешней среды, в которой распространяется плазменный поток [3]. Вкладываемая в разряд энергия затрачивается на испарение и ионизацию рабочего тела, ускорение и излучение. Спектральная диагностика позволяет подобрать параметры установки для формирования плазменного потока с оптимальными характеристиками. В данной работе представлены результаты исследования спектров излучения плазмы МПК в воздухе при уровнях энергий до 450 Дж.

В работе исследовался МПК с $\varnothing 10$ мм (рис. 1). Плазмообразующий материал – фторопласт-4. Питание осуществлялось от конденсатора с $C = 100$ мкФ, заряжаемого до 3 кВ. Разряд имел периодический характер с 3 полуволнами и полупериодом $T_{0.5} \sim 25$ мкс.

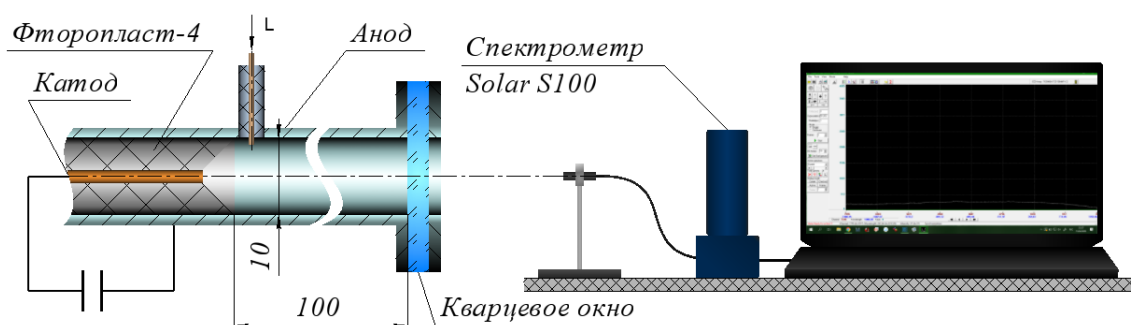


Рис. 1. Схема установки с МПК

Регистрация излучения проводилась через кварцевое окно с использованием спектрометров Solar S100 (200-1100 нм, разрешение $\delta \sim 1$ нм) и Solar ТП (200-380 нм, $\delta \sim 0,2$ нм) и набора узкополосных фотоприемников, работающих в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах. Характерные спектры плазменного потока представлены на рис. 2.

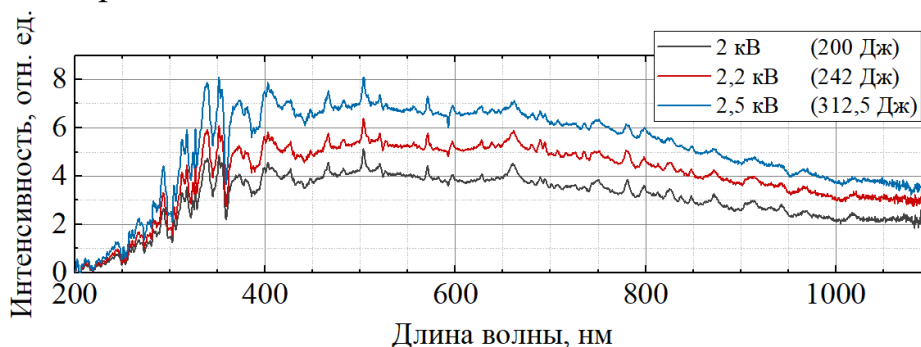


Рис. 2. Характерные спектры излучения плазменной струи

Произведена оценка температуры и состава плазменного потока при различных вкладываемых в разряд энергиях

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.Ф., Ершов А.П., Каменщиков С.А., Логунов А.А., Черников В.А. // Вестн. Моск. ун-та. – 2008. – Т. 3. – № 2. – С. 63.
2. Andrey Starikovskiy, Nickolay Aleksandrov / Plasma-assisted ignition and combustion // Progress in Energy and Combustion Science – 2013. – V. 39. – I. 1. – P. 61–110.
3. Protasov Yu.S, Protasov Y.Y, Telekh V.D, Shchepanyuk T.S. /Plasmadynamic light sources of high spectral brightness and shock waves generators // Enciclopedia of Low Temperature Plasma. Vol IX-4. Plasma aerodynamics. Moscow: Yanus-K, – 2014. – P. 383–436.
4. O'Reilly, D.; Herdrich, G.; Kavanagh, D.F. / Electric Methods for Small Satellites: A Review. // Aerospace – 2021. – V. 8. – №22.
5. A.V. Pavlov, Yu.Yu. Protasov, V.D. Telekh, T.S. Shchepanuk / Laser holographic interferometry of short ultraviolet radiation with high power density interaction with condensed matters // Scientific Visualization 2019. – V. 11.3. – P. 111–125.
6. V G Brovkin // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – V. 2100. – №012005.

ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ КОНВЕРСИИ CO₂ В СВЧ ПЛАЗМЕ ПУТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСТРАЗРЯДНОЙ ОБЛАСТИ

INCREASING THE CO₂ CONVERSION IN MICROWAVE PLASMA BY COOLING THE POST-DISCHARGE REGION

Чекмарев Н.В.¹, Мансфельд Д.А.¹, Преображенский Е.И.¹, Синцов С.В.¹,
Ремез М.А.¹, Водопьянов А.В.¹

Chekmarev N.V.¹, Mansfeld D.A.¹, Preobrazhensky E.I.¹, Sintsov S.V.¹,
Remez M.A.¹, Vodopyanov A.V.¹

¹*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им.
А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Россия, 603950
E-mail: chekmarev@ipfran.ru*

В работе исследовано повышение степени конверсии углекислого газа путем быстрого $\sim 10^6 - 10^7 K/s$ охлаждения реакционной смеси. Результаты расчетов газодинамики и химической кинетики показали возможность достижения таких скоростей охлаждения за счет подачи в постразрядную область потока холодного газа. Экспериментальные данные свидетельствуют о двукратном росте степени конверсии CO₂ за счет охлаждения потоком газа. Максимальная достигнутая степень конверсия составила 18,7% при энергоэффективности 32,8%.

An increase in the degree of carbon dioxide conversion by rapid $\sim 10^6 - 10^7 K/s$ cooling of the reaction mixture was studied in this work. The results of calculations of gas dynamics and chemical kinetics showed the possibility of achieving such cooling rates by supplying a cold gas flow to the post-discharge region. Experimental data show a twofold increase in the degree of CO₂ conversion due to gas flow cooling. The maximum achieved degree of conversion was 18.7% with an energy efficiency of 32.8%.

В настоящее время в экспериментах по разложению углекислого газа в плазме различных разрядов значительное внимание уделяется исследованию процессов быстрого охлаждения реакционной смеси (закалки) с целью уменьшения скорости обратных реакций [1]. В данной работе экспериментально и теоретически продемонстрирована возможность закалки реакционной смеси на выходе из волноводного СВЧ-плазматрона [2], с помощью подачи встречного потока газа. Разряд в потоке углекислого газа (CO₂) поддерживается непрерывным излучением гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью в диапазоне 0.1–1 кВт. Прямые реакции с практически полным разложением углекислого газа ($CO_2 \rightarrow CO + 1/2O_2$) протекают в зоне конического сужения волновода, где достигается наибольшая ($\sim 4000-5000 K$) температура электронов и газа. На выходе плазматрона в потоке газа формируется область рекомбинации, которая представляет собой плазменный факел длиной 6–10 см, в котором происходит остывание реакционной смеси. Ключевую роль играет остывание с 3000 К до 2000 К,

поскольку именно в этом диапазоне температур активно протекают обратные реакции $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$, поэтому необходимо «зафиксировать» состав реакционной смеси. Быстрого ($\sim 10^6 - 10^7 K/s$) охлаждения газа до температуры $\sim 1500 K$ и «выключения» обратных реакций можно достичь путем подачи потока закалочного газа в рекомбинационную область плазменного факела, причем охлаждение будет достигаться за счет взаимодействия факела как с самим потоком холодного газа, так и с окружающей атмосферой.

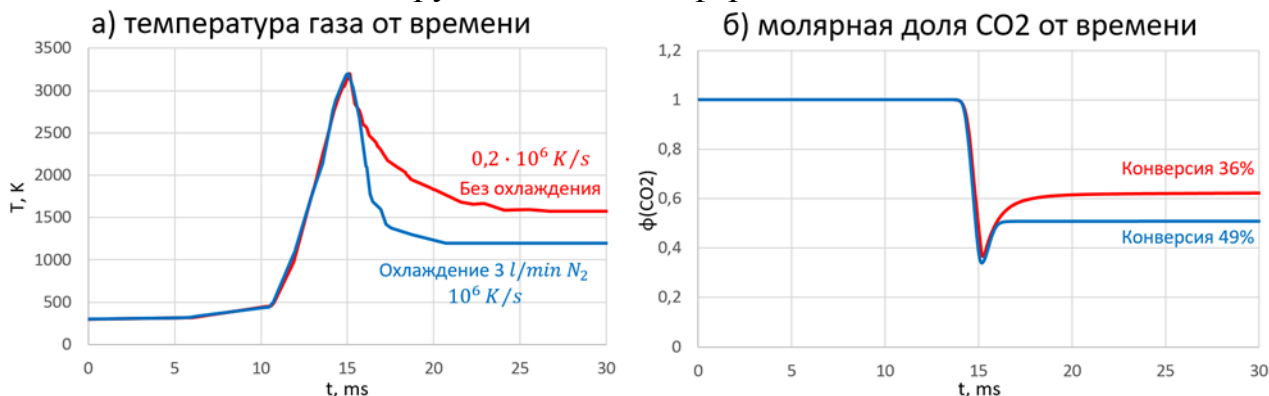


Рис. 1. Результаты численного моделирования зависимости температуры газа (а) и молярной доли CO_2 (б) от времени движения газа вдоль линии тока

Методами численного моделирования получена (см. рис.1а) зависимость температуры газа от времени его движения вдоль линии тока в разработанном плазмотроне без подачи охлаждающего газа и при подаче $3 l/min$ азота. Показано, что скорость остывания возросла с $0,2 \cdot 10^6 K/s$ до $10^6 K/s$, что позволило сократить время существования газа в диапазоне температур $2000 - 3000 K$. Расчет химической кинетики по полученным зависимостям температуры от времени показал (см. рис.1 б), что добавление охлаждающего газа действительно приводит к росту степени конверсии с 36% до 49% за счет быстрого охлаждения.

В ходе экспериментов добавление охлаждающего газа приводило к сокращению длины факела (уменьшению области рекомбинации) в 3-4 раза. Экспериментально продемонстрировано, что за счет охлаждения постразрядной области потоком азота, удастся более чем в два раза повысить степень конверсии CO_2 (с 7,3% до 18,7%) и энергоэффективность (долю энергии СВЧ излучения, вкладываемую в разложение молекул CO_2) с 12,8% до 32,8%.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-12-00376)

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Hecimovic, C.K. Kiefer, A. Meindl, R. Antunes, U. Fantz / Fast gas quenching of microwave plasma effluent for enhanced CO_2 conversion // Journal of CO_2 Utilization – 2023. – V.71.
2. Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, С.В. Синцов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, М.Е. Викторов / Разряд атмосферного давления, поддерживаемый миллиметровым излучением в волноводном плазмотроне // Письма в ЖТФ – 2023. – Т. 49. – В.1.

МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ

MODIFICATION OF CARBON FIBERS WITH A FLOW OF LOW-ENERGY IONS

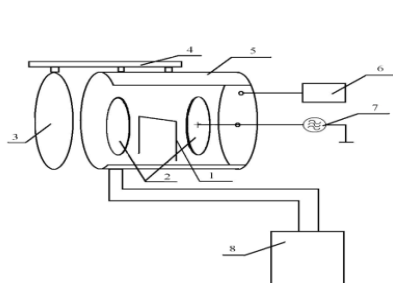
Шакиров Р. И., Шарифуллин Ф. С., Сагитова Ф. Р.
Shakirov R. I., Sharifullin F. S., Sagitova F. R.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015
E-mail: office@kstu.ru*

Рассмотрена модификация углеродных волокон различных марок высокочастотным емкостным разрядом при пониженном давлении с целью выявления оптимальных параметров и газовой среды обработки. Также, в ходе экспериментов, выявлено влияние обработки на геометрические, объемные и поверхностные свойства углеродных волокон. В результате полученных данных можно сделать вывод о происходящих процессах при модификации волокон потоком низкоэнергетических ионов.

The modification of carbon fibers of various grades by high-frequency capacitive discharge at reduced pressure is considered in order to identify the optimal parameters and the gaseous processing medium. Also, during the experiments, the influence of processing on the geometric, volumetric and surface properties of carbon fibers was revealed. As a result of the data obtained, it can be concluded about the processes occurring during the modification of fibers by a low-energy ion flux.

Любая модификация материала, так или иначе, может влиять на геометрию поверхности, объемные и поверхностные свойства материала. После модификации размер волокон не уменьшается, существенных изменений после плазменной модификации на поверхности углеродного волокна (УВ) не зафиксировано. Целью плазменной модификация является повысить смачиваемость УВ и развитие удельной поверхности, что повысит механическую адгезию на границе раздела волокно-матрица.



- 1 – рамка для фиксации образца;
- 2 – ВЧ-электроды;
- 3 – крышка вакуумной камеры;
- 4 – консоль для открытия крышки камеры установки;
- 5 – вакуумная камера установки;
- 6 – система подачи и регулирования плазмообразующего газа;
- 7 – ВЧ-генератор;

Рис. 1. Схема опытной ВЧЕ плазменной установки

Для модификации ВЧЕ плазмой при пониженном давлении использовалась опытная установка с потребляемой мощностью $W_p = 2-20$ кВт. Схема установки отображена на рисунке 1. Установка создана из стандартных, широкодоступных

и легко монтируемых элементов, выпускаемых в промышленных масштабах. Параметрами обработки являются время (t), мощность (U_a) и плазмообразующий газ (аргон, воздух). [1]

При определении высоты поднятия эпоксидной смолы, наблюдается зависимость увеличения капиллярного эффекта от времени и интенсивности плазменной обработки. В результате этого оба режима позволяют достичь повышения эффекта на 70%. Однако, при обработке в среде аргона, показатели капиллярности падают с увеличением времени.[2]

Также с увеличением времени воздействия на объект, разрывная нагрузка не уменьшается, модификация не изменяет объемные свойства волокон, что показывает преимущества данного метода обработки и сохранение прочностных свойств материала. Исследование характера разрушения (рис. 2) образцов показало, что при испытании немодифицированных волокон наблюдается отслаивание в месте контакта, когда в случае модифицированных волокон наблюдается частичный разрыв филаментов, что обусловлено повышенной адгезионной прочностью в углепластике.



Рис. 2. Микрофотографии образца после эксперимента: а) контрольного, б) модифицированного ($U_a=5$ кВ, $P=50$ Па, $G_{\text{воздух}}=0,04$ г/с, $t=20$ мин)

Исходя из результатов эксперимента, наилучший результат капиллярного эффекта достигается при обработке в режиме: $U_a=5$ кВ, $t=20$ мин, $P=50$ Па, $G_{\text{воздух}}=0,04$ г/с. При обработке в среде воздуха максимальные показатели сдвиговой прочности достигаются при модификации в следующем режиме: $U_a=5$ кВ, $P=50$ Па, $G_{\text{воздух}}=0,04$ г/с, $t=20$ мин. При таких показателях прочность можно повысить до 50%. При обработке в среде аргона, оптимальным является режим $U_a=3$ кВ, $P=26$ Па, $G_{\text{Ar}}=0,04$ г/с, $t=20$ мин. Можно достичь повышения сдвиговой прочности в микрокомposite до 25 %, что в два раза меньше, чем при использовании воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарифуллин А.Р. Исследование свойств углеродных волокон, модифицированных высокочастотным емкостным разрядом / А.Р. Гарифуллин, И.Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №18. – С. 32–34.
2. Изучение воздействия низкотемпературной плазмы на сдвиговую прочность углеродных микрокомпозитов / А.Р. Гарифуллин, И.Х. Ибрафилов, И.И. Каримуллин, А.Е. Карноухов, Е.А. Скидченко // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – № 8. С. 81–82.
3. Ефремов, А.М Вакуумно–плазменные процессы и технологии: учеб. пособие / А.М. Ефремов, В.И. Светцов, В.В. Рыбкин. – Изд–во Иван. гос. хим.–технол. ун–та. г. Иваново, 2006. – 260 с.

Секция 9

**ПЛАЗМА В АТМОСФЕРЕ, ИОНО-
СФЕРЕ, АСТРОФИЗИКЕ**

Секция 10

**ПЛАЗМА В МЕДИКО-БИОЛОГИ-
ЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ**

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

FORMATION OF A HYDROGEN PLASMA JET FOR ASTROPHYSICAL MODELING

Русских А.Г.¹, Жигалин А.С.¹, Орешкин В.И.¹, Кузьминых А.М.
Rousskikh A.G.¹, Zhigalin A.S.¹, Oreshkin V.I.¹, Kuzmenykh A.M.

¹Институт сильноточной электроники СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3
E-mail: russ@ovpe2.hcei.tsc.ru

Работа посвящена формированию водородной узконаправленной плазменной струи в вакууме. Плазменная струя формировалась в процессе горения вакуумного дугового разряда с инициацией по поверхности капролонового диэлектрика. Эксперименты проводились на сильноточном генераторе ИМРИ-5 с амплитудой тока 250 кА и фронтом нарастания 600 нс. В процессе проведения экспериментов регистрировалось изображение плазменной струи в различные моменты времени с экспозицией в 10 нс, распределение тока вдоль столба плазмы и общее падение напряжения на дуговом разряде.

The work is devoted to the formation of a narrowly directed hydrogen plasma jet in vacuum. The plasma jet was formed with a vacuum arc discharge with initiation over the surface of a caprolon dielectric. The experiments were carried out on an IMRI-5 high-current generator with a current amplitude of 250 kA and a rise time of 600 ns. During the experiments, the following was recorded: the image of the plasma jet at different times with an exposure of 10 ns, the current distribution along the plasma column, and the total voltage drop along the arc discharge.

Эксперименты проводились на установке ИМРИ-5 [1] с амплитудой синусоидального тока дугового разряда на нагрузку 250 кА при фронте нарастания 600 нс. Схема экспериментов показана на рис.1.

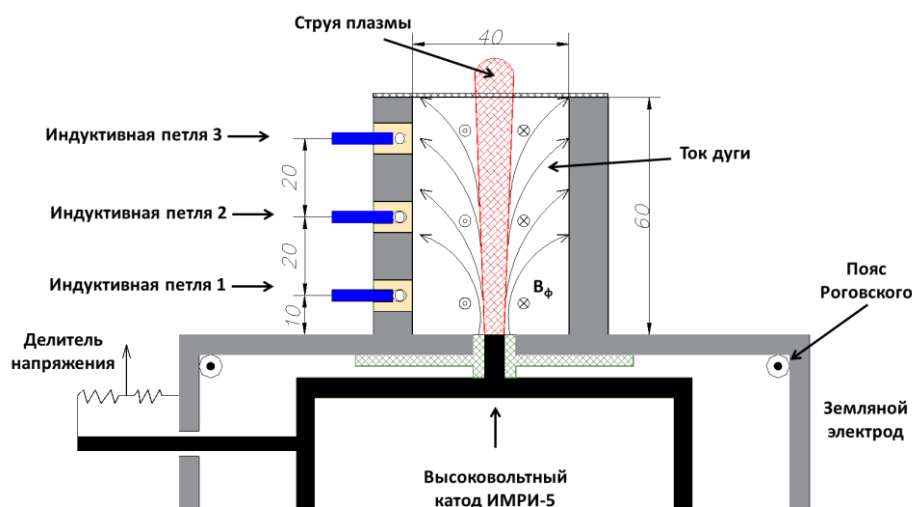


Рис.1. Схема формирования водородной плазменной струи и схема расположения датчиков электрофизических измерений

Источником ионизованного водорода является поверхность капролонового диэлектрика по поверхности которого инициируется разряд и вдоль которого в дальнейшем протекает часть тока генератора ИМРИ-5. В качестве катода использовался стальной стержень диаметром 4 мм. Плазменный факел формируется в плазменной пушке за счет давления на плазму собственного магнитного поля тока дугового разряда распределенного по длине плазменного канала. На рис.2 приведены изображения формируемого плазменного факела, которые были получены при помощи покадровой оптической камеры HFSC-Pro с экспозицией 10 нс в различные моменты времени.

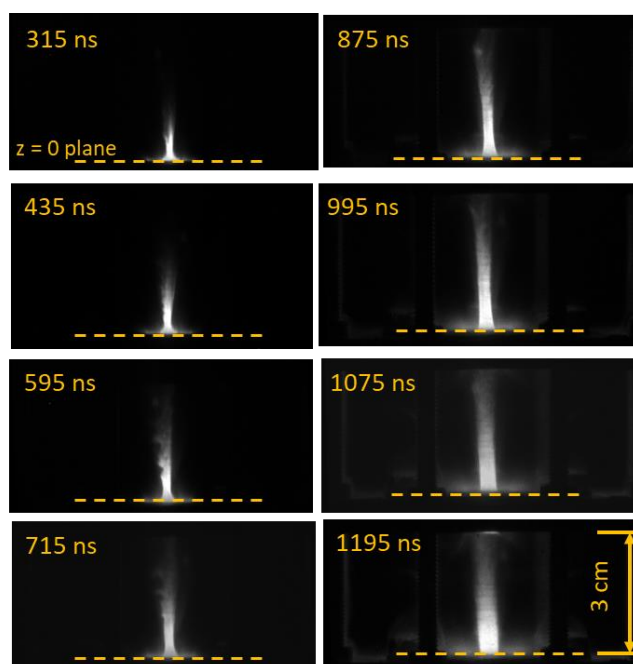


Рис.2. Изображения водородного плазменного факела в различные моменты времени

Электрофизические измерения показывают, что фронт водородного факела движется в начале формирования факела со скоростью 35 см/мкс и по мере распространения вдоль его оси замедляется. В момент, когда фронт плазменного факела достигает верхней сетки, его скорость составляет 12 см/мкс. Электрофизические измерения индуктивными петлями показывают, что верхней сетки, расположенной на расстоянии 6 см от плазменной пушки, достигает в начале около 10% тока дуги, затем эта доля тока увеличивается и достигает 30%. Работа выполнена в рамках проекта РНФ 22-19-00686.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, N.A. Labetskaya, S.A. Chaikovsky, A.V. Batrakov, G.Yu. Yushkov, R.B. Baksht // Physics of Plasmas – 2014. –V. 21. – № 052701.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА СИНТЕЗ ОЗОНА И СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПРОБОЕМ

INFLUENCE OF INRETE GAS ON THE SYNTHESIS OF OZONE AND NITROGEN COMPOUNDS IN AIR PLASMA INDUCED BY LASER OPTICAL BREAKDOWN

Корнев Р.А.¹, Шабарова Л.В.¹, Ермаков А.А.¹, Шкрунин В. Е.¹, Горнушкин И.Б.².
Kornev R.A.¹, Shabarova L.V.¹, Ermakov A.A.¹, Shkrunin V. E.¹, Gornushkin I. B.²

¹*ИХВВ им. Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950,
Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49*

²*BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Germany,
12489, Berlin, Richard-Willstätter-Strasse, 11
E-mail: romanakornev@gmail.com*

В условиях плазмы, индуцированной лазерным оптическим пробоем с использованием импульсного Nd:YAG лазера на длине волны 1,064 мкм исследованы спектральные особенности чистых инертных газов Ar, He, Kr and Xe, а также смеси воздуха с Ar, He, Kr and Xe и влияния их на синтез NO, NO₂ and O₃. В работе использовались методы эмиссионной и ИК-спектроскопии, а также масс-спектрометрии и спектрофотометрии. Предложены наиболее вероятные реакции образования промежуточных активных частиц. Обсуждаются механизмы образования NO, NO₂ и O₃. Методом термодинамического анализа установлено, что равновесная концентрация NO в чистом воздухе и в смесях воздуха с инертными не зависит от выбора инертного газа. Напротив, равновесная концентрация иона NO⁺ в чистом воздухе максимальна и снижается в смесях воздуха с инертными газами.

The generation of ozone and nitrogen oxides by laser induced dielectric breakdown (LIDB) in mixtures of air with noble gases Ar, He, Kr and Xe is investigated using OES and IR spectroscopy, mass spectrometry, and absorption spectrophotometry. It is shown that the formation of NO and NO₂ noticeably depends on the type of inert gas; the more complex electronic configuration and the lower ionization potential of the inert gas led to increased production of NO and NO₂. The formation of ozone occurs mainly due to the photolytic reaction outside the gas discharge zone. Equilibrium thermodynamic analysis showed that the formation of NO in mixtures of air with inert gases does not depend on the choice of an inert gas, while the equilibrium concentration of the NO⁺ ion decreases with increasing complexity of the electronic configuration of an inert gas.

Одним из перспективных разрядов, способных генерировать озон и NO, позволяющим локализовать область плазмы и избежать загрязнения является газовый разряд, индуцированный оптическим пробоем мощного лазера (Laser-induced dielectric breakdown (LIDB)).

Характеристики лазерного пробоя в чистых газах N₂ и O₂ на длине волны 1,064 мкм с использованием импульсного Nd:YAG лазера длительностью 10 нсек в диапазоне давлений от 1 до 50 атм были исследованы в работе [1]. В [2] в газовых смесях состава CO-N₂-H₂O реализовывался диэлектрический пробой лазера ближнего ИК диапазона мощностью 85 Дж и длительностью импульса 450 пс.

Разные стадии разряда исследовались методом ОЭС с временным разрешением. Газовый состав исследовалась с использованием ИК Фурье-спектроскопии высокого разрешения и газовой хроматографии. После облучения в смеси зафиксировали появление N_2O , CO_2 , этана, ацетилена, этилена и ацетона. В [3] в условиях лазерного диэлектрического пробоя Nd:YAG лазера образование озона и оксидов азота изучалось при многократном лазерном пробое кислородно-азотных смесей при атмосферном давлении.

Целью настоящей работы является исследование спектральных особенностей плазмы LIDB в смеси воздуха с Ar, He, Kr and Xe и влияния их на синтез NO, NO_2 and O_3 .

Экспериментальная установка подробно описана в [4]. Она позволяет проводить исследование плазмы, генерируемой LIDB в различных газовых смесях методами ОЭС, ИК-спектроскопии, УФ-спектрофотометрии и масс-спектрометрии.

Образование молекул в LIDB плазме можно резюмировать следующим образом: 1. Образование NO и NO_2 в плазме LIDB заметно зависит от типа инертного газа; 2. На увеличение концентрации NO и NO_2 влияет усложнение электронной конфигурации инертного газа, а также снижение его потенциала ионизации; 3. Усложнение электронной конфигурации инертного газа, а также уменьшение его потенциала ионизации приводит к подавлению линий ионов азота и кислорода. Таким образом, можно предположить, что основной механизм, влияющий на химические превращения в этих смесях и, в частности, на образование NO и NO_2 , является атомарным.; 4. Образование озона происходит вне газоразрядной зоны по реакции фотолиза.; 5. Методом термодинамического анализа установлено, что равновесная концентрация NO в чистом воздухе и в смесях воздуха с инертными газами находится на одном уровне и не зависит от выбора инертного газа. Равновесная концентрация иона NO^+ в чистом воздухе максимальна и уменьшается в смесях воздуха с инертными газами. Причем концентрация NO^+ тем ниже, чем сложнее электронная конфигурация инертного газа.

Работа выполнена при поддержке государственного задания министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0095-2019-0008.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Stricker // Journal of Applied Physics – 1982, – V. 53. – №851.
2. S.Civiš, D.Babánková, J.Cihelka, P.Sazama, L.Juha // Journal of Physical Chemistry A. – 2008. – V. 112. – №7162.
3. I. B. Gornushkin, C. L. Stevenson, G. Galbacs, B. W. Smith, J. D. Wineforder // Appl. Spect. – 2003. – V. 57. – №1442.
4. A. Martusevich, R. Kornev, A. Ermakov, I. Gornushkin, V. Nazarov, L. Shabarova, V. Shkrunin // Sensors –2023. – V. 23. – №932.

РАЗРАБОТКА ПОРИСТО-МОНОЛИТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНДОПРОТЕЗОВ РЕБЕР

DEVELOPMENT OF A POROUS-MONOLITHIC ALLOY BASED ON TINI PRODUCED BY THE METHOD OF ELECTRON-BEAM PROCESSING FOR CREATING RIB ENDOPROSTHESES

Аникеев С.Г.¹, Артюхова Н.В.¹, Кафтаранова М.И.¹, Шабалина А.В.¹
Anikeev S.G.¹, Artyukhova N.V.¹, Kaftaranova M.I.¹, Shabalina A.V.¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
E-mail: anikeev_sergey@mail.ru*

Работа направлена на совершенствование используемых в настоящее время реберных эндопротезов на основе сплавов TiNi. Разработан новый метод осаждения поверхностного порошкового материала TiNi для увеличения шероховатости монолитной подложки с помощью комбинированного воздействия диффузионного спекания и электронно-пучковой обработки. The work is aimed at improving the currently used rib endoprostheses based on TiNi alloys. A new method for the deposition of a TiNi surface powder material has been developed to increase the roughness of a monolithic substrate using a combined effect of diffusion sintering and electron beam processing.

Настоящая работа направлена на разработку новых биосовместимых пористо-монолитных материалов на основе TiNi, которые могут быть использованы для создания реберных эндопротезов нового поколения. В исследовании изготовили композиционные материалы на основе TiNi путем диффузионного спекания порошков TiNi с последующей обработкой электронным пучком и изучили структурные особенности полученного материала и его коррозионные свойства.

Для изготовления образцов с композиционной пористо-монолитной структурой использовались монолитные пластины и порошок TiNi, приготовленный гидридно-кальциевым методом. Частицы порошка диапазона размеров (0-100 мкм) помещали на монолитную пластину для спекания. Заготовки помещали в кварцевую капсулу и спекали при температуре 1200°C в течение 15 мин в электровакуумной печи СНВЭ-1,31/16-И4.

Электронно-пучковую обработку проводили на установке РИТМ–СП (ООО Микросплав, г. Томск). В состав установки входит источник низкоэнергетических (10–30 кэВ) сильно-точных (до 25 кА) электронных пучков (НСЭП) с длительностью импульса 2–4 мкс и диаметром пучка до 80 мм. Плотность энергии с которой проводили обработку составляла 3 и 6 Дж/см² при числе импульсов 30.

Структурные особенности экспериментальных образцов исследовали методом растровой электронной микроскопии на микроскопе (SEM) в режиме вторичных (SE) и обратно-отраженных электронов (BSE) Quanta 200 3D с энергодисперсионным спектрометром EDAX ECON IV. Электрохимические измерения проводили на потенциостате-гальваностате Р-40Х.

Образец СП-3, полученный с плотностью энергии 3 Дж/см², сохранил развитую структуру поверхности исходного порошкового материала. Напротив, образец СП-6, полученный с плотностью энергии 6 Дж/см², демонстрирует чрезмерную степень обработки электронным лучом, что привело к структуре поверхности, состоящей из вогнутых и выпуклых участков на основе кратеров. Обработка электронным пучком гомогенизирует поверхность обрабатываемых материалов. Многократное воздействие электронным пучком приводит к плавлению поверхностных слоев толщиной в несколько микрон. С увеличением числа импульсов объем образующейся жидкой фазы увеличивается за счет теплового нагрева. Повторное облучение образовавшегося материала индуцирует образование новых кратеров, и, таким образом, наложение и расплавление таких кратеров в конечном итоге приводит к сглаживанию поверхности. Поэтому было установлено, что морфология поверхности, а также параметры шероховатости поверхности образца СП-6 приближаются к исходной монолитной пластине. Материал СП-3 является оптимальным материалом для создания эндопротезов ребер.

Исследование параметров коррозионной устойчивости комбинированных пористо-монолитных материалов показало, что реализуются два коррозионных процесса: 1) структурная коррозия, связанная с исходной структурной неоднородностью поверхности образцов (в местах локализации частиц вторичных фаз); 2) питтинговая коррозия, воздействующая на материал в местах выступов или впадин. Трещины и связанные с ними новые поверхности могли быть причиной и очагами более высокой скорости коррозии. Параметры коррозионной устойчивости выше для материала СП-6 за счет менее развитой структуры поверхности.

Разработанные пористые материалы TiNi с различной поверхностной структурой и морфологией являются перспективными в качестве потенциальных имплантатов нового поколения для реберных эндопротезов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10045, <https://rscf.ru/project/19-79-10045/>

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА

EFFECT OF ELECTRON-BEAM PROCESSING ON THE PROPERTIES ALLOY BASED ON TINI

Артюхова Н.В.¹, Аникеев С.Г.,¹ Кафтارانова М.И.¹, Пахолкина С.А.¹
Artyukhova N.V.¹, Anikeev S.G.¹, Kaftaranova M.I.¹, Pakholkina S.A.¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
E-mail: artyukhova_nad@mail.ru*

Работа направлена на исследование влияния электронно-пучковой обработки на структуры, механические свойства и параметры смачиваемости монолитных пластин сплава никелида титана с оксидным слоем и после обработки раствором кислот. Показано, что влияние высокоэнергетического воздействия электронным пучком гомогенизирует фазовый состав поверхностного слоя обрабатываемых материалов, снижает его шероховатость. Изменение микроструктуры и топографии поверхности приводят к изменению величины ее микротвердости и параметров смачиваемости.

The work is aimed at studying the effect of electron-beam treatment on the structures, mechanical properties and wettability parameters of monolithic titanium nickelide alloy plates with an oxide layer and after treatment with an acid solution. It is shown that the effect of high-energy exposure to an electron beam homogenizes the phase composition of the surface layer of processed materials and reduces its roughness. Changes in the microstructure and topography of the surface lead to a change in its microhardness and wettability parameters.

В настоящей работе показано исследование влияния электронно-пучковой обработки на структуры, механические свойства (твердость, упругость) и параметры смачиваемости монолитных пластин сплава на основе никелида титана с оксидным слоем и после обработки раствором кислот.

Для исследования использовались монолитные пластины толщиной 2 мм и шириной 15 мм, полученные методом прокатки с использованием двухвалкового прокатного стана продольной прокатки (ДУО–80). После этого прокатанные образцы разрезали на 2 части и готовили экспериментальные образцы двух типов: с исходным оксидным слоем и без него.

Для того, чтобы удалить оксидный слой подготавливали водный раствор азотной и плавиковой кислот ($\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$) в соотношении (2:1:30). После очистки щадящим раствором кислот в течение 8 часов для удаления следов травления поверхность шлифовали наждачной бумагой в интервале зернистости Р600–1000.

Далее образцы P1(ox) и P1(et) нарезали на пластины длиной 70 мм и обрабатывали с помощью низкоэнергетического сильноточного электронного пучка

(НСЭП) в режиме с энергией электронов 20 и 30 кэВ (добавочный индекс к аббревиатуре -20,-30, соответственно), 15 импульсов, длительность импульса – 2.5 мкс при частоте 0,2 Гц. Электронно-пучковую обработку выполняли на установке РИТМ–СП (Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (ТНЦ СО РАН), г. Томск).

В образец P1(ox) после обработки электронным пучком фазовый состав гомогенизируется. После обработки в режиме с энергией электронов 30 кэВ основной фазой является фаза аустенита TiNi(B2) доля которой составляет 80 об. %. После высокоэнергетического воздействия электронным пучком в структуре поверхности образцов P1(et) фиксируется фаза TiNi в модификации B19'. Соотношение TiNi(B2) и TiNi(B19') фаз меняется в зависимости от режима обработки. Появление мартенситной фазы B19' связано с возникновением напряжений под действием обработки НСРЕВ. Их релаксация происходит за счет вызванного данным напряжением мартенситного превращения B2→B19'.

Электронно-пучковая обработка, как для образца P1(ox), так и для P1(et) приводит к снижению шероховатости и образованию гладкой поверхности в процессе воздействия. Это влияет на изменение характеристик гидрофобности/гидрофильности при смачивании поверхности сплава TiNi. Сглаживание поверхности образца P1(ox) в процессе обработки и смене ее режима от 20 до 30 кэВ переводит гидрофильную поверхность в разряд гидрофобных. Для образца P1(et) несмотря на общее сглаживание и тенденцию уменьшения краевого угла смачивания, обработка электронным пучком сохраняет гидрофильность поверхности при повышении энергией электронов.

Влияние воздействия электронного пучка на параметр твердости неоднозначно для образцов с оксидным слоем и без него. Обработка поверхности образца P1(ox) повышает ее твердость. Максимум значений инструментальной твердости и твердости по Виккерсу приходится на энергии электронов в 20 кэВ, что связано с образованием сплошного модифицированного поверхностного слоя. В то время как поверхность образца представлена оксидным слоем, который имеет дискретную грануловидную структуру. Обработка электронным пучком образца P1(et) снижает значение твердости что связано с изменением фазового состава появлением мартенситной фазы TiNi(B19') в структуре.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

ВЛИЯНИЕ РАСТВОРА ХЕНКСА, ОБРАБОТАННОГО ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ, СОВМЕСТНО С ДОКСОРУБИЦИНОМ И МЕДРОКСИПРОГЕСТЕРОНА АЦЕТАТОМ НА ЦИТОКИНОВУЮ АКТИВНОСТЬ ЛЕЙКОЦИТОВ ЧЕЛОВЕКА РАЗНЫХ ВОЗРАСТОВ

Павлик Т.И.¹, Костюкова Н.М.², Павлова М.И.³

¹*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Россия, ti.pavlik.u@gmail.com*

²*ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Россия, sakura2001@inbox.ru*

³*ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Россия
E-mail: marya-00@list.ru*

В последние годы все больший интерес вызывает применение растворов, обработанных холодной плазмой (PTS) при лечении онкологических заболеваний. Отмечается синергизм противоопухолевого и иммуностимулирующего действия цитотоксических и гормональных препаратов с холодной плазмой.

Целью нашей работы стало: определение влияния комбинации PTS, доксорубицина и медроксипрогестерона ацетата (МПА) на цитокиновую активность лейкоцитов молодых (20-30 лет) и пожилых (60-70 лет) доноров.

Для обработки растворов холодной плазмой использовался источник “САРКО-JET” (ИОФ РАН). Раствор Хенкса обрабатывался прямым пьезоразрядом 2,5; 5 или 7,5 мин. Лейкоциты инкубировали с обработанным раствором 24 часа после чего оценка цитокиновой активности проводилась методом ИФА.

Для пациентов 60+ PTS повышает концентрацию ФНО- α на $38\% \pm 7.3\%$ при времени обработки 2,5 комбинация с МПА не оказала влияния, комбинация с доксорубицином понижала ФНО- α . Для пациентов 20-30 лет продукция ФНО- α увеличивалась под действием PTS независимо от времени обработки, МПА и доксорубин не оказали значимого эффекта.

Для пациентов 60+ PTS понижает генерацию TGF- β на $50\% \pm 6,8\%$, в комбинации с МПА понижает на $23\% \pm 0,9\%$. Для пациентов 20-30 лет PTS в комбинации с доксорубицином или МПА снижал продукцию TGF- β при 2,5 и 5 мин обработки и повышал её при 7,5 мин.

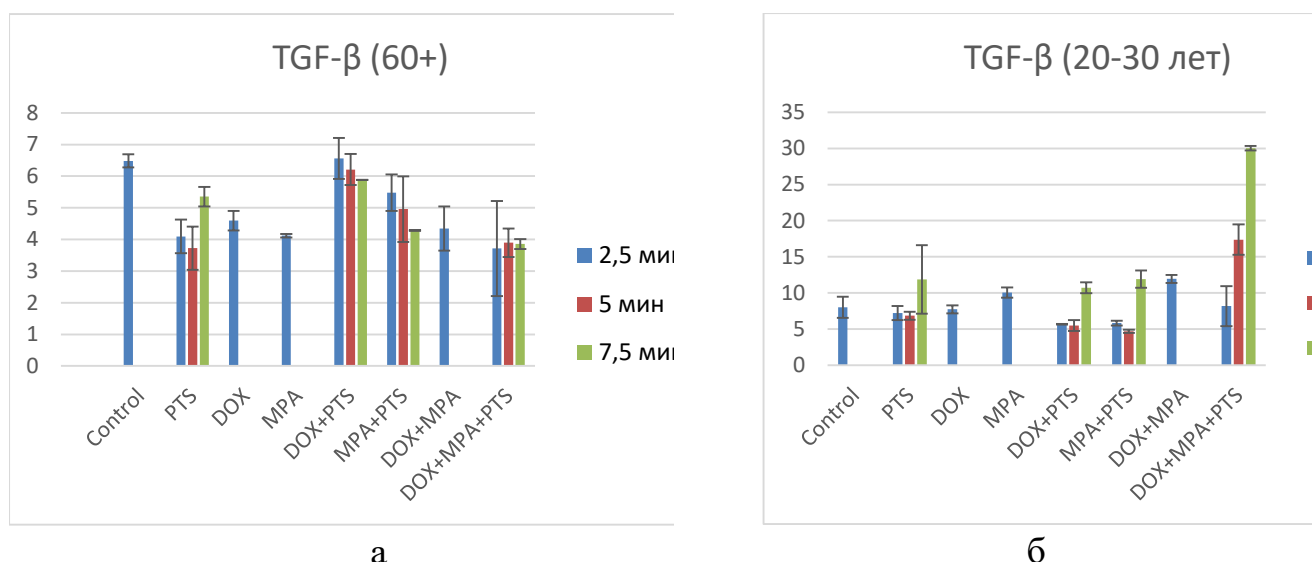


Рис. 1. Концентрация TGF-β в питательной среде RPMI после инкубации мононуклеарных лейкоцитов с одним или несколькими исследуемыми препаратами в течение 24 ч. а – для пациентов старшей возрастной группы (60+) б – для молодых пациентов (20-30 лет)

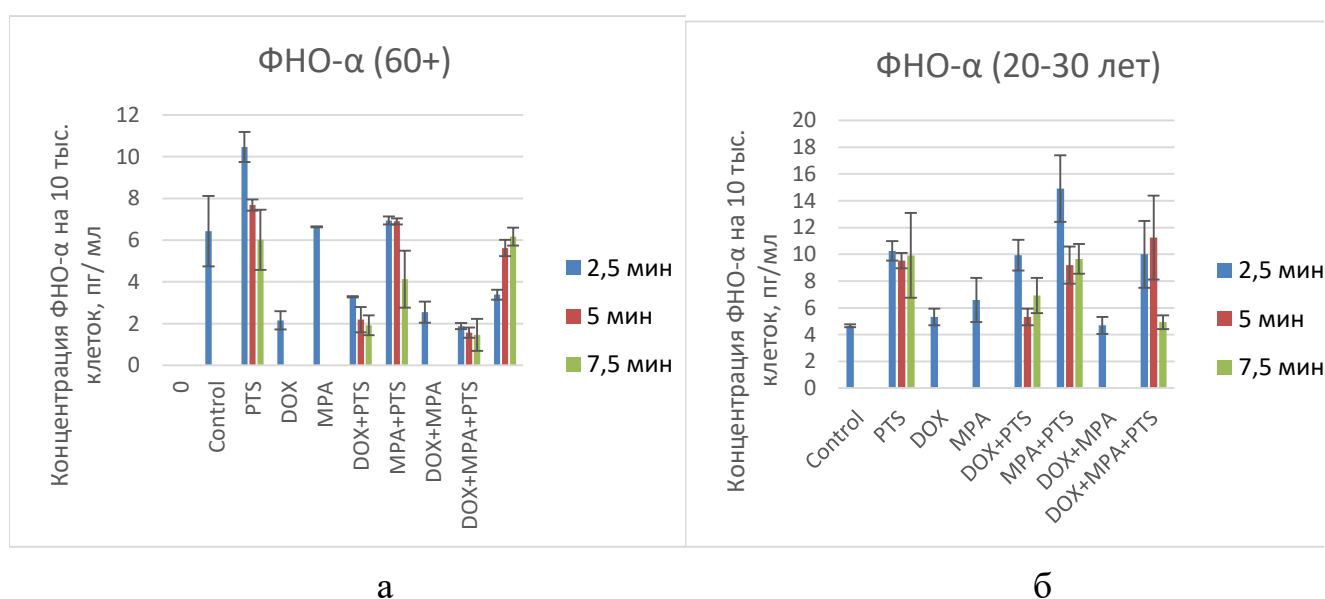


Рис. 2. Концентрация ФНО-α в питательной среде RPMI после инкубации мононуклеарных лейкоцитов с одним или несколькими исследуемыми препаратами в течение 24 ч. а – для пациентов старшей возрастной группы (60+), б – для молодых пациентов (20-30 лет)

Возникает дилемма: почему PTS вызывает такие противоположные эффекты, как заживление ран, где важно деление клеток, и уничтожение опухолей, где деление надо остановить. Как показала наша работа у молодых пациентов преобладает оксидантная активность лейкоцитов, а у группы старшего возраста активация генерации воспалительных цитокинов. Это может объяснить возникающее противоречие и помочь при терапии, так как лечение ран чаще проводится у молодых людей, а лечение рака - у пожилых.

РАДИКАЛ-ПРОДУЦИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ НЕЙТРОФИЛОВ КРОВИ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПОЙ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ CeO_2

Чиликина П.А.¹, Новиков Д.О.²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 100500

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 100500

E-mail: p.chilikina@gmail.com

В настоящей работе исследовано влияние широкополостного импульсного излучения сплошного спектра на радикал-продуцирующую активность нейтрофилов крови практически здоровых доноров ($n = 4$), в том числе при облучении образцов в присутствии наночастиц диоксида церия. The effect of pulsed irradiation of the continuous spectrum on the activity of neutrophils in the blood, including when irradiating samples in the presence of cerium dioxide nanoparticles, is investigated.

Ультрафиолетовое облучение крови (УФОК) — один из подходов к лечению инфекционных заболеваний различного патогенеза, в том числе, вызванных микроорганизмами с множественной лекарственной устойчивостью [1]. УФОК оказывает разнонаправленное дозозависимое воздействие на активность клеточных компонентов крови [1], а также оказывает влияние на неклеточные компоненты крови. Одними из перспективных источников для УФ-терапии являются импульсные ксеноновые лампы (ИКЛ), широкий диапазон излучения которых обеспечивает возможность воздействия на все компоненты крови. Несмотря на многочисленные исследования, до сих пор отсутствует информация относительно точных механизмов действия УФ-излучения на кровь, что актуализируют проблему изучения потенциала УФОК как альтернативного подхода не только для лечения инфекционных заболеваний, но и в качестве нового иммуномодулирующего метода.

Перспективным направлением в биомедицинской науке является разработка новых высокоэффективных препаратов — регуляторов свободнорадикального баланса, среди которых важное место занимают нанопрепараты. Исследования показывают, что использование наночастиц CeO_2 , сочетающих в себе уникальные физико-химические свойства и способность выполнять функции природных ферментов (нанозимная активность), может оказывать защитное действие при окислительном повреждении клеток в результате воздействия УФ-излучения [2]. Таким образом, целью работы был анализ радикал-продуцирующей функции нейтрофилов крови после УФ-облучения в присутствии наночастиц диоксида церия.

Для УФ-облучения крови была использована модель устройства для УФОК на основе импульсной шаровой лампы L11937 с номинальной мощностью 20 Вт.

Расстояние от УФ-источника до образцов в процессе облучения составляло 10 см. Доза излучения за одну секунду соответствовала 0.15 мДж/см²·с. В работе были исследованы следующие дозы УФ: 45 мДж/см² и 135 мДж/см². Кровь была отобрана из кубитальной вены практически здоровых доноров ($n = 4$, 20.7 ± 0.6 лет,) в пробирки с Li-гепарином (12–15 МЕ/мл). Воздействию УФ-излучения подвергали цельную венозную кровь. В серии экспериментов с наночастицами CeO₂ (3 нм) к пробам предварительно был добавлен электростатически стабилизированный золь нанодисперсного CeO₂ (50 мкМ). Синтез наночастиц был проведен на базе ИОНХ РАН им. Н.С. Курнакова.

Анализ радикал-продуцирующей активности нейтрофилов крови проводили хемилюминесцентным (ХЛ) методом с использованием двухстадийного протокола стимуляции клеток с помощью фобол-12-миристан-13-ацетата (ФМА) и *N*-формилметионил-лейцил-фенилаланина (фМЛФ) в присутствии люминола, являющегося зондом, чувствительным к пероксиду водорода и активным формам хлора [3]. В качестве аналитического сигнала была выбрана светосумма (S , усл. ед.) — площадь под ХЛ-кривой за определенный промежуток времени, пропорциональная количеству образовавшихся свободных радикалов.

Получено, что наночастицы CeO₂ оказывают супрессорное действие на спонтанную (без стимулов) хемилюминесценцию нейтрофилов крови (в отсутствие воздействия УФО). Установлено, что для исследованных доз (45 мДж/см² и 135 мДж/см²) УФ-облучение крови в присутствии коллоидного раствора наночастиц CeO₂ приводит к усилению радикал-продуцирующей активности нейтрофилов (без стимулов). Уровень ФМА-стимулированной хемилюминесценции сопоставим с контрольным уровнем свечения. В случае стимуляции клеток добавлением фМЛФ после инкубации с наночастицами CeO₂ наблюдали снижение ХЛ-ответа нейтрофилов по сравнению с контрольными образцами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hamblin M. R. // Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment – 2017. – V. 295.
2. Karen E. Peloia, César A. Contreras Lancherosb, Celso V. Nakamuraa, Sushant Singhc, Craig Nealc, Tamil S. Sakthivelc, Sudpita Sealcd, Suelide Oliveira Silva Lautenschlagera // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces – 2020. –V. 191. – № 111013.
3. Образцов, И. В., Годков, М. А., Полимова, А. М., Дёмин, Е. М., Проскурнина, Е. В., Владимиров, Ю. А. / Оценка функциональной активности нейтрофилов цельной крови методом двухстадийной стимуляции: новый подход к хемилюминесцентному анализу // Российский иммунологический журнал – 2015. – Т. 9. – № 418.

ОБРАБОТКА РАН ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ШИРОКОГО СПЕКТРА

TREATMENT OF WOUNDS WITH HIGH-INTENSITY PULSED OPTICAL RADIATION OF A BROAD SPECTRUM

Багров В.В., Володин Л.Ю., Камруков А.С., Кондратьев А.В.
Bagrov V.V., Volodin L.Yu., Kamrukov A.S., Kondratiev A.V.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, 105005,
2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
E-mail: kamrukov@bmstu.ru*

Сообщается о создании и испытаниях аппарата высокоинтенсивного оптического облучения для терапии ран и раневой инфекции. В качестве источника излучения используется импульсная ксеноновая лампа со сплошным эмиссионным спектром в области 200...1100 нм, пиковой электрической мощностью ~1 МВт и средней электрической мощностью 100 Вт. Показано, что аппарат обладает выраженными бактерицидным и ранозаживляющим действиями и обеспечивает высокие темпы заживления ран.

It is reported about the creation and preclinical testing of a high-intensity optical irradiation apparatus for therapy of wounds and wound infection. A pulsed xenon lamp with a continuous emission spectrum in the region of 200...1100 nm, a peak electrical power of ~ 1 MW and an average electrical power of 100 watts is used as a radiation source. It is shown that the device has pronounced bactericidal and wound-healing effects and provides high rates of wound healing.

Лечение ран различной этиологии и локализации является актуальной задачей современной медицины. Возрастание актуальности данной проблематики в последние годы в значительной степени обусловлено появлением штаммов патогенных микроорганизмов с множественной лекарственной устойчивостью.

Мировые тренды в этой области медицины указывают на перспективность бесконтактных методов воздействия на раны, основанных на физическом воздействии на поврежденные ткани. В этом контексте существенный интерес представляют терапевтические методы с использованием ультрафиолетового (УФ) излучения, биоцидный эффект которого хорошо известен и достаточно широко применяется в санитарной практике (обеззараживание воздуха, воды и т.п.).

В подавляющем большинстве современных УФ установок для антимикробной обработки объектов используются ртутные бактерицидные лампы низкого давления. Они характеризуются монохроматичным спектром излучения (в актуальной УФ области излучается, как правило, одна узкая спектральная линия - 254 нм) и сравнительно низкой интенсивностью облучения объектов ($10^{-6} \dots 10^{-3}$ Вт/см²). Поэтому терапия ран с помощью таких УФ облучателей оказалась недостаточно эффективной и не получила широкого применения в хирургической практике.

Новым подходом к лечению ран является использование мощного импульсного оптического излучения, генерируемого высокотемпературными плазменными лампами. Среди такого типа источников излучения наиболее технологически развитыми являются импульсные ксеноновые лампы. Такие лампы излучают сплошной спектр в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм и позволяют облучать объекты с чрезвычайно высокой интенсивностью, на несколько порядков превышающей интенсивность облучения от самых мощных ртутных ламп.

В работе сообщается о создании аппарата высокоинтенсивного оптического облучения на основе импульсной ксеноновой лампы, реализующего новую медицинскую технологию фототерапии ран. Аппарат состоит из сервисного блока и облучателя. В облучателе использована трубчатая ксеноновая лампа типа ИНП-5/60 с внутренним диаметром кварцевой колбы 5 мм и длиной межэлектродного промежутка 60 мм. Лампа работает в импульсно-периодическом режиме с частотой импульсов 5 Гц и средней электрической мощностью 100 Вт. Лампа установлена по оси конического алюминированного отражателя с выходным кварцевым окном со световым диаметром 50 мм. Габариты сервисного блока - 192x330x142 мм; масса - 6,5 кг. Габариты и масса облучателя - Ø72x298 мм и 0,8 кг соответственно.

Доклинические исследования бактерицидной и ранозаживляющей эффективности аппарата проведены на базе ФГБНУ «НИИ медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова». В качестве объектов исследований *in vitro* выбраны клинически значимые штаммы микроорганизмов: *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* (грам+), *Staphylococcus aureus* и *Streptococcus pyogenes* (грам-). Эксперименты *in vivo* проведены с использованием лабораторных животных - крыс-самцов линии Вистар (45 животных в составе 3-х экспериментальных групп).

В результате проведенных доклинических исследований показано:

- аппарат обладает выраженными антибактериальными (за 10-ти секундный сеанс облучения уровень бактериальной загрязненности поверхности питательной среды по всем видам указанной микрофлоры снижался более чем на 5 десятичных порядков) и ранозаживляющими действиями и в сочетании с мазью «Левомеколь» достоверно обеспечивает более высокие темпы заживления ран по сравнению с применением только официальной мази «Левомеколь»;
- выбранный режим облучения - суточная доза УФ-С излучения 0,3 Дж/см² при интегральной (кумулятивной) дозе коротковолнового УФ излучения за курс терапии 2,4 Дж/см² - не вызывает у лабораторных животных выраженных функциональных и соматических нарушений.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о потенциальной перспективности использования аппарата импульсного высокоинтенсивного оптического облучения в медицинской и ветеринарной практике при лечении и профилактике раневых поражений.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ НА ИХ ФИЗИОЛОГИЮ И СТЕПЕНЬ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

INFLUENCE OF SEED TREATMENT WITH COLD ATMOSPHERIC PLASMA ON THEIR PHYSIOLOGY AND THE DEGREE OF DISINFECTATION

Нафиков М.М.¹, Смирнов С.Г.¹, Хузина Р.Р.¹, Нафиков Ман. Мак.¹
Nafikov M.M.¹, Smirnov S.G.¹, Khuzina R.R.¹, Nafikov Man. Mak.¹

*ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", Казань, Российская Федерация, 420008
E-mail: khuzinaroza@yandex.ru*

Результаты наших исследований показывают, что время обработки плазмой является параметром, который может активировать различные пути защиты растений. Обработка семян гороха напряжением 15 кВ в течение 30 секунд является оптимальным, при этом наблюдается наибольшее энергия прорастания – 87.1, всхожесть 91.8 % и другие параметры. Обработка семян яровой пшеницы напряжением 5 кВ является оптимальным в течение 15 секунд, при этом наблюдается наибольшее энергия прорастания - 99.4, всхожесть 97.8 % и т.д. На окончательном этапе мы получаем обеззараженное, с высокой энергией прорастания и всхожестью высококачественное семяна.

The results of our studies show that plasma treatment time is a parameter that can activate various plant defense pathways. Treatment of pea seeds with a voltage of 15 kV for 30 seconds is optimal, while the highest germination energy is observed - 87.1, germination 91.8% and other parameters. Treatment of spring wheat seeds with a voltage of 5 kV is optimal for 15 seconds, while the highest germination energy is observed - 99.4, germination 97.8%, etc. At the final stage, we get disinfected, high-energy germination and high-quality seeds.

Целью исследований является детальный выбор режимов работы плазматрона в зависимости от вида и физиологического состояния семян, влияние холодной атмосферной плазмы на жизнеспособность и ростовые процессы [1,2,3,4,5].

Исследования проводились на базе Инженерного института ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» в лаборатории «Безопасность жизнедеятельности». В опытах изучались семяна яровой пшеницы сорт «Прохоровка», гороха сорт «Ватан». В опытах использовали устройство для обработки семян холодной атмосферной плазмой собственной разработки [6].

Разработанное нами устройство для обработки семян холодной атмосферной воздушной плазмой, содержит камеру, ионизатор воздуха, вентилятор, соединительный патрубком, загрузочный бункер, ленточный транспортер с возможностью изменения скорости движения, при этом ионизатор воздуха состоит из плазматрона постоянного тока и генератора с регулятором напряжения на электроде до 20 кВ, при этом вентилятор соединен с ионизатором воздуха соединительным патрубком, а ионизатор воздуха соединен с камерой. Способ работы устройства заключается в том, что семяна из загрузочного бункера подают на

ленточный транспортер, при этом регулируют скорость движения ленточного транспортера для регулирования времени обработки семян; далее семена подают в камеру; одновременно в камеру из ионизатора воздуха с помощью вентилятора подают холодную атмосферную воздушную плазму, при этом регулируют напряжение на электроде генератора ионизатора воздуха до 20 кВ; при этом происходит процесс обработки семян холодной атмосферной воздушной плазмой.

В зависимости от пораженности семян патогенами, рекомендуется использовать различные меры воздействия плазмой с соблюдением времен. интервала.

Результаты обработки семян показывают:

- оптимальными параметрами предпосевной обработки семян гороха холодной атмосферной воздушной плазмой являются напряжение 15 кВ;
- оптимальными параметрами предпосевной обработки семян яровой пшеницы холодной атмосферной воздушной плазмой являются напряжение 5 кВ и время обработки 15 сек.

На выходе из устройства получают обеззараженные, готовые к посеву семена зерновых и зернобобовых культур с высокой энергией прорастания и всхожестью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеев Ю.А. Плазменные технологии в сельском хозяйстве – основа рационального природопользования / Гордеев Ю.А., Юлдашев Р.З. // Вестник Таджикского технического университета – 2011. – № 3. – С. 57–62.
2. Острошенко, В.В. Влияние предпосевной обработки семян стимуляторами роста на их посевные качества / В.В. Острошенко, Л.Ю. Острошенко // Вестник Красноярского государственного аграрного университета – 2011. – № 5. – С. 12–15.
3. Смирнов С.Г. Урожайность семян сои в лесостепи Поволжья при разных приёмах возделывания / С.Г. Смирнов, М.М. Нафиков, В.Н. Фомин // Кормопроизводство – 2014. – № 1. – С. 17–19.
4. Кашапов Н.Ф. Предпосевная обработка семян низкотемпературной атмосферной воздушной плазмой / Р.Н. Кашапов, Мак. М. Нафиков, Р.Р. Хузина, Ман. М. Нафиков, С.Г. Смирнов // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий: сборник статей XIII Международной научно-технической конференции (Казань, 2–4 ноября 2021 г.). – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – С. 111-114.
5. Maxime Bafail. Effects of dielectric barrier ambient air plasma on two brassicaceae seeds: *Arabidopsis thaliana* and *Camelina sativa* / Mohammed Yousfi, Christophe Dunand, Nofel Merbahi // Int. J. Mol. Sci. 2021, 22, 9923.
6. Патент. Устройство для обеззараживания семян холодной атмосферной воздушной плазмой и способ его работы / Кашапов Н.Ф., Нафиков М.М., Смирнов С.Г., Нафиков Ман. Мак. // RU (11) 2 781 971 (13) C1.

ФУНГИЦИДНАЯ ОБРАБОТКА УПАКОВАННЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

FUNGICIDAL TREATMENT OF PACKAGED BAKERY PRODUCTS WITH BROADBAND PULSED OPTICAL RADIATION

Багров В.В., Володин Л.Ю., Камруков А.С., Кондратьев А.В.,
Полевой Д.Е., Федоров А.Д.
Bagrov V.V., Volodin L.Y., Kamrukov A.S., Kondratiev A.V.,
Polevoi D.E., Fedorov A.D.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, 105005,
2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
E-mail: polevojdaniil@gmail.com*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности оптического излучения импульсной ксеноновой лампы в отношении фунгицидной обработки хлебо-булочных изделий в герметичной пластиковой упаковке с целью увеличения сроков их хранения. Показано, что облучение исследованных образцов в режиме с интегральной дозой широкополосного оптического излучения (200...1100 нм) 10 Дж/см² и дозой коротковолнового УФ излучения 0,6 Дж/см² позволяет в несколько раз увеличить сроки их хранения по сравнению с необработанными образцами.

The paper presents the results of experimental studies of the effectiveness of optical radiation of a pulsed xenon lamp in relation to the fungicidal treatment of bakery products in sealed plastic packaging in order to increase their shelf life. It is shown that irradiation of the studied samples in the mode with an integral dose of broadband optical radiation (200...1100 nm) of 10 J/cm² and a dose of short-wave UV radiation of 0.6 J/cm² allows several times to increase their shelf life compared with untreated samples.

Объектом исследований являлись образцы хлебобулочных изделий пяти типов, общее количество изделий составило 200 единиц по 40 образцов каждого типа. Образцы изделия №1 (хлеб без глютена), изделия №2 (кексы), изделия №3 (хлеб подовый темный, вид 1) и изделия №4 (хлеб подовый темный, вид 2) герметично упакованы в полипропиленовую двухосно-ориентированную плёнку 5PP толщиной 48 мкм, а образцы изделия №5 (хлеб подовый темный, вид 3) - в многослойную пленку толщиной 70 мкм (код 7other). В спектральной области максимальной биоцидной эффективности $\lambda \approx 265 \pm 10$ нм упаковочные пленки имеют прозрачность 70...80%, что позволило провести биоцидную УФ обработку продуктов в упакованном виде.

Экспериментальная установка представляла из себя прямоугольную камеру с размерами Д×Ш×В=210×575×300 мм, внутренние стенки которой облицованы алюминиевой фольгой. Внутри камеры установлена импульсная трубчатая ксеноновая лампа с длиной межэлектродного промежутка 250 мм, внутренним диаметром кварцевой колбы 11 мм и начальным давлением ксенона 400 мм рт. ст.

Питание лампы осуществлялось от конденсаторной батареи емкостью 200 мкФ с зарядным напряжением 1,8 кВ.

Образцы изделий каждого типа разбивались на 4 группы по 10 экземпляров в каждой. Группа 1 получила суммарную дозу излучения в коротковолновом УФ диапазоне (200...300 нм) 0,12 Дж/см², группа 2 – 0,6 Дж/см², группа 3 – 1,2 Дж/см². Суммарная доза в интегральном спектре составила 2 Дж/см², 10 Дж/см² и 20 Дж/см² соответственно. Контрольная группа не облучалась.

По окончании цикла облучения все образцы хлебобулочных изделий отправлялись в зону хранения, где поддерживалась температура воздуха $t=22,7\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, влажность – $30\pm 8\%$. Наблюдение за образцами проводилось в течение 14 суток при ежедневном визуальном мониторинге и фотофиксации. При наличии наблюдаемой невооруженным глазом первой колонии плесневых грибов образец считался испортившемся.

Эксперименты проведены совместно с ООО "Здоровый хлеб" (г. Санкт-Петербург). Сводка основных полученных результатов по срокам хранения исследованных образцов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Сроки хранения обработанных и необработанных образцов хлебобулочных изделий по показателю пригодности 100% в партии

Изделие	Срок хранения образцов, дней			
	Контроль	Группа	Группа	Группа 3
№1 - Хлеб без глютена				4
№2 - Кексы				12
№3 - Хлеб подовый темный вид 1*)				>
№4 - Хлеб подовый темный вид 2				10
№5 - Хлеб подовый темный вид 3				8

*) Изделие №3: ни один образец при обработке на режимах 2 и 3 не заплесневел на 14-й день;

Как видно из таблицы 1, облучение исследованных образцов хлебобулочных изделий в режиме 2 с интегральной дозой коротковолнового УФ излучения 0,6 Дж/см² позволило заметно увеличить сроки их хранения по сравнению с необработанными образцами. Увеличение энергетической дозы в два раза (режим 3) не дало существенного увеличения эффекта. Визуально изменений облученных образцов по сравнению с исходными не наблюдалось.

Таким образом, в результате проведенного исследования показано, что широкополосное оптическое излучение импульсной ксеноновой лампы обладает выраженным фунгицидным действием и способно ингибировать развитие плесневых грибов на хлебобулочных изделиях, даже при их обработке в упакованном виде при использовании широко применяемых упаковочных полимерных материалов.

Авторы выражают благодарность В.В Долгих и А.Ю. Ландышевой за помощь в работе.

ВЛИЯНИЕ ПОТОКА ИОНОВ АЗОТА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ НА БИОСОВМЕСТИМОСТЬ МЕДИЦИНСКОГО ПОЛИУРЕТАНА

INFLUENCE OF HIGH-ENERGY NITROGEN ION FLUX TO THE BIOCOMPATIBILITY OF MEDICAL POLYURETHANE

Чудинов В.С.¹, Шардаков И.Н.¹, Солодников С.Ю.², Литвинов В.В.³, Кондюрин
А.В.⁴

Chudinov V.S.¹, Shardakov I.N.¹, Solodnikov S.Y.², Litvinov V.V.³, Kondyurin
A.V.⁴

¹*ИМСС УрО РАН, Россия, 614013*

²*ПНИПУ, Россия, 614990*

³*ПГМУ, Россия, 614990*

⁴*Университет Сиднея, Австралия, 2006*

E-mail: Chudinovsl@mail.ru

Полиуретановые эндопротезы широко используются в медицине. Однако, как и все искусственные имплантаты они вызывают реакцию на инородное тело при вживлении в организм. В работе предлагается модифицировать поверхность полиуретана ионным потоком для улучшения его биосовместимости. После облучения полиуретана ионами азота высокой энергии на поверхности формируется углеродный нанослой. В эксперименте на животных продемонстрирована менее выраженная реакция на инородное тело для обработанного ионным пучком полиуретана при сравнении с необработанным.

Polyurethane endoprostheses are widely used in medicine. However, like all artificial implants, they cause a foreign body reaction. The paper proposes to modify the surface of polyurethane with an ion beam to improve its biocompatibility. After irradiation of polyurethane with high-energy nitrogen ions, a carbon nanolayer is formed on the surface. In animal trial, less pronounced foreign body reaction has been demonstrated for ion beam treated polyurethane compared to untreated ones.

Применение полиуретановых эндопротезов в организме человека позволяет решить множество проблем с замещением или улучшением функциональности органов. Они широко используются в медицине из-за их биологической инертности, низкой токсичности и широкого спектра механических свойств – от жестких изделий для замещения дефектов костей до тонкостенных пленочных оболочек эндопротезов с различными наполнителями для замещения мягких тканей [1-3].

Однако, как и все искусственные материалы, полиуретаны при внедрении в живой организм вызывают реакцию на инородное тело. В результате данной реакции эндопротез изолируется плотной соединительно-тканной капсулой в организме, в которой накапливаются ионы кальция. Это приводит к деформации эндопротеза, препятствует выполнению его функций и часто требует его замены.

Для решения проблемы реакции на инородное тело в работе было предложено модифицировать поверхность полиуретановых имплантатов пучком ионов азота высокой энергии [4-6]. Исследовался полиуретан, синтезированный по литьевой технологии в лабораторных условиях, обработанный методом плазменно-иммерсионной ионной имплантации при энергии ионов 20 кэВ в диапазоне флюенсов от 5×10^{14} до 10^{16} ион/см².

В работе продемонстрировано, что воздействие потока ионов азота позволяет сформировать на поверхности полиуретана графито- и алмазоподобный углеродный нанослой, за счет фракционирования и разрезания молекулярной цепи полимера, сшивки или образования поперечных связей из-за взаимодействия образованных свободных радикалов. При этом некоторое количество неспаренных электронов из-за стерических затруднений и их стабилизации в пи-электронном облаке образованных поликонденсированных ароматических структур, сохраняют свою активность в нанослое долгое время – дни, недели месяцы в зависимости от энергии и дозы ионов, а также полимерной структуры и условий хранения. Наличие неспаренных электронов улучшает смачиваемость поверхности полиуретана, а также позволяет адсорбировать белки организма с их ковалентной пришивкой к поверхности полимера с сохранением их биологической активности. В результате, на модифицированной ионным пучком поверхности полиуретана клеточные культуры лучше пролиферируют, чем на необработанном полиуретане. А в экспериментах на животных показана менее выраженная реакция на инородное тело для модифицированного полиуретана при сравнении с необработанным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-48-596014 р_НОЦ_Пермский край и в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.S. Ward, R.L. Jones // *Comprehensive biomaterials* –2011. – V. 1. – №431.
2. D.J. Wheatley, L. Raco, G.M. Bernacca, I. Sim, P.R. Belcher, J.S. Boyd // *European Journal of Cardio-thoracic Surgery* – 2000. –V. 17. – №440.
3. N.R. James, J. Philip, A. Jayakrishnan // *Biomaterials* – 2006. – V. 27. – №160.
4. В.В. Оджаев, И.П. Козлов, В.Н. Попок, Д.В. Свиридов. *Ионная имплантация полимеров*. Белгосуниверситет, Минск, 1998.
5. A. Kondyurin, M. Bilek. *Ion Beam Treatment of Polymers. Application aspects from medicine to space. Second Edition*. Elsevier, Oxford, 2014.
6. V. Chudinov, I. Kondyurina, V. Terpugov, A. Kondyurin // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* – 2019. – V. 440 – №163.

Секция 11

ПЛАЗМОДИНАМИКА, ПЛАЗМЕННЫЕ И ИОННЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОТИПА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON THE PROTOTYPE OF ION ENGINE CHARACTERISTICS OPERATING ON AN AIR BLEND

Дудин В.С.¹, Задириев И.И.¹, Кралькина Е.А.¹, Швыдкий Г.В.¹, Вавилин К.В.¹,
Никонов А.М.¹, Маринин С.Ю.², Бондаренко Д.А.²
Dudin V.S.¹, Zadiriev I.I.¹, Kralkina E.A.¹, Shvydkiy G.V.¹, Vavilin K.V.¹, Nikonov
A.M.¹, Marinin S.Yu.², Bondarenko D.A.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники, Россия, 119991

²АО «Корпорация «ВНИИЭМ»), Россия, 107078

E-mail: vsd97@list.ru

Ионные двигатели – одни из самых перспективных кандидатов для создания сети малых спутников, летающих на сверхнизких орбитах (~200 км) при наличии остаточной атмосферы, что является приоритетной задачей в современной космической отрасли. В данной работе исследованы рабочие характеристики 10-сантиметрового источника ионов, работающего на газах, преобладающих на сверхнизких орбитах – азот, кислород и их смеси с инертными газами. Магнитное поле использовалось для оптимизации рабочих параметров источника.

Ion thrusters are one of the most promising candidates for creating a network of small satellites flying in ultra-low orbits (~200 km) in the presence of a residual atmosphere, which is a priority task in the modern space industry. In this paper, the performance characteristics of a 10-centimeter ion source operating on gases prevailing in ultra-low orbits – nitrogen, oxygen and their mixtures with inert gases – are investigated. The magnetic field was used to optimize operating parameters of the source.

Высокочастотные источники ионов (ВЧИИ) широко используются в наземных и космических технологиях. На земле ВЧИИ применяются в процессах чистки и поверхностной модификации материалов, процессах ионного стимулирования при напылении тонких пленок. В космосе ВЧИИ применяются для создания тяги, позволяющей управлять ориентацией космических аппаратов (КА), компенсировать потери их скорости в результате трения, изменять высоту орбиты.

Перспективным направлением развития космической техники является использование спутников малой массы, характерным примером применения которых являются телекоммуникационные спутники, космические аппараты (КА) для проведения дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и других научных исследований. Использование подобных КА на сверхнизких орбитах (~200 км) позволит в разы улучшить их целевые характеристики [1]: быстродействие систем связи, точность работы измерительной аппаратуры, широкий охват поверхности Земли сетью спутников за счёт экономической выгоды вывода КА на сверхнизкие орбиты (СНО).

Одно из основных преимуществ СНО – оно же и главная проблема – остаточная атмосфера, приводящая к быстрой потере высоты и выходу из строя спутника. При этом необходимость их освоения возрастает с каждым днём, особенно

на фоне постепенного переполнения геостационарной орбиты. Инновационным и эффективным решением задачи по организации стабильного полёта на СНО является оснащение КА электроракетным двигателем (ЭРД), способным эффективно компенсировать потери скорости.

Однако расчеты показывают, что запасы топлива, необходимые для долговременной работы КА на высотах 180-200 км, неоправданно велики [2]. В связи с этим в мире интенсивно ведутся работы по созданию устройств забора атмосферных газов (УЗАГ), сопряженных с ЭРД. Поток газов, поступающих в ЭРД из УЗАГ, должен обеспечить создание тяги, необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы. Появляется потребность в разработке эффективных ВЧ ИИ, работающих на газах, типичных для земной атмосферы на расстоянии от Земли 180-200 км [3] или их смеси с инертными газами.

В настоящей работе поставлена задача изучить возможности оптимизации ВЧ ИИ при их работе на аргоне, азоте, кислороде и их смесях. В качестве модели ВЧ ИИ использовался индуктивный источник ионов диаметром 10 см. Для улучшения рабочих характеристик на индуктивный ВЧ разряд накладывалось внешнее магнитное поле (МП), величина которого выбиралась из условия максимальной ионного тока. В ходе работы для исследуемых газов получены такие характеристики как кривые постоянного тока при оптимальном МП, зависимость извлекаемого ионного тока от величины прикладываемого магнитного поля. Результаты экспериментов сопоставлены с расчетами.

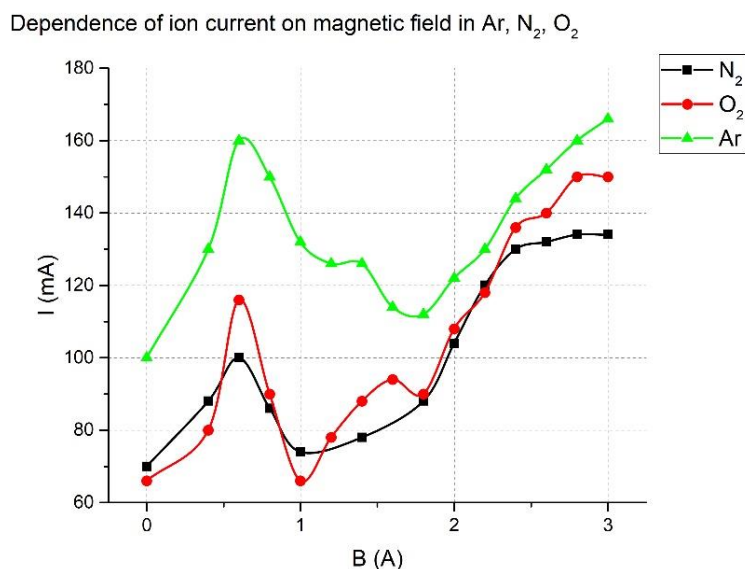


Рис. 1. Зависимость ионного тока от приложенного магнитного поля при фиксированном расходе газов. Расход $f_{O_2} = f_{N_2} = 12$ мл/мин, $f_{Ar} = 10$ мл/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Suvorov M., Syrin S., Khartov S., Popov G. // Advances in the Astronautical Sciences – 2017. –V. 161.
2. Larson W. J., Wertz J. R. / Space mission analysis and design. (1999).
3. Cifali, G. // 32nd International Electric Propulsion Conference. – 2011. – № 11-15.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ: ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

IMPROVMENT THE EFFICIENCY OF PLASMA MASS SEPARATION: OPTIMIZATION OF THE POTENTIAL AND ANALYSIS OF MOTION PECULARITIES OF CHARGED PARTICLES

Ойлер А.П., Усманов Р.А., Гавриков А.В., Смирнов В.П.
Oiler A.P., Usmanov R. A., Gavrikov A.V., Smirnov V.P.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Россия, 125412

E-mail: andrey_oiler@mail.ru

В работе представлен анализ движения траекторий заряженных частиц в скрещенных однородном магнитном и радиальном электрическом полях в процессе плазменной сепарации веществ. На основе этого анализа была определена математическая процедура, которая позволяет получать зависимость азимутального угла осаждения ионов на подложку от их массы по радиальной зависимости потенциала плазмы и обратно.

The paper presents an analysis of the motion of the trajectories of charged particles in crossed homogeneous magnetic and radial electric fields. Based on this analysis, a mathematical method was obtained that allows us to obtain the dependence of the azimuthal angle of deposition of ions on the substrate on their mass by the radial dependence of the plasma potential and vice versa.

Плазменная масс-сепарация в перспективе является современным методом переработки отработавшего ядерного топлива, в результате которого не образуется жидких радиоактивных отходов, которые затруднительно утилизировать. Как показали недавние экспериментальные работы [1] при сепарации ионов в отрицательном разряде с термоэмиссионным катодом области осаждения разных элементов на подложку частично перекрываются. Перекрытие возникает в результате увеличения α -эмитанса плазменных пучков компонент смеси. Среди возможных факторов, вызывающих увеличение, могут быть: разброс частиц по начальным скоростям и начальной координате, искажение радиального профиля потенциала плазмы в результате инжекции разделяемого вещества или флуктуаций потенциала плазмы [2,3].

В данной работе было проведено исследование траекторий движения заряженных частиц с разным значением отношения заряда к массе. Для этого рассматривался аксиально симметричная конфигурация, в котором однородное магнитное поле направлено вдоль оси симметрии, а электрическое поле перпендикулярно к нему и направлено к оси симметрии. Все частицы начинают движение из одной точки с некоторой начальной скоростью.

Было обнаружено, что в аксиально симметричном потенциале наиболее сильное влияние на траекторию движения частицы оказывает характер потенциала в окрестности самой близкой к оси симметрии точки траектории - перицентре. Также было определено, что по зависимости перицентра траектории частицы от массы можно восстановить радиальную зависимость потенц. плазмы.

На основе этого анализа была получена интегральная связь между зависимостью азимутального угла осаждения частиц от их массы и радиальной зависимостью потенциала. При отсутствии компоненты начальной скорости ионов, перпендикулярной магнитному полю, интегральная связь сводится к обратному преобразованию Абеля. В итоге была получена методика, с помощью которой можно по желаемому распределению ионов разных масс на собирающей подложке получить требуемое для этого радиальное распределение потенциала.

В целях увеличения эффективности плазменной сепарации было найдено семейство потенциалов плазмы, которые минимизируют разброс осаждаемых частиц на собирающей подложке.

Исследование было выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-19-00716, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00716/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Liziakin, G., et al. / "Experimental demonstration of plasma mass separation in a configuration with a potential well and crossed electric and magnetic fields." // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2021. – V.63. – №032002.
2. Liziakin, G., et al. / "Plasma mass separation in configuration with potential well." // Journal of Physics D: Applied Physics – 2021. –V. 54 – №414005.
3. Liziakin, G., A. Gavrikov, V. Smirnov. / "Negative electric potential in a cylindrical plasma column with magnetized electrons." // Plasma Sources Science and Technology – 2020. – V.29 – №015008.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СО СДВОЕННЫМ ПОЛЮСОМ

Федянин Н.К., ¹Кравченко Д.А.

АО ГНЦ “Центр Келдыша”, г. Москва, Россия

Ионный двигатель (ИД) – это один из наиболее распространенных типов электроракетных двигателей (ЭРД) обладающий высокими характерными значениями удельного импульса и ресурса. Основными составными частями ИД являются газоразрядная камера (ГРК) в которой образуется плазма, ионно-оптическая система, (ИОС) которая извлекает из плазмы и ускоряет ионы, создавая тягу, и нейтрализатор, который эмитирует в пучок ионов электроны компенсируя его положительный заряд.

Целью текущей работы является повышение плоскостности пучка ИД, методом совершенствования существующих схем ГРК, при сохранение достигнутых ранее параметров энергетической эффективности двигателя. Сложность разработки ГРК заключается в основном в проектировании магнитной системы и описывается следующим противоречием: для получения высоких параметров эффективности как минимум все анодные поверхности ГРК необходимо экранировать замкнутым контуром индукции магнитного поля, при этом для обеспечения лучшей плоскостности пучка присутствие магнитных полей вблизи ИОС не желательно. Учитывая то, что анодные поверхности примыкают практически вплотную к ИОС, разработать магнитную систему, полностью удовлетворяющее обоим требованиям крайне сложно.

Так как в общем случае для повышения плоскостности пучка необходимо добиться в первую очередь однородности плазмы именно вблизи ИОС, то особое значение имеет часть магнитной системы, находящаяся к ней в непосредственной близости. В текущей работе оптимизация магнитного поля осуществлялась внесением в ГРК вблизи ИОС магнитного квадруполья, состоящего из двух кольцевых постоянных магнитов. Данное решение позволяет создать высокий градиент индукции магнитного поля, так как линии напряженности, выходящие из полюса одного магнита, замыкаются через полюс другого, вместо того чтобы распространяться вглубь ГРК.

Для проведения сравнительной оценки параметров эффективности разработанных с использованием оригинального решения схем использовались базовые ГРК аналогичного типоразмера. Сравнительная оценка проводилась методом численного моделирования, на примере ИД с диаметром перфорированной области ИОС 100 и 200 мм.

РЕЖИМЫ ЗАПУСКА ДВУНАПРАВЛЕННОГО ВОЛНОВОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ, РАБОТАЮЩЕГО НА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ

STARTING MODES OF BI-DIRECTIONAL WAVE PLASMA SOURCE OPERATED IN MOLECULAR GASES

Шумейко А.И.¹, Телех В.Д.¹

Shumeiko A.I.¹, Telekh V.D.¹

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,*

Москва, Российская Федерация

E-mail: shumeiko@bmstu.ru

Представлены экспериментальные результаты исследования режимов запуска многонаправленного источника плазмы, работающего на молекулярных газах. На основании полученных результатов установлено, что снижение порога ВЧ пробоя происходит с увеличением постоянного магнитного поля. Согласно теории, такая зависимость обусловлена влиянием магнитного поля на поперечную и продольную оси газоразрядной камеры диффузию электронов и азимутальные масс-колебания электронов в ВЧ поле.

The experimental results of starting modes study of a multidirectional plasma source operated in molecular gases are reported. Based on the results, the decrease in rf breakdown threshold is associated with an increase of steady magnetic field. According to a theory, such dependence is caused by the magnetic field influence on the electron transverse and longitudinal to the gas discharge chamber axis diffusion and azimuthal mass-vibrations of electrons in a radiofrequency field.

Инициирование волновых разрядов низкого давления – высокочастотных разрядов, помещенных в постоянное внешнее магнитное поле – важно для обширных исследований низкотемпературной плазмы и технических применений. В частности, источники волновых разрядов предлагается использовать в волновых плазменных двигателях, способных создавать векторы тяги в нескольких направлениях [1,2]. Несмотря на то, что высокочастотный пробой в газах низкого давления является хорошо изученным явлением [3,4], существуют еще малоизученные конфигурации высокочастотного и внешнего постоянного магнитного поля. В частности, малоизученной конфигурацией является высокочастотный пробой в газах низкого давления при высокочастотном поле, созданным полувитковой антенной – создающей поперечное стенкам газоразрядной камеры электрическое поле – и внешнем постоянном магнитном поле, параллельном оси газоразрядной камеры. Такая конфигурация полей предлагается к использованию в двунаправленном волновом источнике плазмы, способным создавать потоки плазмы минимум в двух направлениях.

Исследования режимов газового пробоя в двунаправленном волновом источнике плазмы проводились с целью определения режимов запуска источника

плазмы для применения в многовекторной ракетной двигательной установке. В исследуемом двунаправленном волновом источнике плазмы возможно изменять величину индукции внешнего постоянного магнитного поля, расход рабочего тела, высокочастотный ток в антенне и диаметр выходных отверстий газоразрядной камеры. Величина индукции магнитного поля регулируется при помощи постоянного тока, подводимого к катушкам магнитной системы источника в диапазоне 0.5...5 А. Расход рабочего тела регулируется в диапазоне 20...200 сссм. Высокочастотный ток – частотой 13.56 МГц – в антенне регулируется в диапазоне 0...20 А. Диаметр выходных отверстий газоразрядной камеры регулируется в диапазоне 3...10 мм. Динамическое давление в вакуумной камере, в которую помещается двунаправленный волновой источник плазмы, составляет 10^{-3} Тор при расходе N_2 , $N_2 + O_2$, O_2 в 200 сссм.

По результатам экспериментов, получены режимы газового пробоя в двунаправленном волновом источнике плазмы. Минимальное значение напряженности электрического поля, необходимое для высокочастотного пробоя N_2 в двунаправленном волновом источнике плазмы составляет 1000 В/м. Обнаружено уменьшение порога пробоя при увеличении величины индукции магнитного поля при данной диафрагме. Теоретически показано, что такая зависимость наблюдается вследствие влияния магнитного поля на коэффициент поперечной диффузии электронов. Обнаружено уменьшение порога пробоя при увеличении диаметров выходных отверстий газоразрядной камеры. Обнаружена величина индукции магнитного поля, при которой пробойная напряженность поля не зависит от расхода в рассматриваемой области расходов. Определено, что магнитное поле влияет на порог пробоя при условии, что отношение Ларморовской частоты к частоте столкновений электрон-нейтрал больше единицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Shumeiko, V.D. Telekh, V.I. Mayorova // Acta Astronautica 2022. – V. 191. – P. 431-437.
2. A.I. Shumeiko, V.D. Telekh, S.V. Ryzhkov // Symmetry – 2022. – V. 14. – I. 10. – № 1983.
3. T. Kihara // Rev. Modern Phys. – 1952. – V. 24. – № 45.
4. H.B. Smith, C. Charles, R.W. Boswell // Phys. Plasm., 10(3) (2003) P.875-881.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБОЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕКЦИОННОЙ ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ

Дьяков А.А., Амосов М.П., Лобастов И.А., Артемов В.А.

АО ГНЦ “Центр Келдыша”, Москва РФ

E-mail: andrej.dyakov.1998@mail.ru

Исследования электрических пробоев в газах при низких давлениях в магистральных подачи рабочего тела (РТ) представляют интерес при разработках электроракетных двигателей (ЭРД), в особенности ЭРД с повышенным удельным импульсом и, соответственно, напряжением разряда [1]. Гальваническая изоляция между высоковольтными и низковольтными элементами системы подачи РТ осуществляется за счет газоелектрических развязок (ГЭР) [2]. Возникновение электрического пробоя газового промежутка ГЭР может нарушить нормальную работу ЭРД, либо вывести его из строя.

Пробой газа описывается законом Пашена [3,4], определяющим зависимость пробойного напряжения от произведения давления p и расстояния между электродами L . Однако, в ряде работ экспериментально было обнаружено, что при одинаковых значениях pL напряжение газового пробоя в случае разрядного промежутка большей длины с плоскими электродами оказывалось заметно выше, чем в случае короткого промежутка [5]. Таким образом, закон Пашена не применим для описания пробоя в ГЭР, так как в длинных разрядных трубках межэлектродное расстояние значительно превышает размеры электродов.

Для ЭРД высокой мощности с большими расходами была разработана секционная ГЭР, позволяющая увеличить электрическую прочность газового промежутка по сравнению с классическими стеклянными трубками. Конструктивно лабораторная модель развязки представляет собой цилиндрический изолятор, состоящий из 15 диэлектрических шайб из полиэфиркетона, между которыми установлены тонкие металлические сетки. Наличие сеток позволяет равномерно снизить электрический потенциал внутри газового промежутка и тем самым увеличить электрическую прочность конструкции, что было продемонстрировано в работе [6].

Для реализации гидравлических и пробойных испытаний были разработаны экспериментальная установка, обеспечивающая проведение испытаний ГЭР в условиях приближенным к натурным условиям эксплуатации, и источник питания, обеспечивающий пушечную подачу высоковольтного напряжения до 10 кВ с фронтом подачи 150 - 200 мс.

Разработанный лабораторный макет ГЭР состоял из 15 секций. В результате гидравлических испытаний было выявлено, что при расходе ксенона вплоть до 10 мг/с градиент давления внутри развязки составлял от 1247 до 1402 Па (рисунок 1), что соответствует требованиям эксплуатации ЭРД повышенной мощности. Пробойные испытания позволили определить, что развязка способна выдерживать напряжение до 8 кВ при рабочем расходе ксенона 10 мг/с, однако с дальнейшим его понижением напряжение пробоя падало (рисунок 2). Стоит отметить, что при расходе ксенона менее 5 мг/с пробойное напряжение зафиксировать не удалось, так как разряд зажигался в длинной диэлектрической трубке на выходе из развязки.

На данном этапе исследования не кончаются. Необходимо разработать экспериментальную оснастку для максимально точной имитации работы ГЭР в составе ЭРД повышенной мощности. Также требуется получить зависимость величины напряжения пробоя газового промежутка по отношению к количеству секций развязки.

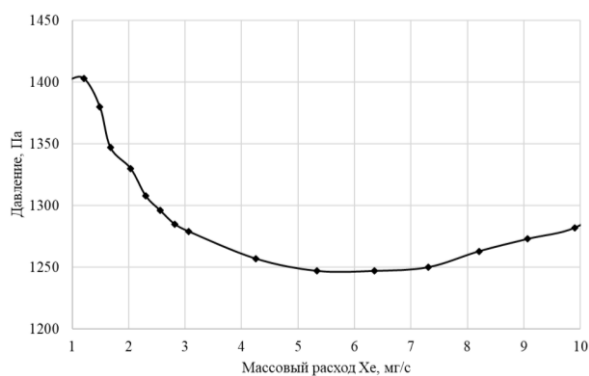


Рис. 1. Гидравлическое сопротивление секционной ГЭР

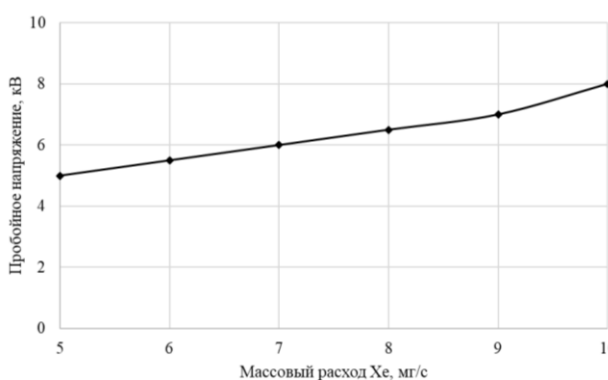


Рис. 2. Пробойная характеристика секционной ГЭР

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Гопанчук, М. Ю. Потапенко / Исследование условий электрического пробоя в проточной части электрических изоляторов систем подачи рабочего тела электрореактивных двигателей // Вестник БФУ им. И. Канта – 2010. – №4. – С. 131-137.
2. Патент РФ №2703848, кл. H01J 27/00, F03H 1/00.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: учеб. руководство. М., 1987.
4. Paschen F. Veber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz // Annalen der Physik und Chemie.– 1889.–V. 37. – № 5.– P. 69–96.
5. Лисовский В.А., Коваль В.А. Пробой газа в постоянном электрическом поле в длинных разрядных трубках // Вестник Харьковского университета. Сер. Физика: Ядра, частицы, поля – 2010. – № 887. – В. 1(45). – С. 74–80.
6. Hart, S.L., et al. “Investigation and Development of a High Voltage Propellant Isolator for Ion Thrusters,” IEPC–2005–316, International Electric Propulsion Conference – 2005.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО
ПЛАЗМЕННОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ**

**RESEARCH OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF AN ABLATIVE
PULSED PLASMA MICROTHRUSTER**

Подлосинская А.П., Полевой Д.Е., Павлов А.В., Володин Л.Ю., Телех В.Д.
Podlosinskaya A.P., Polevoi D.E., Pavlov A.V., Volodin L.Y., Telekh V.D.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, 105005,
2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
E-mail: apodlosinskaya@yandex.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований оптического излучения абляционного импульсного плазменного микродвигателя (микро-АИПД) в среде высокого вакуума. Проведен анализ спектра излучения плазмы при различных электротехнических параметрах разрядного контура. Проанализирован состав плазменного потока микро-АИПД, приведены рекомендации к выбору состава материала альтернативного рабочего тела.

The paper presents the results of experimental studies of optical radiation of an ablative pulsed plasma microthruster (micro-APPT) in a high vacuum environment. The analysis of the spectrum of plasma radiation at various electrical parameters of the discharge circuit is carried out. The composition of the plasma flow of micro-APPT is analyzed, recommendations are given for choosing the composition of the material of an alternative propellant.

Абляционный импульсный плазменный микродвигатель (микро-АИПД) – один из перспективных видов двигателей для применения на спутниковых платформах стандарта *CubeSat* [1-3]. Тяговые характеристики микро-АИПД зависят от электротехнического контура двигателя [4], а также состава материала рабочего тела. Потребляемая мощность микро-АИПД расходуется на абляцию, ионизацию, ускорение и излучение продуктов абляции рабочего тела. Актуальной является задача исследования и оптимизации характеристик микро-АИПД при малой потребляемой энергии [5], одним из методов изучения которых является спектральная диагностика.

В работе исследовался лабораторный образец коаксиального микро-АИПД с отношением диаметров электродов 13 мм/3 мм, материал анода – медь, катода – вольфрам, рабочего тела – фторопласт-4. Питание микродвигателя осуществлялось от конденсаторной батареи емкостью 5 мкФ, с зарядным напряжением от 1 до 2 кВ, что соответствовало вкладываемой энергии от 2,5 до 10 Дж. Микро-АИПД располагался внутри вакуумной камеры объемом 0,1 м³, в которой поддерживалось давление 10⁻³ Па.

Измерение электротехнических характеристик проводилось при помощи пояса Роговского и высоковольтных щупов НВП-15НФ, подключенных к цифровому осциллографу Tektronix TDS 2024В. Измерение спектральных характеристик проводилось при помощи спектрометра Solar S100 (200 – 1100 нм, разреше-

ние $\delta \sim 1$ нм) в фронтальном и боковом направлениях. Волокно спектрометра располагалось вне объема вакуумной камеры, наблюдение плазменной струи осуществлялось через смотровое окно камеры. Динамические спектральные характеристики измерялись набором узкополосных фотоприемников, работающих в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах. Интегральные по времени спектры излучения разряда микро-АИПД при разных разрядных напряжениях представлены на рисунке 1.

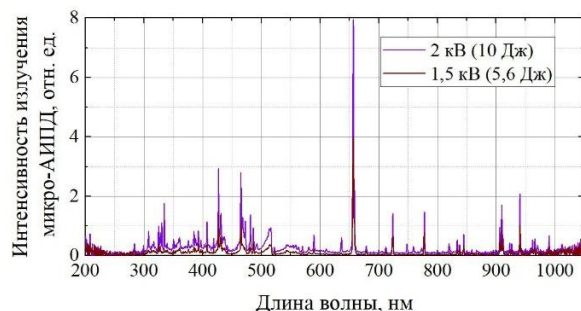


Рис. 1. Спектральная интенсивность излучения микро-АИПД

Как видно из полученных спектров, излучение носит в основном линейчатый и полосатый характер (~90% от общего энергетического выхода излучения), что говорит об оптической полупрозрачности плазмы. В плазменном потоке присутствуют ионы С и газофазные молекулы C_2 , также присутствуют спектральные линии продуктов эрозии электродов. Сплошной спектр соответствует профилю АЧТ с максимумом в спектральной области 350-450 нм. Цветовая температура, определенная методом спектральной пирометрии, составляет ~ 7500 К.

Таким образом, проведены исследования спектрального состава излучения микро-АИПД, проанализирован состав плазменного потока и определены спектральные температуры. В докладе дополнительно рассмотрено влияние фтора на характеристики микро-АИПД и динамические спектральные характеристики плазменного потока.

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Z. Zhang, W. Y. Liang, et al. / A review of the characterization and optimization of ablative pulsed plasma thrusters // *Reviews of Modern Plasma Physics* 2019. – №3 – P.34.
- 2 Шумейко А.И., Пашаев А.Д., Телех В.Д. / Определение минимального размера малого космического аппарата стандарта CubeSat для возможности использования современных двигательных установок // *Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и др.* – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2021. – Т. 1. – С. 269 – 272.
- 3 O'Reilly, D., Herdrich, G., & Kavanagh, D. F. / *Electric Propulsion Methods for Small Satellites: A Review* // *Aerospace* – 2021. –V. 8. – № 22.
- 4 Гришин, С.Д. / Электрические ракетные двигатели // С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов – М. : Машиностроение – 1975. – 272 с.
- 5 Федорова Д.К., Егошин Д.А., Телех В.Д. / К определению оптимального режима работы абляционного импульсного плазменного двигателя в области малых энергий // *Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и др.* – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2022. – Т. 1. – С. 292 – 294.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ

DISCHARGE CHANNEL GEOMETRY INFLUENCE ON ABLATIVE PULSED PLASMA THRUSTER CHARACTERISTICS

Федорова Д.К., Егошин Д.А., Скорняков В.М., Телех В.Д.
Fedorova D.K., Egoshin D.A., Skornyakov V.M., Telekh V.D.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
E-mail: fedorovadk@bmstu.ru*

Рассматривается влияние геометрии разрядного канала абляционного импульсного плазменного двигателя на его тяговые характеристики. Также рассматривается два варианта работы разрядного колебательного контура двигателя, КПД каждого из этих режимов.

Ablative pulsed plasma thruster discharge channel geometry influence on the thrust characteristics is considered in this study. Also, two discharge current oscillation modes are considered with efficiency of each one.

В настоящее время набирают популярность малые космические аппараты (МКА) формата CubeSat, представляющие собой набор модулей, каждый из которых имеет размер 10x10x13 см [1]. Эти аппараты пользуются спросом за счет малой массы, малого размера, большой функциональности и низкой стоимости производства и запуска. Так МКА могут использоваться для дистанционного зондирования Земли, связи и телекоммуникации, а также для отработки новых космических технологий.

Применение двигательных установок (ДУ) на МКА значительно расширяет их функционал, так как позволяет решать задачи ориентации, стабилизации и утилизации аппарата по окончании срока работы, что особенно актуально в связи с ростом количества выводимых космических аппаратов [2, 3]. ДУ, установленная на CubeSat, должна соответствовать жестким критериям по габаритам и энергопотреблению, определяемым малыми размерами аппарата и низкой вырабатываемой мощностью. Одним из перспективных вариантов такой ДУ является абляционный импульсный плазменный двигатель – АИПД [4].

АИПД – электроракетный двигатель, состоящий из двух электродов, рабочего тела, расположенного между электродами, чаще всего выполняемого в виде шашки из полимера, и устройства инициирования разряда. Принцип работы такого двигателя основан на импульсном ускорении плазмы, образованной в результате абляции рабочего тела. Характерными особенностями АИПД являются

низкая стоимость, простота конструкции, возможность работать при малых энергиях разряда и микроньютоновый диапазон импульсов тяги, позволяющий прецизионно регулировать положение КА.

Однако у такого двигателя есть ряд недостатков, которые снижают эффективность работы, например, науглероживание поверхностей электродов и «послепарение» диэлектрика, которое приводит к выносу массы рабочего тела с тепловыми скоростями [5]. Для получения оптимальных тяговых характеристик также стоит задача выбора размеров разрядного канала, поскольку от площади аблирующего полимера зависит количество массы, которая ускоряется за разряд.

В данной работе рассматривается влияние аблируемой площади поверхности рабочего тела на тяговые характеристики АИПД. Аналитически исследовалось влияние изменения площади полимера на массовый расход и, как следствие, изменение импульса силы. Также оценивалось влияние электротехнических характеристик контура на массовый расход рабочего тела и общий КПД ДУ. Были выработаны требования к геометрии электродов, необходимые для получения удовлетворительных тяговых характеристик, обеспечивающих выполнение перспективной космической миссии.

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. O'Reilly, G. Herdrich, D. F. Kavanagh // *Aerospace* – 2021. – V. 8. – № 22.
2. K. Lemmer // *Acta Astronautica* – 2017. – V.134. – P. 231-243.
3. A.I. Shumeiko, V.D. Telekh, V.I. Mayorova // *Acta Astronautica* – 2022. – V.191. – P.431-437.
4. Г. А. Дьяконов // *Труды МАИ* –2014. – V. 73. – №1.
5. D.K. Fedorova, D.A. Egoshin, D.O. Novikov, A.V. Pavlov, V.D. Telekh // *Proc. of 8th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects* –2022. – V. 1. – P. 421-425.

Секция 12

ПЛАЗМА В СИНТЕЗЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ

**ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ПЛАТИНЫ НА ОКСИДНЫХ
НОСИТЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ
ПОДПОРОГОВОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА**

**GENERATION OF PLATINUM NANOPARTICLES ON OXIDE CARRIERS
USING A SUBTHRESHOLD MICROWAVE DISCHARGE**

Ахмадуллина Н.С.¹, Борзосеков В.Д.², Гаянова Т.Э.², Гусейн-заде Н.Г.²,
Князев А.В.², Кончечков Е.М.², Малахов Д.В.², Скворцова Н.Н.²,
Соколов А.С.², Степахин В.Д.², Шишилов О.Н.³
Akhmadullina N.S.¹, Borzosekov V.D.², Gayanova T.E.², Gusein-zade N.G.²,
Knyazev A.V.², Konchekov E.M.², Malakhov D.V.², Skvortsova N.N.²,
Sokolov A.S.², Stepakhin V.D.², Shishilov O.N.³

¹ *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской Академии наук, Россия, 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49*

² *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Россия, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38*

³ *МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, 119454 г. Москва, проспект Вернадского, 78
E-mail: tatyana gayanova97@gmail.com*

Экспериментально проверена необычная конфигурация возбуждения микроволнового разряда в смесях порошков Al_2O_3 и Pt, когда первоначально создается микроволновый подпороговый разряд в газе, распространяющийся в сторону открытой поверхности смеси. В смесях, подвергнувшихся воздействию разряда, во всех режимах облучения микроволновыми импульсами, кроме одиночных коротких импульсов, выявлено существенное количество частиц Al_2O_3 , покрытых наночастицами Pt.

An unusual configuration of a microwave discharge excitation in mixtures of Al_2O_3 and Pt powders, when a microwave subthreshold discharge is initially created in a gas, propagating towards the open surface of the mixture, has been experimentally verified. In mixtures exposed to the discharge in all regimes of microwave pulses, except for single short pulses, a significant amount of Al_2O_3 particles coated with Pt nanoparticles was observed.

При облучении смеси порошков металла и диэлектрика в среде воздуха атмосферного давления микроволновым излучением возможно развитие разряда, связанного с низкороговым пробоем на контактах металл-диэлектрик [1]. В конфигурации эксперимента, когда верхняя поверхность смеси порошков открыта, а микроволновое излучение подается со стороны закрытой нижней поверхности, становится возможен разлет частиц и испаренного вещества в объем реактора, сопровождающийся протеканием плазмохимических реакций, модификацией поверхности частиц, синтезом новых веществ [2]. В экспериментах получили осаждение наночастиц Pt на микрочастицы Al_2O_3 [3], что можно рассматривать в качестве гетерогенного катализатора для реакций окисления олефинов.

Возможность получить пробой в смесях порошков металла и диэлектрика зависит от интенсивности микроволнового излучения, концентрации и размера частиц металла. Когда интенсивности микроволнового излучения недостаточно для развития пробоя в смеси, предложено использовать воздействие микроволнового подпорогового разряда (МПР) [4], создаваемого над смесью порошков.

В экспериментах сравнили три режима облучения смеси порошков Al_2O_3 и Pt (массовое соотношение 10:1, частицы размеров 10-50 мкм) при интенсивности волны 20 кВт/см^2 на поверхности смеси: 1) одиночные короткие импульсы (1 мс), когда разряд в смеси порошков еще не успевает развиваться и на верхний слой смеси воздействует только плазма и излучение МПР; 2) одиночные длинные импульсы (8 мс), когда МПР воздействует достаточное время на поверхность смеси, чтобы успел сформироваться полноценный разряд в смеси порошков с образованием плазменно-пылевого облака; 3) последовательность из трех импульсов (2 мс длительность импульсов, 8 мс пауза между импульсами), когда длительности воздействия первого МПР едва хватает, чтобы возбудить разряд в смеси порошков, а последующие импульсы уже приходят в момент существования остаточной концентрации плазмы и газо-пылевого облака без формирования МПР.

Испытавшие воздействие разряда образцы смеси порошков Al_2O_3 и Pt были исследованы на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100. Было установлено, что в первом режиме облучения смеси сколь либо существенного покрытия частиц Al_2O_3 наночастицами Pt не происходит, а во втором и третьем режимах такое покрытие происходит.

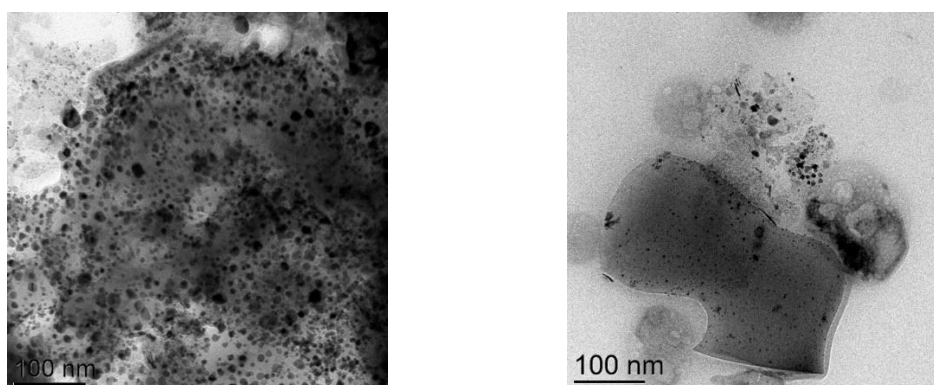


Рис. 1. Микрофотографии частиц Al_2O_3 с осажденными на них наночастицами платины: слева – режим 3; справа – режим 2

Исследование выполнено в рамках госзадания ГЗ БВ10-2021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.М. Батанов, И.А. Косый // Физика плазмы – 2015. – Т. 41. – С. 918.
2. N.N. Skvortsova// JETP Letters. – 2017. – V.106. – P. 240.
3. Н.Г. Гусейн-заде и др. Патент на изобретение RU 2772704 С1. Россия. 2022.
4. К.В. Artem'ev // Plasma Physics Reports– 2018. – V. 44. – P. 1146.

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК GaS НА РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПОДЛОЖЕК С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

PREPARATION OF THIN GaS FILMS ON VARIOUS SUBSTRATES BY PLASMA-ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

Кудряшов М.А.^{1,2}, Мочалов Л.А.^{1,2}, Прохоров И.О.^{1,2}, Вшивцев М.А.¹, Кудряшова Ю.П.², Слаповская Е.А.²
Kudryashov M.A.^{1,2}, Mochalov L.A.^{1,2}, Prokhorov I.O.^{1,2}, Vshivtsev M.A.¹, Kudryashova Yu.P.², Slapovskaya E.A.²

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
E-mail: mikhail.kudryashov1986@yandex.ru

Тонкие пленки сульфида галлия были получены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD), где в качестве исходных веществ выступали высокочистые галлий и сера. Тип подложки определял состав и свойства пленок. В случае покровного стекла пленки имели аморфную природу. При осаждении пленок на кремниевую подложку, помимо аморфной фазы наблюдалась кристаллическая фаза β -GaS. Дифракционные пики β -GaS (002) и (004) наблюдались при осаждении пленки на сапфировую подложку, что указывает на предпочтительную ориентацию оси c . Наиболее гладкая поверхность пленки с шероховатостью 0.44 нм была получена на сапфировой подложке. Напротив, на покровном стекле формируются пленки с наиболее развитой поверхностью с шероховатостью приблизительно 10 нм.

Thin films of gallium sulfide were prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD), where high-purity gallium and sulfur served as starting materials. The type of substrate determined the composition and properties of the films. In the case of a cover glass, the films had an amorphous nature. During the deposition of films on a silicon substrate, in addition to the amorphous phase, a crystalline phase of β -GaS was observed. The (002) and (004) diffraction peaks of β -GaS were observed during film deposition on a sapphire substrate, which indicates the preferred orientation of the c axis. The smoothest film surface with a roughness of 0.44 nm was obtained on a sapphire substrate. On the contrary, films with the most developed surface with a roughness of approximately 10 nm are formed on the cover slip.

Тонкие пленки сульфида галлия вызывают большой интерес из-за их потенциала для использования в фотогальванических и оптоэлектронных устройствах [1,2]. Сульфид галлия принадлежит к группе широкозонных полупроводников с интересными свойствами для приложений инфракрасной и нелинейной оптики [3,4]. Также он может использоваться для пассивации различных поверхностей полупроводников с целью улучшения их электрических и оптических свойств [5]. Среди многих преимуществ следует отметить, что сульфид галлия нетоксичный и экологически чистый материал.

В данной работе для получения тонких пленок сульфида галлия мы использовали плазмохимическое осаждение из газовой фазы. В качестве исходных веществ выступали высокочистые галлий и сера. Пленки осаждали на различные типы подложек, такие как сапфир, кремний и стекло. Температура подложек составляла приблизительно 250 °С.

Тип подложки определял состав получаемых пленок сульфида галлия. Наиболее близкий состав к стехиометрии GaS получался на сапфировой подложке ($\text{Ga}_{48}\text{S}_{52}$). При этом на покровном стекле наблюдался заметное превышение содержания серы по сравнению с галлием ($\text{Ga}_{43}\text{S}_{57}$). В этом случае состав был ближе к стехиометрии Ga_2S_3 . Для кремниевой подложки состав определялся как $\text{Ga}_{47}\text{S}_{53}$.

Пленки, осажденные на покровное стекло, кремний и сапфир, имели различную структуру. В случае покровного стекла пленки имели рентгеноаморфную природу. Когда осаждение осуществлялось на кремниевую подложку, помимо аморфной фазы наблюдалась кристаллическая фаза β -GaS. Наличие рефлексов разных направлений указывало на поликристалличность пленок. Дифракционные пики β -GaS (002) и (004) наблюдались при осаждении пленки на сапфировую подложку. Рефлексы для GaS достаточно широкие, что указывает на то, что пленки являются дефектными и поликристаллическими с малыми размерами доменов. Тем не менее, пленки сильно текстурированы.

Согласно снимкам атомно-силовой микроскопии в случае осаждения пленки на сапфир наблюдается гладкая поверхность без каких-либо явных фрагментов с шероховатостью около 0.44 нм. Пленки, осажденные на кремний, имеют более высокую шероховатость поверхности (0.63 нм), на которой отчетливо видны сферические островки размером 60 нм. На покровном стекле формируются пленки с наиболее развитой поверхностью. Здесь можно выделить сферические зерна размером 200 нм, а шероховатость составляет уже приблизительно 10 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Cuculescu, I. Evtodiev, M. Caraman, M. Rusu // *J. Optoelectron. Adv. Mater* – 2006. – V.8. – № 1077.
2. Y. Gutiérrez, M.M. Giangregorio, S. Dicorato, F. Palumbo, M. Losurdo // *Front. Chem.* – 2021. V. 9. – № 781467.
3. F. Liang, L. Kang, Z. Lin, Y. Wu // *Cryst. Growth Des.* – 2017. – V. 17. – №2254.
4. H. Lu, Y. Chen, K. Yang, Y. Kuang, Z. Li, Y. Liu // *Front. Mater.* – 2021. – V. 8. – №775048.
5. N. Okamoto, H. Tanaka // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 1999. – V. 2. – №13.

**ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОРОШКОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И СОЕДИНЕНИЙ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА**

**OBTAINING NANOSTRUCTURED MATERIALS, POWDER
NANOCOMPOSITES, AND COMPOUNDS USING HIGH-VOLTAGE
PULSED PLASMA**

¹Курявый В.Г., ¹Зверев Г.А., ^{1,2}Бузник В.М.

¹Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

2

В плазме импульсного высоковольтного разряда синтезированы поликристаллические глобулы и нанодисперсные порошки оксидов металлов, содержащихся в электродах, порошковые наноконпозиты включающие, в зависимости от условий эксперимента, нанокристаллиты или нанокристаллы фторидов, оксифторидов или оксидов металлов рассеянные во фторуглеродной матрице, а так же нанографит, нанографен, углеродные нанотрубки, нанодисперсный фторопласт, кумуленовые цепочки.

Polycrystalline globules and nanopowders of metal oxides contained in electrodes, powder nanocomposites including nanocrystallites or nanocrystals of fluorides, oxyfluorides or oxides of metals scattered in a fluorocarbon matrix, as well as nanographite, nanographene, carbon nanotubes, nanodispersed fluoroplast, cumulene chains were synthesized in the plasma of a pulsed high-voltage discharge.

В данной работе проводились эксперименты по разрушению материала электродов и фторопласта в плазме импульсного высоковольтного разряда. Определялись состав и строение продуктов разрушения.

В первом варианте между металлическими электродами в воздушной среде возбуждалась плазма импульсного высоковольтного разряда. Электроды, состоящие из Мо или W, разрушались до дымообразного состояния, на подложке оседают нанокристаллы оксидов этих металлов. размерами 30-150 нм. В случае электродов из других металлов (Cu, Fe, Cr) и их сплавов, разрушение электродов не происходит. Соответствующие составу электродов оксиды образуются на концах электродов в виде твердых наноструктурированных поликристаллических глобул. В случае сплава Ni/Cr отмечено образование смешанного оксида Cr₂NiO₄.

Во втором варианте в плазму размещался фторопластовый материал, после этого из зоны плазмы выходит дымообразный материал. Использовались воздушная либо аргоновая среды.

В зависимости от материала электродов, в случае воздушной среды, при использовании достаточно тонких электродов на подложке оседает смесь из нанокристаллитов фторидов либо оксифторидов или оксидов содержащихся в электродах металлов, а так же разрушенный до наночастиц фторопласт, нанодисперсный графит, аморфный углерод, фторуглеродный материал. Нанокристаллиты имеют размеры 50 – 200 нм и составлены из нанокристаллов размерами 3-10 нм. В случае достаточно толстых электродов либо при подборе достаточно малого подводимого к электродам высоковольтного напряжения образуются рассеянные во фторуглеродной матрице нанокристаллы размерами 3-10 нм. Такого же результата можно достичь при близком размещении в плазме фторопластовых стержней торцами навстречу один другому. Данные пиролитической масс-хроматографии отвечают присутствию в получаемом фторуглеродном материале кумуленовых цепочек, блокированных фрагментами молекул фторопласта. В случае электродов состоящих из благородных металлов в составе наноконструктов находятся нанокристаллы этих металлов размерами 2-10 нм. В случае платиновых электродов, из обработанного плазмой фторопласта выделяются наночастицы ПТФЭ, которые содержат платину. При использовании электродов, содержащих Pd, в полученном композите, в его углеродной части отмечено образование углеродных нанотрубок диаметром около 10 нм. В случае алюминиевых электродов происходит образование из материала фторопласта графеновых лепестков.

При обработке плазмой природных минералов происходит выделение из них в виде дымообразного продукта наночастиц элементов, содержащихся в минерале.

При обработке плазмой сплава Sn/Pb включается механизм окисления компонент сплава, продолжающийся на воздухе после прекращения действия плазмы. Образуются игольчатые нанокристаллы оксида олова и наночастицы оксида свинца.

В случае аргоновой среды образуются нанокристаллы фторидов металлов, рассеянные во фторуглеродной матрице. Размеры нанокристаллов 3-10 нм.

Строение и состав полученных веществ изучались методами электронной микроскопии, локальной энерго-дисперсионной спектроскопии, ИК и КР спектроскопии, ЯМР, ЭПР, РЭС.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института химии ДВО РАН, тема № 0205-2022-0003. В определении химического состава использовалось оборудование ЦКП ДВЦСИ ИХ ДВО РАН.

СИНТЕЗ ПРОЗРАЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ

SYNTHESIS OF TRANSPARENT SEMICONDUCTOR MATERIALS IN LOW-TEMPERATURE NONEQUILIBRIUM PLASMA

Мочалов Л.А., Кудряшов М.А., Прохоров И.О., Вшивцев М.А.

Mochalov L.A., Kudryashov M.A., Prokhorov I.O., Vshivtsev M.A.

Университет Лобачевского, 603950, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23

E-mail: mochalovleo@gmail.com

The ternary lead halogenides (Pb-Se-Te, P-S-Se, Pb-S-Te) seem to be very promising materials with potential to substitute the Cd-Hg-Te system in the Mid-IR detectors. Moreover, they are supposed to work at the room temperature without cooling. It should be noted that obtaining thin films from such a complex composition is a non-trivial task, especially when it comes to fine-tuning the useful properties of the materials obtained, since the existing methods do not allow consciously controlling the composition. To date, there is a single mention of this. In this work the Pb-Se-Te, P-S-Se, Pb-S-Te thin films were prepared via direct plasma-chemical interaction of lead, sulfur, selenium, and tellurium vapors. Argon of high purity was also used as a carrier gas for precursors transport to the plasma zone and as a plasma feed gas. The process was carried out at the low pressure (0.01 Torr) in inductively coupled non-equilibrium RF (40.68 MHz) plasma discharge. Optical emission spectroscopy (OES) was used to identify the excited species and to assume the possible mechanisms of plasma-chemical reactions. The stoichiometry, structure and morphology of the surface of the materials obtained was also studied by different analytical techniques dependently on the conditions of the plasma process.

Трехкомпонентные системы галогенидов свинца (Pb-Se-Te, P-S-Se, Pb-S-Te) считаются весьма перспективными материалами, которые смогут заменить систему Cd-Hg-Te в чувствительных элементах детекторов среднего ИК-диапазона. Причем они должны работать при комнатной температуре без охлаждения, тем самым позволив существенно удешевить и миниатюризировать изделие. Следует отметить, что получение тонких пленок столь сложного состава - задача нетривиальная, особенно если речь идет о точной настройке полезных свойств получаемых материалов, поскольку существующие методы не позволяют сознательно и точно контролировать их макросостав. На сегодняшний день в научной литературе практически нет упоминания о синтезе таких систем.

В данной работе тонкие пленки состава Pb-Se-Te, P-S-Se, Pb-S-Te были получены прямым плазмохимическим взаимодействием паров свинца, серы, селена и теллура. Аргон высокой чистоты также использовался в качестве рабочего газа для транспортировки прекурсоров в зону плазмы и в качестве газа подачи плазмы. Процесс проводился при низком давлении (0,01 Торр) в индуктивно связанной неравновесной ВЧ (40,68 МГц) плазме разряда. Оптическая эмиссионная спектроскопия (OES) использовалась для идентификации возбужденных частиц и предположения возможных механизмов плазмохимических реакций. Стехиометрия, структура и морфология поверхности полученных материалов также изучались различными аналитическими методами в зависимости от условий плазменного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mochalov, L., Logunov, A., Prokhorov, I., Boreman, G., Vorotyntsev, V.// Plasma Chemistry and Plasma Processing – 2021. – V. 41. – P. 493–506.
2. Mochalov, L., Dorosz, D., Kochanowicz, M., Boreman, G., Vorotyntsev, V.// Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy – 2020. – V. 241. – №118629.
3. Mochalov, L., Logunov, A., Prokhorov, I., ...Rafailov, E., Vorotyntsev, V.// International Conference on Transparent Optical Networks – 2020. – №9203325.

ВАКУУМНО-ДУГОВОЕ ПЛАЗМЕННО-АССИСТИРОВАННОЕ НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ВЭС И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИ

PLASMA-ASSISTED VACUUM ARC DEPOSITION OF MULTILAYER CERAMIC HIGH-ENTROPY ALLOY FILMS AND THEIR STUDY WITH SYNCHROTRON RADIATION

Прокопенко Н.А.¹, Иванов Ю.Ф.¹, Коваль Н.Н.¹, Крысина О.В.¹, Петрикова Е.А.¹, Толкачев О.С.¹, Шугуров В.В.¹, Ахмадеев Ю.Х.¹, Углов В.В.², Шмаков А.Н.³

Prokopenko N.A.¹, Ivanov Yu.F.¹, Koval N.N.¹, Krygina O.V.¹, Petrikova E.A.¹, Tolkahev O.S.¹, Shugurov V.V.¹, Akhmadeev Yu.Kh.¹, Uglov V.V.², Shmakov A.N.³

¹ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3

²Белорусский государственный университет, 220030, Республика Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 4

³ФГБУН Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр-т академика Лаврентьева, 11
E-mail: prokopenko@opee.hcei.tsc.ru

Представлены результаты исследований, направленных на синтез покрытий керамических высокоэнтропийных сплавов вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом. Определены оптимальные режимы нанесения покрытия состава (NbMoCrTiAl)N. Показано, что покрытие является многослойным с толщиной слоёв (23-27) нм. Рентгенофазовый анализ, проведенный с помощью синхротронного излучения, показал, что синтезированное покрытие находится в рентгеноаморфном состоянии. Твёрдость полученного покрытия составила 43 ГПа, коэффициент трения 0,5, параметр износа $7 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

The report describes the study of plasma-assisted vacuum-arc deposition of a ceramic high-entropy alloy (HEA) coating. On the example of (NbMoCrTiAl)N deposited in optimum modes, it is shown that such a coating represents a multilayer film with a layer thickness of 23–27 nm. According to X-ray diffraction analysis in synchrotron radiation and to transmission electron microscopy, the multilayer film has a nanocrystalline structure with an average crystallite size of 2.5–6.0 nm. The hardness of the film is 43 GPa, its friction coefficient is 0.5, and its specific wear rate is $7 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Первые работы, направленные на получение и изучение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), появились в 2004 году [1, 2]. С этого времени интерес к материалам, состоящим из пяти и более элементов эквиатомного состава, стремительно растёт.

Целью данной работы является исследование оптимальных режимов нанесения керамического покрытия на основе ВЭС состава (NbMoCrTiAl)N с дальнейшим исследованием его состава, структуры и свойств, в том числе с помощью

методов, использующих синхротронное излучение.

В качестве материала исследования были использованы нитридные покрытия на основе ВЭС состава $(\text{NbMoCrTiAl})\text{N}$, напыленные на подложки из нержавеющей стали 12X18H10T, технически чистого титана ВТ1-0, технически чистого вольфрама и твердого сплава ВК-8. Генерация газо-металлической плазмы для формирования нитридов ВЭС производилась при совместной работе нескольких плазменных источников разного типа: 1) источника газовой плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом протяженной конструкции «ПИНК-П»; 2) электродугового испарителя ДИ80 с ниобиевым (НБШ-00, 99,8 вес. % Nb) катодом (\varnothing 80 мм); 3) электродугового испарителя ДИ100 с титан-алюминиевым (Ti-50 вес. % Al) катодом (\varnothing 100 мм) и улучшенной системой водоохлаждения задней поверхности катода; 4) электродугового испарителя ДИ100 с молибденовым (МЧ, 99,96 вес. % Mo) катодом (\varnothing 100 мм) и улучшенной системой водоохлаждения задней поверхности катода; 5) протяженного электродугового испарителя ДП400 с хромовым (99,99 вес. % Cr) катодом (400×80 мм) [20]. Все генераторы плазмы располагались вокруг стола с планетарно вращающимися сателлитами, кроме дугового испарителя с катодом из TiAl материала, который располагался сверху камеры перпендикулярно остальным генераторам плазмы.

В результате проведенных исследований были получены азимутальные характеристики дугового разряда при отдельной и совместной работе плазмогенераторов. Определен оптимальный режим нанесения керамической ВЭС пленки со средним значением плотности ионного тока каждого дугового испарителя $2,45 \text{ mA/cm}^2$. Покрытия имеют нанокристаллическую структуру, с размером кристаллитов 2,5-6 нм. Нанокристаллиты объединяются в столбчатую структуру со средним продольным 285 нм и поперечным 60 нм размерами. Выполнен рентгенофазовый анализ с использованием синхротронного излучения образца с напыленной многослойной керамической пленкой и выявлено рентгеноаморфное состояние $(\text{NbMoCrTiAl})\text{N}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятий № 3.1.4, 3.1.5, 3.1.12 и 3.1.13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. // Mater. Sci. Eng. A. – 2004. – V. 213. – № 375-377.
2. J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang // Adv. Eng. Mater. – 2004. – V. 6. – № 299.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ GaO-GaN В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

PLASMA-CHEMICAL DEPOSITION OF THIN FILMS OF THE GaO-GaN SYSTEM IN A LOW-TEMPERATURE PLASMA

Кудряшов М.А.^{1,2}, Мочалов Л.А.^{1,2}, Прохоров И.О.^{1,2}, Вшивцев М.А.¹, Кудряшова Ю.П.², Слаповская Е.А.², Князев А.А.².

Kudryashov M.A.^{1,2}, Mochalov L.A.^{1,2}, Prokhorov I.O.^{1,2}, Vshivtsev M.A.¹, Kudryashova Yu.P.², Slapovskaya E.A.², Knyazev A.A.²

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

E-mail: igorprokhorov1998@yandex.ru

В настоящее время широко востребованы многофункциональные наноструктурированные сложные оксидные материалы, в том числе мультипористые наносистемы для создания нового поколения высокочувствительных пьезоэлектрических матриц, носимых пьезодатчиков, хеморезисторов для «электронного носа» и т. д. [1]. Свойства этих наноструктурированных материалов в основном определяются методом получения. Традиционные методы синтеза обладают рядом недостатков, среди которых недостаточная чистота, большое количество дефектов в структуре, отсутствие возможности варьировать состав в широких пределах и другие. [2]. Целью данной работы является разработка нового подхода к синтезу наноструктурных материалов такого типа.

Multifunctional nanostructured complex oxide materials are in great demand, including multiporous nanosystems for creating a new generation of highly sensitive piezoelectric matrices, wearable piezoelectric sensors, hemoresistors for the "electronic nose", etc. [1]. The properties of these nanostructured materials are mainly by the method of obtaining. Traditional methods of synthesis have a number of disadvantages, including insufficient purity, a large number of defects in the limitation, the inability to include the composition within, and others. [2]. The purpose of this work is to develop a new approach to the synthesis of nanostructured materials of this type.

Был разработан метод химического осаждения из газовой фазы с усилением плазмой (PECVD), в котором в качестве исходных прекурсоров были использованы высокочистые элементы, переносимые газом-носителем в зону реакции, где взаимодействовали с кислородом и азотом. Для инициирования взаимодействия прекурсоров использовали высокочастотный разряд при низком давлении (0,01 Торр).

В качестве исходных веществ выступали высокочистые галлий, кислород и азот. Односторонне полированные подложки из сапфира с-ориентации высокой чистоты размером 10×10 мм размещались в камере поперек вакуумного загруз-

зочного фланца (нержавеющая сталь) и располагались поперек потока газа-носителя на специальном подвижном кварцевом (высокочистый) держателе для квадратной подложки. Полученные материалы были исследованы различными аналитическими методами, подтверждающими высокое качество материала с точки зрения чистоты и структурной однородности.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-13-00053 «Разработка научных основ технологии получения хеморезистивных материалов для электронного носа на основе сложных наноструктурированных оксидных матриц»

ЛИТЕРАТУРА

1. Subrina Rafique, et al. // Phys. Status Solidi A – 2016. – V. 213. – №. 4. – P. 1002.
2. L.A. Mochalov et al. // J. of Physics D Applied Physics – 2018. – V. 52. – P. 015203.

ПЛАЗМЕННО-РАСТВОРНЫЙ СИНТЕЗ ФЕРИТОВ КОБАЛЬТА С СТРУКТУРОЙ ТИПА ШПИНЕЛЬ

PLASMA-SOLUTION SYNTHESIS OF COBALT FERRITES WITH SPINEL-TYPE STRUCTURE

Смирнова К.В.¹, Иванова П.А.¹, Шутов Д.А.¹, Иванов А.Н.¹, Рыбкин В.В.¹
Smirnova K.V.¹, Ivanova P.A.¹, Shutov D.A.¹, Ivanov A.N.¹, Rybkin V.V.¹

¹ *Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия,
просп. Шереметевский, 7, Иваново, Ивановская обл., 153000
e-mail: smirnovakv1@gmail.com*

Обработка водных растворов нитратов железа и кобальта тлеющим разрядом постоянного тока приводит к образованию коллоидной взвеси в жидком аноде в приповерхностном слое. Полученная взвесь собиралась и исследовалась на СЭМ, ЭРС, РСА, ДСК, ДРС.

The treatment of aqueous solutions of iron and cobalt nitrates by a direct current glow discharge leads to the formation of a colloidal suspension in the liquid anode in the surface layer. The resulting suspension was collected and studied for SEM, EDS, X-ray diffraction, DSC, DLS.

В последние годы магнитные наночастицы привлекают значительное внимание исследователей. В частности, оксиды переходных металлов со структурой типа шпинели относятся к числу наиболее важных магнитных наночастиц [1-2]. Благодаря своим превосходным магнитным свойствам и возобновляемой каталитической активности они нашли широкое применение в таких областях как, очистка воды, биомедицина, катализ и в качестве материалов для электронных устройств. Существует большое количество различных методов получения шпинелей, одним из новых и перспективных является синтез из раствора под действием низкотемпературной неравновесной плазмы.

В работе использовали водные растворы смеси нитратов с концентрацией 3 ммоль/л гексагидрата нитрата железа (III) и 50 ммоль/л гексагидрата нитрата кобальта (II) (ч.д.а.). Используемая в работе экспериментальная установка и методика эксперимента подробно описана в работе [3]. Получение и анализ частиц условно можно разделить на два этапа. Первый: плазменно-растворный синтез (анализ частиц в растворе и после сушки); Второй: прокаливание частиц после сушки и исследование образовавшихся оксидов.

Эффективный размер частиц определяли методом динамического светорассеяния (ДРС) с использованием анализатора размера Photocor Compact -Z (Photocor, Россия). Сразу после обработки плазмой (50 мА, 10 мин) в растворе можно выделить частицы двух характерных размеров. Первая фракция: 92,91 нм и вторая: 1,46 мкм, а дзета-потенциал $\zeta = 24,76$ мВ.

Рентгенофазовый анализ (РСА, ДРОН 3М, Буревестник, Россия) показал, что частицы, полученные с помощью плазменно-растворного синтеза, являются рентгеноаморфными. Элементный анализ (ЭРС, Aztec EDS, Oxford Instruments Ltd., Англия) показал, что полученные частицы имеют сложный состав и являются смесью гидроксидов и гидроксонитратов железа и кобальта. Данные термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (ТГА, ДСК, Jupiter, Netzsch, Германия) подтвердили данные ЭРС. На изображениях, полученных с сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, Tescan Vega 3SBH, Чехия) видно, что частицы имеют хорошо развитую структуру поверхности.

Рентгенофазовый анализ порошков после высокотемпературной обработки показал наличие большого количества ярко выраженных рефлексов, что свидетельствует о кристаллической структуре типа шпинель у синтезированных веществ. Данные элементного анализа подтвердили, что порошки являются ферритами кобальта.

Магнитную характеристику частиц исследовали с помощью вибрационного магнитометра (VSM, Cryogenic Limited, Великобритания) при комнатной температуре с максимальным приложенным полем до 30 кОе. Коэрцитивная сила составила 210 Ое. Намагниченность насыщения (M_S), полученная при комнатной температуре, составила 48 emu/g, а остаточная намагниченность (M_r) — 9 emu/g.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-2607.2022.1.2).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Valenzuela // Phys. Res. Int. – 2012. – № 1–9.
2. G. Litsardakis, I. Manolakis, C. Serletis, K.G. Efthimiadis // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – V. 316. – P. 170–173.
3. D.A. Shutov, K.V. Smirnova, M.V. Gromov, A.N. Ivanov, V.V. Rybkin // Plasma Chem. Plasma Process. 2018. – V. 38. – P. 107-121.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНВЕРСИЮ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ПРИ СИНТЕЗЕ ГРАФЕНА

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE CONVERSION OF HYDROCAR- BONS IN A PLASMA JET DURING GRAPHENE SYNTHESIS

Филимонова Е.А., Шавелкина М.Б., Амиров Р.Х., Иванов П.П.
Filimonova E.A., Shavelkina M.B., Amirov R.Kh., Ivanov P.P.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, г. Москва,
125412, ул. Ижорская, 13, стр.2
E-mail: helfil@mail.ru*

Показано, что скорость охлаждения плазменной струи играет важную роль для ускорения нуклеации C_2 - предшественников образования твердого углерода (графена), в результате остается значительно больше времени для роста наночастиц.

It has been shown that the cooling rate of the plasma jet plays an important role in accelerating the formation of C_2 nuclei, which are precursors of the formation of solid carbon (graphen); as a result, much more time remains for the growth of nanoparticles.

Одним из распространенных способов получения углеродных наноструктур является применение газоразрядной плазмы [1,2]. Эффективность синтеза структур зависит от ряда параметров, таких как тип разряда, рабочий диапазон температур, синтез в объеме или с использованием подложки, сорт углеродсодержащего вещества и несущего газа, их расход и др.

В данной работе был проведен синтез графена на плазмохимической установке с плазмотроном постоянного тока в качестве генератора плазмы. Подача плазмообразующего газа (Ar) и прекурсора углерода (CH_4) осуществлялась одновременно. Мультиграфен формировался в объеме плазменного потока и представлял собой структуру хлопьевидной формы с числом слоев от одного до десяти. Латеральный размер наночастиц достигал 2000 нм, что намного больше, чем в смеси $C_3H_8/C_4H_{10}/He$ [3]. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света установлено образование малодефектных наноструктур, что потенциально обеспечивает возможность их применения в накопителях энергии и др.

Цель данного исследования состояла в определении газового состава в электродуговой плазме вдоль струи, используя химическую кинетику. Необходимо было: 1) выявить ведущие реакции, включая реакции с заряженными частицами, зависимость газофазных промежуточных продуктов от природы несущего газа и профиля температуры; 2) сравнить состав конечных и промежуточных продуктов, полученных в результате кинетического подхода и в рамках термодинамически равновесного подхода.

Расчеты были проведены для смеси $\text{CH}_4:\text{Ar}=0.1764:0.8256$ с расходом CH_4 и Ar - 0.3 г/с и 3.5 г/с при давлении $P=350$ Торр. Температура на срезе сопла $T=10000$ К, конверсия в струе проходила в течение ~ 0.8 с. Результаты сравнивались с результатами для смеси $\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{He}$ [3]. Помимо состава эти смеси имели разные профили температуры, т.е. у них была разная скорость охлаждения струи.

Начальный состав смеси на выходе из плазматрона определялся в условиях локального термодинамически равновесного газа при $T=10000$ К. Степень ионизации и плотность электронов имели значения $x_e=4.536 \cdot 10^{-2}$ и $n_e=1.51 \cdot 10^{16}$ см^{-3} . Основными ионами были C^+ , Ar^+ и H^+ . Эволюция состава смеси вдоль струи газа определялась в кинетическом расчете, учитывались 794 реакции с участием 125 компонентов. Температура вдоль струи спадала от $T_0=10000$ К до $T_f=880$ К. Расчет проводился по программе RADICAL [4].

Особенностью этих экспериментов являлось резкое охлаждение струи, что приводило к быстрому спаду концентрации димеров C_2 , образованных в начальный момент времени. Дополнительная наработка C_2 к той, что осталась от начальной концентрации C_2 , образованной при $T=10000$ К, принадлежит реакциям с участием C_2H . Как показано в [3], в результате этих реакций образуется перенасыщенный пар из молекул C_2 в диапазоне температур 2500-3500 К, и это приводит к осаждению твердой фазы. Поскольку температура в струе CH_4/Ar снижалась более резко, чем в это было в экспериментах [3] для смеси $\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{He}$, область температур 2500-3500 К стала более растянута во времени, в результате увеличилось время для образования углеродных наночастиц, что приводит к увеличению латерального размера графена. Этот вывод качественно согласуется с экспериментом.

Расчет концентраций большинства компонентов в предположении локального термодинамического равновесия в десятки раз отличается от концентраций, полученных в кинетическом расчете в области температур ниже 4000 К. По-видимому, термодинамический подход в таком случае не применим.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01056-22-00).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Mohanta, B. Lanfant, M. Leparoux // Plasma Chem. Plasma Proc. – 2019. – V. 39. – № 1161.
2. P. Fortugno, S. Musikhin, X. Shi et al. // Carbon. – 2022. – V.186. – № 560.
3. M.B. Shavelkina, E.A. Filimonova, R.Kh. Amirov // Plasma Sour. Sci. Technol. – 2020. – V.29. – № 025024.
4. М.Б. Железняк, Е.А. Филимонова // Теплофизика высоких температур – 1998. – V. 36. – I. 374. – № 557.

СПЕКАНИЕ НИТРАТОВ ЦИНКА И ЖЕЛЕЗА ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

SINTERING OF ZINC AND IRON NITRATES USING DC GLOW DISCHARGE

Шутов Д.А., Карташов С.И., Иванов А.Н., Рыбкин В.В.
Shutov D.A., Kartashov S.I., Ivanov A.N., Rybkin V.V.

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия,
Иваново
E-mail: shutov@isuct.ru*

Приводятся результаты сравнения кристаллического строения порошков, полученных спеканием смеси нитратов цинка и железа в печи, и спеканием действием тлеющего разряда атмосферного давления в воздухе.

The results of a comparison of the crystal structure of powders obtained by sintering a mixture of zinc and iron nitrates in a furnace and sintering under the action of an atmospheric pressure glow discharge in air are presented.

Традиционно для синтеза структур типа шпинели, например, $ZnFe_2O_4$, используют метод термического спекания, представляющий из себя нагрев в печи при высокой температуре смеси солей необходимых металлов. В данной работе было сравнение железо-цинк содержащих порошков, синтезированных методом термического спекания и методом плазменного спекания разрядом постоянного тока атмосферного давления.

Разряд атмосферного давления в воздухе зажигался между титановым анодом и алюминиевой пластиной (к нижней части которой был прикреплен радиатор), служившей катодом. Такая конфигурация позволяет увеличить теплоотвод и уменьшить перегревание и, как следствие, износ электродов. В качестве объектов исследования использовали смесь порошков ч.д.а $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ и $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ в молярном соотношении по катиону 1:1 и 2:1. Перед началом эксперимента вещества помещались в ступку и истирались, затем загружались в реактор. Время горения разряда составляло 5 минут. После выключения разряда для последующего анализа порошки отбирались с поверхности алюминиевой пластины, промывались дистиллированной водой и высушивались при 50 °С. В качестве образцов сравнения использовали порошки, полученные методом твердофазного спекания в муфельной печи в течение 5 минут при температуре 900 °С. Рентгеноструктурный анализ проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН 3М (CuK α -излучение) (Россия). Анализ дифрактограм производился при помощи программного обеспечения QualX2 с использованием открытой кристаллографической базы данных COD.

На рис. 2 приведены дифрактограммы порошков, полученных “традиционной” прокалкой. Пики 18.1° , 29.9° , 35.2° , 36.8° , 42.7° , 53° , 56.5° , 62° и 66.3° на рис. 2 соответствуют плоскостям (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511), (440), (442) ферришпинели типа франклинита ($ZnFe_2O_4$, COD id 00-900-2489) [1]. Пики 31.7° , 34.4° , 36.2° , 47.5° , 56.5° , 62.8° , 66.3° , 67.9° и 69° на рис. 2 соответствуют плоскостям (100), (002), (101), (102), (2-10), (103), (200), (2-12), (201) оксида цинка (ZnO , COD id 00-900-4181) [2].

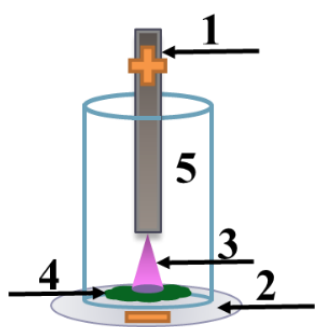


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – титановый анод, 2 – алюминиевый катод, 3 – тлеющий разряд, 4 – исходная смесь солей, 5 – кварцевая трубка

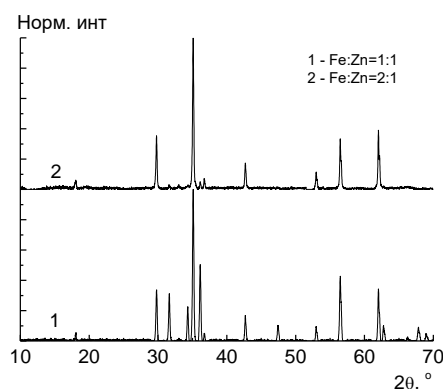


Рис. 2. Дифрактограммы порошков, полученных прокалкой смеси нитратов железа и цинка в муфельной печи, молярное соотношение Fe:Zn: 1- 1:1; 2 – 2:1

При соотношении катионов в исходной соли 1:1 в результате спекания получается смесь ферришпинели и оксида цинка, тогда как при соотношении Fe:Zn=2:1 полученный порошок полностью представляет из себя ферришпинель. Порошки, полученные спеканием под действием разряда как при соотношении катионов 1:1, так и при соотношении 2:1 являются смесью франклинита и цинцита, в соотношении 63.5:36.5 и 89.3:16.1, соответственно. Возможно, это обусловлено неравномерным прогревом навески исходных солей разрядом.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FZZW-2023-0010. Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Pavese, D. Levy, A. Hoser / Cation distribution in synthetic zinc ferrite ($Zn_{0.97}Fe_{2.02}O_4$) from in situ high-temperature neutron powder diffraction // American Mineralogist – 2000. – V. 85. – I. 10. – P. 1497–1502.
2. K. Kihara, G. Donnay / Anharmonic thermal vibrations in ZnO // Canadian Mineralogist – 1985. – V. 23 – P. 647-654.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛЕНОК ВЭС, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

STRUCTURE AND PROPERTIES OF HEA FILMS SYNTHESIZED BY THE ION-PLASMA METHOD

Иванов Ю.Ф.¹, Прокопенко Н.А.¹, Петрикова Е.А.¹, Шугуров В.В.¹, Толкачев О.С.¹

Ivanov Yu.F.¹, Prokopenko N.A.¹, Petrikova E.A.¹, Shugurov V.V.¹, Tolkachev O.S.¹

¹*Institute of high current electronics SB RAS, Russia, 634055, Tomsk, av. Akademichesky, 2/3*

E-mail: yufi55@mail.ru

Вакуумно-дуговым с плазменным ассистированием испарением в среде аргона одного многоэлементного (TiNbZrTaHf) катода или нескольких одно- и двух элементных катодов сформированы высокоэнтропийные пленки путем осаждения на твердотельную подложку из многокомпонентной газо-металлической плазмы. Показано, что пленки являются однофазным (ОЦК кристаллическая решетка) нанокристаллическим (3-5 нм) материалом, микротвердость, модуль Юнга, параметр износа и коэффициент трения которых зависят от элементного состава и структуры пленок.

High-entropy films are formed by vacuum-arc with plasma-assisted evaporation in an argon medium of one multi-element (TiNbZrTaHf) cathode or several one- and two-element cathodes by deposition on a solid substrate from a multicomponent gas-metal plasma. It is shown that the films are single-phase (bcc crystal lattice) nanocrystalline (3-5 nm) material, microhardness, Young's modulus, the wear parameter and friction coefficient of which depend on the elemental composition and structure of the films.

Разработка сплавов, называемых высокоэнтропийными (ВЭС), состоящих из пяти и более основных химических элементов близкой концентрации, являющихся в большинстве случаев однофазными термодинамически стабильными твердыми растворами замещения, преимущественно, на основе ОЦК или ГЦК кристаллической решетки, указывает на появление новой парадигмы в дизайне современных материалов [1-4]. Уникальные функциональные свойств ВЭС (высокая твердость после отжига при температурах свыше 1000 °С, высокая термическая стабильность, гидрофобность, сверхэластичность, повышенная устойчивость к износу, коррозии и окислению, высокая жесткость, прочность и ударная вязкость, хорошее сопротивление усталости) выдвинули эти материалы в разряд наиболее перспективных [5-7]. В работе [8] впервые было отмечено, что чем больше составляющих элементов с сильно отличными атомными радиусами ($\Delta=R_{\max}-R_{\min}$), тем больше внутрикристаллитная деформация и выше вероятность формирования аморфоподобного состояния ВЭС.

Целью настоящей работы являлся анализ структуры и свойств, синтезированных вакуумно-дуговым с плазменным ассистированием методом, пленок ВЭС, отличающихся параметром Δ .

Материалом исследования являлись пленки ВЭС, напыленные на образцы стали 12X18H10T и твердого сплава ВК8, имеющие следующий элементный состав: TiNbTaHfZr (пленка №1), TiAlCrMoNb (№2) и TiAlCuNbZr (№3). Для пленки №1 $\Delta=0.017$ нм, для пленки №2 $\Delta=0.020$ нм, для пленки №3 $\Delta=0.022$ нм. Методами рентгенофазового анализа установлено, что пленки №1 и №2 имеют ОЦК кристаллическую решетку (№1 $a = 0,33396$ нм; $HV=4,7$ ГПа, $k=0,16 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н*м; $\mu=0,82$) (№2 $a = 0,31661$ нм; $HV=15$ ГПа, $k=3,1 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н*м; $\mu=0,64$). Пленка №3 является рентгеноаморфным материалом ($HV=14,0$ ГПа, $k=0,7 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н*м; $\mu=0,83$). Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показано, что пленка №1, полученная при распылении многоэлементного катода, является однослойным образованием, имеющим столбчатую структуру (рис. 1, а); пленки №2 и №3, сформированные при одновременном испарении нескольких катодов, являются, в силу методики формирования, многослойными системами (рис. 1, б, в). Пленки имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов (2-5) нм.

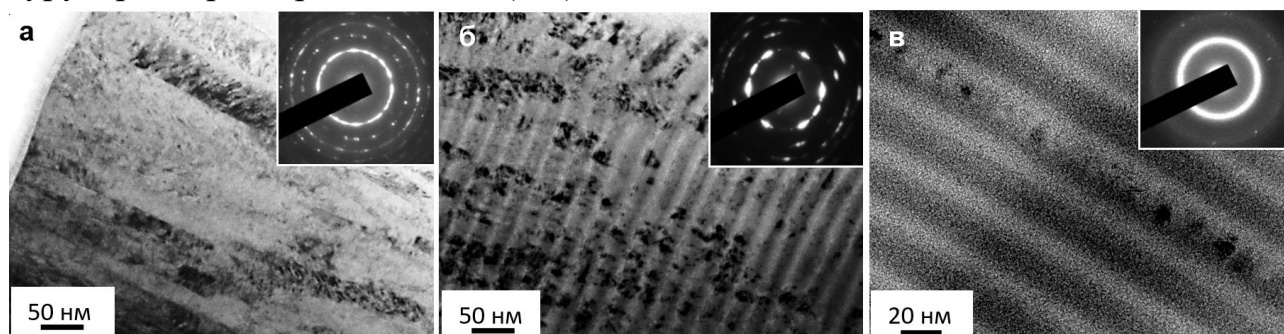


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение и микроэлектроннограммы пленок ВЭС №1 (а), №2 (б) и №3 (в).

ЛИТЕРАТУРА

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. // Mater. Sci. Eng. A – 2004. – V. 213. – P. 375-377.
2. Yeh J.W. // Adv. Eng. Mater. – 2004. – V.6. – №299.
3. Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu and Y. Yang // Materials Today – 2016. – V.19. – №349.
4. D.B. Miracle, O.N. Senkov // Acta Materialia – 2017. – V. 122. – № 448.
5. O.N. Senkov, J.M. Scott, S.V. Senkova // J. Miracle. Alloys and Com pounds –2011. – V. 509. – № 6043.
6. Hsu Chin-You, Juan Chien-Chang, Wang Woei-Ren et al // Materials Science and Engineering A – 2011. – V. 528 – №3581.
7. С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка и др. // Современные проблемы физического материаловедения – 2008. – Т.17. – №126.
8. T. K. Chen, T. T. Shun, J. W. Yeh, and M. S. Wong // Surf. Coat. Technol. – 2004. –V. 193. – P. 188-189.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ ДИСПЕРСИЙ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF WATER NANOPARTICLES DISPERSIONS OBTAINED BY PULSED ELECTRIC DISCHARGE

Макарова С.В., Субботин Д.И., Снетов В.Н., Коликов В.А., Пинчук М.Э.

Makarova S.V., Subbotin D.I., Snetov V.N., Kolikov V.A., Pinchuk M.E.

*Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*

*Institute for Electrophysics and Electrical Power of the Russian Academy of Sci-
ences, Saint-Petersburg, Russia*

E-mail: makarovasvetlana98@mail.ru

Исследовались водные дисперсии наночастиц, полученных электроимпульсным методом. Определяли параметры водных дисперсий при помощи кондуктометрии, потенциометрии и рентгенофазового анализа. В составе наночастиц, в их кристаллической части, обнаружены металлы и их оксиды

Aqueous dispersions of nanoparticles obtained by the electropulse discharge method were studied. The parameters of aqueous dispersions were determined using conductometry, potentiometry, and X-ray phase analysis. Metals and their oxides were found in the crystalline part of the nanoparticles.

Получение материала в виде наночастиц является перспективной областью современных исследований. Наночастицы обладают особыми свойствами, за счет которых они находят применение, например, при лечении онкологических заболеваний в медицине, в качестве антибактериальных агентов; в косметологии и в других областях. Одной из перспективных областей их получения является формирование наночастиц под действием импульсного электрического разряда в дистиллированной воде. Данным методом удалось синтезировать частицы, содержащие серебро, медь, железо и их окислы. Водные растворы наночастиц металлов обладают специфической особенностью пролонгированной микробной устойчивости воды (ПМУВ).

Электроразрядный метод производства наночастиц основан на эрозии электродов при прохождении импульсов тока. Эрозия электрода происходит за счет резкого разогрева материала под действием электрического тока. Металл переходит в жидкую и парообразную фазу и выбрасывается в окружающее пространство. Блок-схема установки показана на рисунке 1. Синтез наночастиц происходит в разрядной камере. На электроды подается импульс с напряжением ~40 кВ и частотой следования 100 Гц, с амплитудным током ~200 А. Между электродов подается бидистиллированная вода с расходом 26-52 мл/мин. Исходная электро-

проводность воды около 2 мкСм/см. В качестве электродов использовалась проволока диаметром 0.7 мм из меди ПММ, серебра Ср99.99 и стали Ст20.

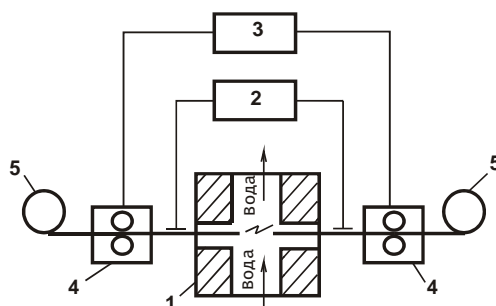


Рис. 1. Блок-схема установки электроразрядной обработки воды: 1 - разрядная камера; 2 - генератор электрических импульсов; 3 - система контроля и управления; 4 - устройство подачи электродов; 5 - электродный материал.

В ходе исследования водных дисперсий, содержащих наночастицы материала, определяли природу металлических структур. При этом использовались следующие физико-химические методы: кондуктометрия, потенциометрия и рентгенофазовый анализ (РФА). Методом кондуктометрии определили электрическую проводимость водных дисперсий наночастиц, оказавшуюся близкой к бидистиллированной воде. При выпаривании и растворении пробы в смеси концентрированных азотной и соляной кислот электропроводность повышалась, что свидетельствует о растворении металлических структур. С помощью ионоселективных электродов обнаружили низкое содержание соответствующих ионов. При изучении наночастиц методами РФА, в кристаллической части обнаружены металлы и их оксиды. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты РФА для различных пар электродов

Электроды (пара)	Обнаруженные вещества	Массовая концентрация, %	Средний размер кристаллитов, нм
Медь-медь	Cu	16,3	42
	CuO	83,3	10
Серебро-серебро	Ag	100	72
Медь-серебро	CuO	69,6	9
	Ag	25,3	28
	Ag ₂ O	5,1	7
Медь-железо	CuO	61,2	10
	Магнетит (FeO·Fe ₂ O ₃)	25	9
	Cu	11,1	55
Серебро-железо	Ag	42,9	20
	Гематит (Fe ₂ O ₃)	31	21
	Ag ₂ O	24	35
	Fe	2,2	28

ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИАНИЛИН+WO₃ И ИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

PLASMA SYNTHESIS OF POLYANILINE+WO₃ NANOCOMPOSITES AND ITS ELECTROCHEMICAL PROPERTIES

Сироткин Н.А., Хлюстова А.В.
Sirotkin N.A., Khlyustova A.V.

*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Россия, Иваново,
ул. Академическая, д.1
e-mail: alexsad8@yandex.ru*

В данной работе для получения наночастиц оксидов металлов и создания полимерных нанокomпозитов применен подводный импульсный разряд, инициированный в водной дисперсии полианилина (ПАНИ) между вольфрамовыми стержнями. Полученные результаты показали, что нанокomпозит ПАНИ+WO₃ может быть перспективным материалом при создании суперконденсаторов.

In this work, an underwater impulse discharge initiated in polyaniline (PANI) aqueous dispersion between tungsten rods is applied to produce metal oxide nanoparticles and create polymer nanocomposites. The obtained results indicated that the PANI+WO₃ nanocomposite could be a promising candidate as an electrode material for high-power supercapacitor applications.

Проводящие полимеры привлекают внимание исследователей в связи с их потенциальными применениями в производстве твердотельных устройств [1]. Среди проводящих полимеров широкое распространение получил полианилин (ПАНИ) благодаря его преимуществам, таким как легкость синтеза, высокая проводимость, термическая стабильность, разумная стоимость [2]. ПАНИ используется в устройствах хранения и преобразования энергии, включая суперконденсаторы, батареи и топливные элементы [3]. Путем легирования проводящих полимеров наночастицами оксидов переходных металлов, в частности оксидом вольфрама WO₃, могут быть значительно улучшены электропроводность механическая стабильность композитов [4].

Низкотемпературная подводная плазма является простым, безреагентным и эффективным методом получения наночастиц различных оксидов металлов [5]. В предыдущих исследованиях был успешно выполнен одностадийный синтез полимерных композитов с инкапсулированными наночастицами оксидов металлов [6].

В данной работе нанокomпозиты были получены из полианилина и наночастиц оксида вольфрама в одну стадию с использованием плазмы импульсного подводного разряда. Разряд был инициирован между двумя вольфрамовыми

стержнями, погруженными в водную дисперсию полианилина. Средний ток разряда равнялся 0.25 А и 0.8 А. Детали эксперимента подробно описаны в [7]. Рентгеноструктурный анализ и ИК-анализ подтвердили внедрение наночастиц WO₃ в ПАНИ. Дифракционные линии на рентгенограммах композитов соответствуют γ -моноклинной фазы WO₃. С увеличением разрядного тока увеличиваются скорость распыления вольфрамовых. Максимальное содержание наночастиц оксида вольфрама в полимере достигает 5 %. Изображения, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии, продемонстрировали сферическую морфологию нанокompозита с включенными частицами WO₃ со средним диаметром 35 нм. Значения ширины запрещенной зоны для образцов ПАНИ, ПАНИ+WO₃ 0.8А и ПАНИ+WO₃ 0.25А равнялись 3.74 эВ, 3.64 эВ и 3.48 эВ соответственно.

Электрохимические характеристики гибридных нанокompозитов были протестированы методом циклической вольтамперометрии (Таблица). Полученные результаты показали, что нанокompозиты ПАНИ+WO₃ могут быть перспективными кандидатами в качестве электродов для мощных конденсаторов.

Таблица 1. Электрохимические свойства образцов.

Образец	Диапазон потенциала, В	Скорость раз- вертки, В/с	Удельная ем- кость, мФ/г
ПАНИ	-0.5 – 0.7	0.1	0.82
ПАНИ+WO ₃ 0.25А	-1.2 – 0.6	0.1	7.78
ПАНИ+WO ₃ 0.8А	-1.2 – 0.75	0.1	25.46

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 21-73-00034.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.А. Skotheim / Handbook of Conducting Polymers; Marcel Dekker, Ed.; 2nd ed. // CRC press: New York, 1998.
2. A. MacDiarmid, L. Yang, W. Huang, B. Humphrey // Synth. Met. 1987. – V.18. – P. 393–3988.
3. Y. Ding // Int. J. Electrochem. Sci. – 2014. – V.9. – P. 6281–6293.
4. B. S. Dakshayini, K. R. Reddy, A. Mishra, N. P.Shetti, S. J. Malode, S. Basu, S. Naveen, A. V. Raghun // Sensors and Biosensors. Microchem. J. –2019. – V. 147. – P. 7–24.
5. A. Khlyustova, N. Sirotkin, A. Kraev, V. Titov, A. Agafonov // A. Materialia –2021. – V. 16. – № 101081.
6. A. Khlyustova, N. Sirotkin, A. Kraev, A. Agafonov, V. Titov // J. Appl. Polym. Sci. – 2021. – V. 138. – № 51174.
7. N.A. Sirotkin, A. V. Khlyustova, V. A. Titov, A. S. Krayev, D. I. Nikitin, O.A. Dmitrieva, A. V. Agafonov // Plasma Chem. Plasma Process – 2020. – V. 40. – P. 571–587.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЗОЛЕЙ WO_3 И MoO_3

PLASMA-CHEMICAL MODIFICATION OF WO_3 AND MoO_3 SOLS

Хлюстова А.В., Шibaева В.Д., Сироткин Н.А., Евдокимова А.В.
Khlyustova A.V., Shibaeva V.D., Sirotkin N.A., Evdokimova A.V.

*Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН, Россия, 153045, Иваново,
ул. Академическая, 1
E-mail: kav@isc-ras.ru*

Проведено модифицирование золь оксидов вольфрама и молибдена путем воздействия подводного диафрагменного разряда. Действие плазмы приводит к появлению MoO_3 в золе оксида вольфрама и WO_3 в золе оксида молибдена. Это способствует увеличению фотоокрашивания золь и ускоряет процесс обесцвечивания растворов.

The modification of sols of tungsten and molybdenum oxides by the action of an underwater diaphragm discharge has been carried out. The action of the plasma leads to the appearance of MoO_3 in the tungsten oxide sol and WO_3 in the molybdenum oxide sol. This contributes to an increase in the photocoloration of the sols and accelerates the process of decolorization of the solutions.

Оксид вольфрама (WO_3) обладает ярко выраженными фотохромными и электрохромными свойствами за счет обратимого восстановления до степени окисления +5. Эти свойства проявляются в зависимости от размеров и структуры материала. Меняя структуру наночастиц, можно управлять скоростью перехода (временем жизни восстановленного состояния). Способы изменения структуры WO_3 заключаются в создании либо допированных, либо гетероструктур на базе химических методов синтеза [1,2]. Использование низкотемпературной плазмы как метод синтеза наноструктурированных материалов, является одним из перспективных направлений способов получения хорошо кристаллизованных наноструктур без использования химических реагентов [3]. Такие структуры обладают наименее выраженным фотохромным эффектом. С другой стороны, ранее было установлено, что действие плазмы на золь диоксида титана приводит к усилению его фотокаталитических характеристик за счет процесса допирования в ходе плазменной обработки [4]. В данной работе представлены результаты воздействия подводной низкотемпературной плазмы на золи оксидов вольфрама и молибдена с целью повышения их фотохромных характеристик.

Подводный диафрагменный разряд возбуждался в объеме жидкости от источника переменного тока. В качестве электродов использовались Mo и W проволоки с диаметром 2 мм. Ток разряда составлял 50-75 мА, рабочее напряжение 700-850 В. Время плазменной обработки составляло 60 с. В качестве жидких сред использовались растворы WO_3 и MoO_3 , приготовленные по золь-гель технологии. Растворы в кварцевых кюветах облучали УФ светом при $\lambda=256$ и 366 нм

(NU-6 KL (Konrad Benda Laborgerate, Germany)) при комнатной температуре на расстоянии 30 см между источником излучения и кюветой. Обратимость процесса окрашивания исследовали в темноте при комнатной температуре. Электронные спектры поглощения в видимой области (300-1100 нм) регистрировали на спектрофотометре СФ 56 (ООО «ОКБ СПЕКТР», Россия). До и после плазменной обработки проводили рентгенофазовый анализ зольей (дифрактометр D2 PHASER, Brucker, Германия, $\text{CuK}\alpha$ излучение).

Рентгеноструктурный анализ показал, что в результате золь-гель синтеза формируются оксиды вольфрама и молибдена аморфной структуры. После плазменной обработки появляются дополнительные фазы MoO_3 в золе оксида вольфрама и WO_3 в золе оксида молибдена. Кинетика фотоокрашивания представлена на рис. 1 в форме зависимости оптической плотности A при $\lambda=640$ нм (для золя WO_3) и при $\lambda=775$ нм (для MoO_3) от времени облучения. Эффект воздействия плазмы заметен при малых временах облучения и при изучении кинетики обесцвечивания. Для зольей WO_3 и MoO_3 явление фотохромизма обратимо. Действие плазмы ускоряет процесс обесцвечивания в 3.5 раза.

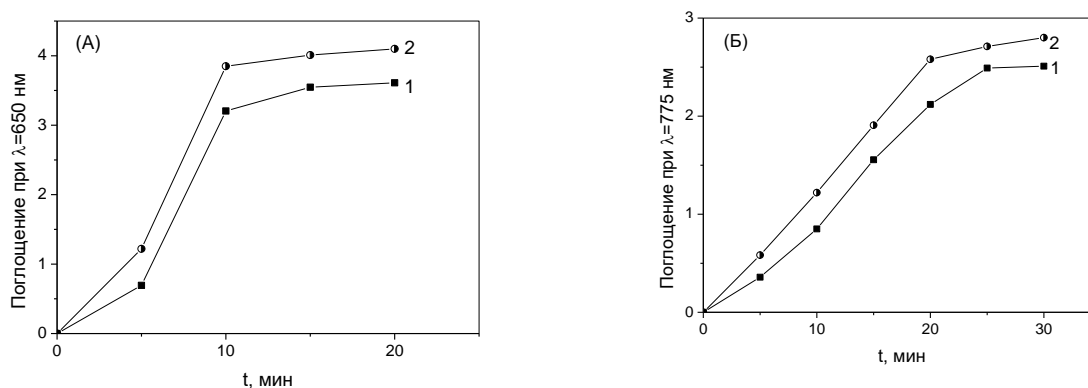


Рис. 1. Кинетика фотоокрашивания зольей оксидов вольфрама (А) и молибдена (Б) без плазменной обработки (1) и после действия плазмы (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. С.О. Avellaneda, L.O.S. Bulhoes // *Solid State Ionics* – 2003. – V. 165. – №117.
2. R. Sharma, A.K. Sharma, R. Jha, A. Sarkar // *Materials Chemistry and Physics* –2022. – V. 280. – №125813.
3. A. Khlyustova, N. Sirotkin, A. Kraev, V. Titov, A. Agafonov // *Dalton Transactions* – 2020. – V. 49. – №6270.
4. A. Khlyustova, N. Sirotkin, A. Kraev, T. Kusova, V. Titov, A. Agafonov // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* – 2021. – V. 96. – №1125.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, ОБРАБОТАННЫХ В РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

DETERMINATION OF THE THICKNESS OF THE MODIFIED LAYER OF POLYMER FILM TRATED BY DC DISCHARGE

Пискарев М.С.¹, Скрылева Е.А.², Сенатулин Б.Р.², Зиновьев А.В.¹,
Гильман А.Б.¹, Кузнецов А.А.¹
Piskarev M.S.¹, Skryleva E.A.², Senatulin B.R.², Zinoviev A.V.¹,
Gilman A.B.¹, Kuznetsov A.A.¹

¹*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
РАН, Россия, 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70*

²*Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС",
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский просп., 1
mikhailpiskarev@gmail.com*

Методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии в сочетании с прецизионным травлением кластерным пучком Ar2500⁺ с энергией 10 кэВ проведены исследования толщины модифицированного в плазме слоя пленок полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и поливинилтриметилсилана (ПВТМС). Пленки модифицированы в разряде постоянного тока пониженного давления в среде рабочего газа – фильтрованного атмосферного воздуха. Глубина кратеров травления измерялась профилографом поверхности щупа. Найденная экспериментально толщина модифицированного в плазме слоя для ПЭТФ составляла ≤ 20 нм, а для пленки ПВТМС ~ 50 нм.

X-ray photoelectron spectroscopy in combination with precision etching with an Ar2500+ cluster beam with an energy of 10 keV was used to study the thickness of the plasma-modified layer of polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyltrimethylsilane (PVTMS) films. The films are modified by low-pressure direct current discharge in a working gas medium - filtered atmospheric air. The depth of the etching craters was measured with a probe surface profilograph. The experimentally found thickness of the plasma-modified layer for PET was ≤ 20 nm, and for the PVTMS film it was ~ 50 nm.

Известно, что воздействие низкотемпературной плазмы является одним из наиболее эффективных, технологичных и экологически чистых методов модифицирования контактных и адгезионных свойств поверхности полимерных материалов. В настоящее время считается, что толщина модифицированного слоя полимеров, обработанных в различного рода разрядах, составляет от нескольких нанометров до 1–2 мкм [1]. Однако, в научной литературе известно лишь несколько работ, посвященных вопросу экспериментального определения глубины плазмохимического воздействия на поверхность полимеров, несмотря на то, что знание этого параметра важно для изучения адгезионных и прочностных свойств пленок и волокон из полимерных материалов.

В работе использовали промышленную пленку ПЭТФ марки PETLAIN BT 1010 E («Superfilm», Турция) толщиной 40 мкм. Пленки ПВТМС толщиной 60-

80 мкм получали поливом из 5% раствора полимера в толуоле на подложку из кремния. Модифицирование проводили в разряде постоянного тока при пониженном давлении на установке и с использованием методики, которые подробно описаны в [2]. Пленки помещали на аноде и катоде, рабочим газом служил фильтрованный атмосферный воздух, давление в системе составляло ~20 Па, ток разряда 50 мА, время обработки 30 с. Спектры РФЭС регистрировали с помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра PHI5500 VersaProbeII. Атомные концентрации определяли по обзорным спектрам методом факторов относительной элементной чувствительности, а энергии связи спектров C1s, Si2p и O1s – по спектрам высокого разрешения. Прецизионное травление осуществляли кластерным пучком Ar²⁵⁰⁰⁺ с энергией 10 кэВ, глубину кратеров травления измеряли профилографом поверхности щупа.

Методом РФЭС было установлено, что модифицирование приводит к увеличению количества кислорода и уменьшению количества углерода в пленке ПЭТФ. Толщину модифицированного в плазме слоя определяли по восстановлению при травлении концентраций элементов и соотношений пиков в спектрах высокого разрешения C1s и O1s до значений, характерных для исходной пленки. В результате послойного травления было установлено, что основные изменения химической структуры пленок ПЭТФ после обработки в разряде сосредоточены в слое толщиной ~20 нм [3].

Для ПВТМС в результате модификации было найдено практически полное превращение связей Si–C в связи Si–O и существенное уменьшение содержания атомов углерода. Вероятно, атомы углерода триметилсилильного фрагмента были удалены за счет деструкции в плазме в составе летучих продуктов, тогда как атомы углерода основной цепи, в основном, остались в модифицированном слое; часть из них прореагировала с образованием кислородсодержащих функциональных групп. Изменялась форма содержания кремния - наблюдалось превращение фрагментов Si[4C] в Si[4O]. При анализе изменения химического состава по глубине установлено, что модифицированный подповерхностный слой имеет градиентную структуру, а глубина оценивается ~ в 50 нм [4].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, номер темы FFSM-2021-0006 и РФФИ (грант № 20-08-00655). Исследования методом РФЭС выполнены на оборудовании центра коллективного пользования “Материаловедение и металлургия” НИТУ МИСиС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, Вводный том IV/ Под ред. Фортова В.Е, Наука, Москва, 2000.
2. T. Demina, D. Zaytseva-Zotova, M. Yablokov, A. Gilman., T. Akopova, E. Markvicheva, A. Zelenetskii // *Surf. Coat. Techn.* – 2012. – Vol. 207. – № 508.
3. М.С. Пискарев, Е.А. Скрылева, Б.Р. Сенатулин, А. Б. Гильман, А. А. Кузнецов // *Химия высоких энергий*, – 2020. – Т. 54. – № 325.
4. M. Piskarev, E. Skryleva, A. Gilman, B. Senatulin, A. Zinovev, D. Syrtsova, V. Teplyakov, A. Kuznetsov // *Coatings* – 2021. – Vol. 11. – № 1317.

Алфавитный указатель

- Ажажа И.И. 226
Абдуллин И.Ш. 27, 222, 273, 275
Аверьянова С. А. 134
Агейченков Д.Г. 182, 184
Адаменков Ю.А. 144
Акишев Ю.С. 28
Александров Н.Л. 40, 121
Алиева А.И. 190
Амиров И.И. 245
Амиров Р.Х. 347
Амосов М.П. 326
Андреев Д.А. 48
Аникеев С.Г. 302, 304
Анисимов Д.А. 180
Антипов С.Н. 73
Антонов Н.Н. 75, 198
Артемьев В.А. 326
Артемьев К.В. 54
Артёмов А.П. 172, 204
Артюхова Н.В. 302, 304
Ахмадеев Ю.Х. 226, 265, 341
Ахмадуллина Н.С. 333
Багаутдинова Л.Н. 102, 104
Багров В.В. 310, 314
Басырова Д.В. 209
Батукаев Т.С. 42
Белогловский А.А. 46
Бельгибаев Э.Р. 102
Билера И.В. 42
Битюрин В.А. 19
Богомаз А.А. 167
Бойков Д.С. 165
Бондаренко Д.А. 319
Борзосеков В.Д. 54, 333
Бочаров А.Н. 19
Будаев В.П. 180
Бузник В.М. 345
Буланов А.Д. 207
Быков Н.Ю. 158
Вавилин К.В. 319
Валиев Р.И. 102, 104
Валинуров М.А. 175
Ванькевич В.А. 202
Васильев Н.О. 232
Васильева О.Б. 271
Василяк Л.М. 22
Веселов А.П. 92
Водопьянов А.В. 56, 92, 243, 259, 293
Воеводин В.В. 44
Волков Л.С. 128
Володин Л.Ю. 291, 310, 314, 328
Волошин Д.Г. 245
Воронина Е.А. 38
Вшивцев М.А. 247, 335, 339, 343
Выбин С.С. 24
Гавриков А.В. 58, 174, 198, 321
Гаджиев М.Х. 73, 267
Гайсин Аз.Ф. 102, 104, 194
Гайсин Ал.Ф. 77, 106, 194, 253, 269
Гайсин Ф.М. 102, 104, 194
Галимова А.В. 46
Гаспарян Ю.М. 190
Гатин А.К. 211
Гашигуллин К.А. 77, 106
Гаянова Т.Э. 333
Герасимов А.В. 140
Германов Н.П. 62, 66
Гильман А.Б. 211
Глявин М.Ю. 92
Голиков А.В. 48, 60
Голубев М.С. 79, 86
Голубев С.В. 24
Гончаренко И.М. 265
Горбатов С.А. 209
Горбунов М.А. 144
Горнушкин И.Б. 300
Грачев С.Ю. 277
Григорьев С.В. 265
Григорьев Т.А. 48, 60
Григорьян Г.М. 123, 125
Гусейн-заде Н.Г. 333
Гущин Д.В. 117
Даутов И.Г. 232
Дацко И.М. 212
Дворников А.Д. 130, 156
Демьянов А.В. 123, 125, 289
Дзलिएва Е.С. 79, 86, 216
Добровольская А.С. 19
Доброклонская М.С. 146
Доломанжи А. 255
Дрожжин С.А. 81
Дудин В.С. 319

Дудник Ю.Д. 271
 Дулатов А.К. 48, 60
 Дьяков А.А. 326
 Дьяченко А.А. 176, 188
 Дятко Н.А. 123,125
 Евдокимова А.В. 357
 Евреинов Е.Ю. 261
 Егорова Ю.И. 109
 Егошин Д.А. 292, 330
 Емлин Р.В. 178
 Ермаков А.А. 154, 300
 Ершов И.П. 275
 Жарков Я.Е. 148
 Желтухин В.С. 77, 106, 150, 160, 162, 166, 228,
 273, 275
 Жигалин А.С. 202, 204, 298
 Жилиготов Р.И. 136, 152
 Жупанов В.Г. 224
 Загидуллин М.В. 130, 156
 Задириев И.И. 319
 Закиров Д.У. 253
 Заклецкий З.А. 54
 Зверев Г.А. 335
 Зверев С.Г. 277
 Зенитова Л.А. 275
 Зиновьев А.В. 211
 Зубарев Н.М. 113, 119
 Зубарева О.В. 113, 119
 Иванов А.Н. 138, 251, 345, 349
 Иванов И.А. 209
 Иванов Д.В. 236, 277
 Иванов П.П. 347
 Иванов Ю.Ф. 226, 265,341, 351
 Иванова П.А. 345
 Ивченко А.В. 249
 Изотов И.В. 24
 Ильичев И.В. 48, 60
 Ильичев М.В. 73, 267
 Иов И.Л. 176, 188
 Исмагилов Д.М. 77, 106
 Ибрафилов И.Х. 287
 Кавыршин Д.И. 180
 Кадыров А.А. 214
 Казаков Е.Д. 164
 Казиев А.В. 182, 184, 190, 240
 Калачева А.А. 144
 Калынов Ю.К. 92
 Камруков А.С. 310, 314
 Караева Н.И. 68
 Карасев В.Ю. 79, 86, 216
 Карпов А.В. 180
 Карташов С.И. 251, 349
 Кафтаринова М.И. 302, 304
 Кашапов Л.Н. 81, 83, 90, 169, 218, 230, 232, 234
 Кашапов Н.Ф. 81, 83, 90, 169, 218, 230, 232, 234
 Кашапов Р.Н. 81, 83, 90, 169, 218, 230, 232, 234
 Каюмов Р.Р. 269
 Кириллов Д.В. 200
 Киселев Г.Б. 166
 Киселёва Е.М. 24
 Князев А.А. 343
 Князев А.В. 333
 Коваль Н.Н. 17, 341
 Кожевников В.Ю. 50, 117
 Кожубаев Ю.Н. 136
 Козлов А.А. 238
 Козлов А.В. 238
 Козырев А.В. 50, 121
 Коковин А.О. 50, 121
 Коликов В.А. 353
 Колодко Д.В. 182, 184, 190, 240
Комов А.Н. 249
 Кондратьев А.В. 310, 314
 Кондюрин А.В. 317
 Коньков А.А. 180
 Коржова О.И. 56
 Корнев Р.А. 113, 154, 207, 300
 Корнев Д.В. 271
 Коробейщиков Н.Г. 220
 Костюков Д.А. 255
 Костюкова Н.М. 306
 Костюченко С.В. 22
 Кончечков Е.М. 333
 Кочетков И.В. 123, 125
 Кочетов И.В. 289
 Кравченко Д.А. 323
 Кралькина Е.А. 319
 Крашевская Г.В. 42
 Крисковец Д.С. 236
 Кропоткин А.Н. 245
 Крысина О.В. 341
 Кувардин С.Е. 192
 Кудрявцев Н.Н. 22
 Кудряшов М.А. 247, 335, 339, 343
 Кудряшова Ю.П. 335, 343
 Кузенов В.В. 38
 Кузнецов А.Ю. 52
 Кузнецов А.А. 211

Кузьминых А.М. 298
Кукушкина М.С. 240
Купряев Н.В. 100
Купутдинова А.И. 253, 269
Куракина Н.К. 134, 136, 152
Курявый В.Г. 337
Кустова Е.В. 64, 66
Лазарев Е.Н. 150
Лебедев Ю.А. 42, 261
Лемешко Б.Д. 48, 60
Лисенков В.В. 279
Лисенков В.Ю. 184
Лисицын Д.А. 68
Литвинов В.В. 316
Лобастов И.А. 326
Лопатин И.В. 265
Лопаев Д.В. 245
Лубин А.А. 281
Лукашевский М.В. 180
Лучкин А.Г. 162
Майстренко Д.А. 186
Малахов Д.В. 66, 333
Мальцев М.А. 33
Макарова С.В. 353
Мамедов И.М. 132
Манегин Д.С. 263
Мансфельд Д.А. 56, 243, 293
Маринин С.Ю. 319
Мартьянов Д.Э. 283, 285
Мастюков К.Ш. 77, 106
Маслаев А.М. 158
Масленников С.П. 132
Машин А.В. 243
Мельников А.Д. 58, 198
Миненков Ю.В. 33
Мирханов Д.Н. 269
Михайлов Ю.В. 48, 60
Михеев П.А. 130, 156, 289
Мокшин А.В. 35
Москвин П.В. 265
Моралев И.А. 192
Морозов И.В. 33
Морозов П.А. 178
Мочалов Л.А. 247, 335, 339, 343
Муравьева Е.А. 180
Мурашов Ю.В. 136, 152
Мурсенкова И.В. 52
Мязин А.С. 180
Назаров В.В. 117
Наумова И.К. 42
Нафиков М.М. 312
Нафиков Ман. Мак. 312
Нежданов А.В. 243
Некрасов И.К. 27, 222, 273
Николаев И.В. 220
Никонов А.М. 319
Новиков Д.О. 308
Новиков Л.А. 79, 86, 216
Новиков П.А. 224
Образцов Н. В. 134, 137, 152, 158
Овцын А.А. 255
Овчинников Н.Л. 251
Огородников А.И. 279
Одиноков В.В. 255
Ойлер А.П. 75, 174, 321
Ольховская О.Г. 164
Орешкин В.И. 172, 202, 204, 298
Осина Е.Л. 33
Павлов А.В. 196, 328
Палов А.П. 245
Павлик Т.И. 306
Павлов С.И. 79, 84, 216
Павлова Е.А. 271
Павлова М.И. 306
Панкова Е.А. 160
Пасынкова Д.С. 224
Пахолкина С.А. 304
Перевошиков Е.Е. 19
Перфильева А.В. 281
Петрухина Д.И. 209
Петрикова Е.А. 265, 341, 351
Петряков А.В. 28
Пинчук М.Э. 167, 177, 188, 353
Пискарев М.С. 212
Поварёшкин А.М. 238
Подлосинская А.П. 328
Подкин А.В. 279
Полевой Д.Е. 291, 314, 328
Полисадов С.С. 115, 257
Полищук В.П. 198, 238
Полищук П.В. 58
Поляков А.В. 24
Пономарев А.А. 121
Попов Д.И. 146
Попов С.Д. 281, 285
Преображенский Е.И. 56, 243, 259, 293
Прокопенко Н.А. 341, 351
Прокуратов И.А. 48, 60

Протасов Ю.Ю. 196
Прохоров И.О. 247, 335, 339, 343
Пушкарев А.И. 115, 257
Разин С.В. 24
Рахимов Р.Р. 287
Рахимова Т.В. 245
Рахматуллина Г.Р. 160
Ремез М.А. 56, 293
Ригин А.В. 100
Рогозин К.А. 180
Романов К.И. 148
Русских А.Г. 172, 202, 204, 298
Рыбкин В.В. 138, 251, 345, 349
Рыжков С.В. 50
Рыкунов Г.И. 190, 240
Рябов А.Ю. 257
Рязанов В.А. 200, 263
Савин А.Ю. 162
Сагитова Ф.Р. 27, 222, 238, 273, 295
Садыков И.Н. 140
Сазонов Н.С. 182
Сайфутдинов А.И. 74, 76, 78, 117
Сайфутдинова А.А. 74, 76, 78
Саргсян М.А. 267
Саубанов Р.Р. 287
Сафронов А.А. 271
Секачева М.Д. 38
Селивонин И.В. 192
Семенов М.Н. 194
Семенюк Н.С. 50, 115
Сенатулин Б.Р. 211
Сергеев П.В. 90
Сидоров А.В. 92
Синцов С.В. 56, 245, 259, 293
Сироткин Н.А. 355, 357
Скальга В.А. 24
Скворцова Н.Н. 333
Скорняков В.М. 340
Скрылева Е.А. 201
Скрябин А.С. 196, 224
Слаповская Е.А. 335, 343
Смирнов С.Г. 312
Смирнова А.Р. 164
Смирнова К.В. 261, 345
Снетов В.Н. 353
Соколов А.С. 333
Соловьев В.Р. 68
Солодников С.Ю. 316
Сорокина А.Р. 62
Стариковский А.Ю. 40
Степанова О.М. 176, 188
Степахин В.Д. 333
Стищенко П.В. 220
Строкин Н.А. 88
Субботин Д.И. 271, 283, 285, 353
Сумаренко А.А. 263
Суров А.В. 158
Сухих М.Е. 77, 106
Сырцова Д.А. 211
Сысоев С.С. 117
Тазмеев А.Х. 96
Тазмеев Г.Х. 94, 96
Тазмеев Х.К. 94, 96
Тарасов Д.А. 19
Телех В.Д. 196, 224, 324, 338, 330
Тепляков В.В. 210
Терентьев Т.Н. 166
Титов В.А. 30
Тихонов А.В. 209
Тихонов И.Н. 279
Тихонов В.Н. 209
Ткаченко С.И. 164
Толкачев О.С. 341, 351
Томаев В.В. 216
Тонконогов Е. Н. 134
Торбин А.П. 289
Трошкин Р.С. 19
Тряскин Я.В. 167
Туманов Н.А. 263
Тумаркин А.В. 182
Тюфтяев А.С. 73, 98, 267
Углов В.В. 341
Узвлок А.А. 132
Усманов Р.А. 58, 174, 198, 321
Файрушин И.И. 35
Фахрутдинова И.Т. 104
Федоров А.Д. 314
Федорова Д.К. 330
Федорович С.Д. 180
Федюнин А.В. 172
Федянин Н.К. 323
Фефелова Е.А. 28
Филимонова Е.А. 347
Фирсов А.А. 19, 70, 128
Фролова 214
Фролов В.Я. 236
Харьков М.М. 240
Хафизов А.А. 102, 104

Хватов А.А. 158
Хлюстова А.В. 355, 357
Хомич В.Ю. 44
Хошев А.В. 255
Хузина Р.Р. 312
Цвентух М.М. 240
Чайковский С.А. 202
Чан К.В. 180
Чебакова В.Ю. 169
Чебыкин Е.О. 291
Чекмарев Н.В. 56, 243, 259, 293
Чесноков Д.А. 224
Чиликина П.А. 318
Чиннов В.Ф. 180
Чистолинов А.В. 98, 281
Чувашев С.Н. 291
Чудинов В.С. 316
Шабалина А.В. 302
Шабарова Л.В. 154, 300
Шавелкина М.Б. 337
Шагайда А.А. 186
Шагивалиева Р.Р. 160
Шаехов М.Ф. 160
Шайдулина В.А. 144
Шакиров А.М. 269
Шакиров Р. И. 228, 295
Шардаков И.Н. 316
Шарифуллин Ф. С. 228, 295
Швьдкий Г.В. 319
Шемахин А.Ю. 142, 165
Шепеленко А.А. 100
Шершунова Е.А. 148
Шибаета В.Д. 357
Шимлых П.А. 200
Ширяев В.Н. 271
Шишилов О.Н. 333
Шкрунин В. Е. 300
Шмаков А.Н. 341
Шнайдер М.Н. 40
Шубников А.В. 255
Шугуров В.В. 226, 341, 351
Шумейко А.И. 324
Шурупов А.В. 238
Шутов Д.А. 138, 251, 345, 349
Щепанюк Т.С. 196
Щербаков Е.Н. 178
Юрьев А.В. 144
Юсупов Д.И. 73, 267
Юшин Б.А. 214, 236
Якушин Р.В. 281
Яландин М.И. 113, 119
Ямщиков В.А. 44

Для заметок

Научное издание

**ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
(ФНТП-2023)**

**Сборник тезисов
Всероссийской (с международным участием) конференции**

Казань, 5–9 июня 2023 г.

Верстка
Л.Н. Кашанов

Подписано в печать 26.05.2023.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 21,2. Уч.-изд. л. 19,3. Тираж 250 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37

тел. (843) 206-52-14 (1704), 206-52-14 (1705)