

Российская Академия Наук
Российский фонд фундаментальных исследований
Академия Наук Республики Татарстан
Министерство образования и науки Республики Татарстан
Научный совет РАН по комплексной проблеме "Физика
низкотемпературной плазмы"
ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН»
ФГБУН «Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН»
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

ВСЕРОССИЙСКАЯ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ
УЧАСТИЕМ) КОНФЕРЕНЦИЯ
«ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»
ФНТП-2017

5 – 9 июня 2017 г.

Сборник тезисов

Казань

2017

УДК 533.9
ББК 22.333

Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017: сборник тезисов; – Казань: Изд-во «Отечество», 2017. – 266 с.

ISBN 978-5-9222-1167-3

Представлены материалы Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017, где отражены новые направления развития физики низкотемпературной плазмы и смежных областей.

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

Конференция проведена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 17-02-20165.

Редакционная коллегия:

Кашапов Н.Ф. – проректор по инженерной деятельности КФУ, зам. председателя

Файрушин И.И. – доцент КФУ, ученый секретарь

Фадеев С.А. – ассистент КФУ

Шайдуллин Л.Р. – инженер КФУ

ISBN 978-5-9222-1167-3

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
Пленарные доклады	21
Amouroux J., Dresvin S. DBD DISCHARGE PROCESS: A SPECIFIC PLASMA TOOL FOR GAS TREATMENT	22
<u>Benova E.</u> , Topalova Y., Todorova Y., Marinova P., Atanasova M., Bogdanov T., Yotinov I., Ivanov K., Tsonev I. SURFACE-WAVE-SUSTAINED ARGON PLASMA TORCH FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS	23
<u>Boeuf J.P.</u> , Dubois L., Gaboriau F., Liard L. ION ACCELERATION THROUGH A MAGNETIC BARRIER SINGLE STAGE AND DOUBLE STAGE HALL THRUSTER	24
Peter J. Bruggeman PLASMA WATER VAPOR KINETICS AND PLASMA-LIQUID INTERACTIONS	25
Guerra V. and Marinov D. KINETIC MONTE CARLO ALGORITHMS FOR SURFACE KINETICS	26
<u>Lacoste A.</u> , Baele P., Ortega A.M., Bes A., Bechu S. ELEMENTARY MICROWAVE PLASMA SOURCES WITH EXTENDED OPERATING PARAMETERS (FROM LOW TO HIGH- PRESSURES) FOR LARGE AREA DEPOSITION	27
Pitchford L.C. DATA NEEDED FOR MODELING LOW-TEMPERATURE PLASMAS	28
Shneider M.N. NANOPARTICLES IN THE VICINITY OF THE ARC DISCHARGE	29
<u>Акишев Ю.С.</u> , Балакирев А.А., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ГАЗОВЫМИ РАЗРЯДАМИ В ПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ: ФИЗИКА, ПРИЛОЖЕНИЯ	30
<u>Амиров Р.Х.</u> , Исакаев Э.Х., Шавелкина М.Б. ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ПЛАЗМОСТРУЙНОМ РЕАКТОРЕ: СИНТЕЗ, ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ	31
Лебедев Ю.А., Татаринov А.В., Эпштейн И.Л. МИКРОВОЛНОВЫЕ РАЗРЯДЫ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ	32
<u>Petrov O.F.</u> , Statsenko K.B., Vasiliev M.M. EVOLUTION OF ACTIVE STRUCTURES IN NON-IDEAL DUSTY PLASMA	33
<u>Попов Н.А.</u> , Стариковская С.М., Щербанев С.А. НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ: ФИЗИКА И ПРИМЕНЕНИЕ	34
<u>Шарафутдинов Р.Г.</u> , Сон Э.Е. ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ПЛАЗМА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ И ТЕХНОЛОГИИ НА ЕЕ ОСНОВЕ	35
Кашапов Н.Ф. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ И ПРИМЕНЕНИЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В КАЗАНСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ	36

Секция 1. ФИЗИКА ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ	37
Швейгерт И.В., Александров А.Л., Фомичев В.П., Ядренкин М.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ ТИПА ХОЛЛОВСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УСЛОВИИ ПОВЫШЕННОЙ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ С ПОВЕРХНОСТИ Al_2O_3 , БОМБАРДИРУЕМОЙ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ	38
<u>Schweigert I.V.</u> , Alexandrov A.L. EFFECT OF SECONDARY ELECTRON EMISSION ON SUBNANOSECOND BREAKDOWN IN HIGH-VOLTAGE PULSE DISCHARGE	39
<u>Schweigert I.</u> , Keidar M. PERIODICAL PLASMA STRUCTURES CONTROLLED BY EXTERNAL MAGNETIC FIELD	40
Lepikhin N., Pokrovskiy G., Popov N., <u>Starikovskaja S.</u> CAPILLARY NANOSECOND DISCHARGE IN MOLECULAR GASES: HIGH ELECTRIC FIELDS AT HIGH SPECIFIC DEPOSITED ENERGY	41
<u>Гайсин Ал.Ф.</u> , Сон Э.Е., Кашапов Н.Ф. РАЗРЯД МЕЖДУ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫМ ЖИДКИМ КАТОДОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ	42
<u>Автаева С.В.</u> , Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яковлева Т.С. ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ДИАГНОСТИКА КЛАСТИРОВАННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ АЗОТА	43
Автаева С.В. О ВЛИЯНИИ ПРИЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ХЛОРЕ И ЕГО СМЕСЯХ С КСЕНОНОМ	44
<u>Алексеева М.Ю.</u> , Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О., Галиханов М.Ф., Низамеев И.Р. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОМАСЛЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИСУЛЬФОНАМИДНЫХ МЕМБРАН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УНИПОЛЯРНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ	45
<u>Богданова М. А.</u> , Лопаев Д.В., Зырянов С.М., Рахимова Т.В., Волошин Д.Г. ПОТОК И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ НА ЭЛЕКТРОДЕ В ДВУХЧАСТОТНОМ ВЧЕ РАЗРЯДЕ	46
Даутов Г.Ю., Дресвин С.В., <u>Гафаров И.Г.</u> ИЗ ИСТОРИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 0.1 – 3.0 ТОРР	47
Войтешонок В.С., <u>Головин А.И.</u> , Туркин А.В., Шлойдо А.И. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СТАЦИОНАРНОМ ОТКРЫТОМ РАЗРЯДЕ	48
Соколова М.В., <u>Воеводин В.В.</u> , Малашин М.В., Ребров И.Е., Киселев Н.А. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	49
<u>Фадеев С.А.</u> , Сайфутдинов А.И., Кашапов Н.Ф. ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗРЯДА В АРГОНЕ	50

Асюнин В.И., <u>Давыдов С.Г.</u> , Долгов А.Н., Ревазов В.О., Якубов Р.Х. ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ИМПУЛЬСОМ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ $10^6 - 10^{10}$ ВТ/СМ ²	51
Двинин С.А. К ТЕОРИИ ШНУРОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО И НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДОВ В ГАЗЕ	52
<u>Двинин С.А.</u> , Довженко В.А., Синкевич О.А. ИОНИЗАЦИОННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАЗРЯДАХ В ОГРАНИЧЕННОЙ СРЕДЕ	53
<u>Eliseev S.I.</u> , Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A. ACCOUNT OF NONLOCAL IONIZATION AND SLOW ELECTRON ENERGY BALANCE IN GLOW DISCHARGE MODELS	54
<u>Залялиев Б.Р.</u> , Тимеркаев Б.А., Сайфутдинов А.И., Амирзянов Д.Р. ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ ОРГАНИЗАЦИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ГАЗА	55
Simonchik L.V., <u>Kazak A.V.</u> ON THE FEATURES OF ELECTRIC FIELDS CHARACTERIZATION IN DC ATMOSPHERIC PRESSURE HELIUM DISCHARGES USING POLARIZED STARK SPECTROSCOPY	56
<u>Kazak A.V.</u> , Simonchik L.V., Dudchik N.V., Emeliyanova O.A. APPLICATION OF DC ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA JETS FOR INACTIVATION OF MICROORGANISMS CONSORTIUMS	57
Bityurin V.A., Bocharov A.N., Kazanskiy P.N., <u>Karmatsky R.E.</u> , Moralev I.A. THE INFLUENCE OF EXTERNAL FLOW ON THE DYNAMIC OF ARC CHANNEL MOVING ALONG THE WALL WITHIN A MAGNETIC FIELD	58
<u>Касьянов В. С.</u> , Королев Ю. Д., Шемякин И. А., Гейман В. Г., Болотов А. В., Нехорошев В. О. ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ПОЛОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ И РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В НИХ ПРИ НАПРЯЖЕНИЯХ БЛИЗКИХ К ПОРОГОВОМУ	59
<u>Landl N.V.</u> , Korolev Yu.D., Frants O.B., Geyman V.G., Bolotov A.V., Argunov G.A., Nekhoroshev V.O. CURRENT PASSAGE MECHANISM OF THE AUXILIARY GLOW DISCHARGE IN THE TRIGGER UNIT OF A COLD-CATHODE THYRATRON	60
В.М. Лелевкин СВЧ РАЗРЯД В ПОТОКЕ ГАЗА	61
Астрелин В.Т., <u>Воробьёв М.С.</u> , Кандауров И.В., Коваль Н.Н., Куркучеков В.В., Сулакшин С.А., Трунев Ю.А. СРАВНЕНИЕ ДВУХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ СУБМИЛЛИСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ВАКУУМНЫХ ДИОДАХ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ	62
Батенин В.М., Карпухин В.Т., <u>Маликов М.М.</u> , Казарян М.А. ИМПУЛЬСНО - ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ВЧ-РАЗРЯД ИНДУКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ	63

ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА САМООГРАНИЧЕННЫХ ПЕРЕХОДАХ	
<u>Molotkov V.I.</u> , Naumkin V.N., Lipaev A.M., Zhukhovitskii D.I., Usachev A.D., Fortov V.E.1, Thomas H.M.	64
EXPERIMENTS ON PHASE TRANSITIONS IN 3D DUSTY PLASMA UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS	
<u>Паркевич Е.В.</u> , Ткаченко С.И., Агафонов А.В.	65
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОМ НАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ В ДИОДЕ С ОСТРИЙНЫМ КАТОДОМ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	
Головицкий А.П., <u>Пелли А.В.</u>	66
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ Хе И Si2 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСИМЕРНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА	
Понизовский А.З., <u>Гостеев С.Г.</u> , Кужель О.С.	67
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКАМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА	
<u>Селивонин И.В.</u> , Моралев И.А.	68
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ 'ПОВЕРХНОСТНЫЙ ДБР - ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ'	
<u>Селивонин И.В.</u> , Лазукин А.В., Моралев И.А., Кривов С.А.	69
МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ КРОМКИ И ПРИЛЕЖАЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БАРЬЕРА В ПОВЕРХНОСТНОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ	
<u>Соловьев В.Р.</u> , Кривцов В.М.	70
НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ	
Arefyev K.Yu., Prokhorov A.N., Son E.E., <u>Son K.E.</u>	71
SCIENTIFIC RESEARCH IN LABORATORY OF HYPERSONIC AND PLASMA TECHNOLOGIES	
<u>Сорокин Д.А.</u> , Ломаев М.И., Белоплов Д.В., Тарасенко В.Ф.	72
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗЫ ПРОБОЯ ПРОМЕЖУТКА "ОСТРИЁ-ПЛОСКОСТЬ" ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ АЗОТА, АРГОНА И ВОЗДУХА	
<u>Тарасенко В.Ф.</u> , Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А.	73
ЛАБОРАТОРНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ В ВОЗДУХЕ МИНИ-СТРУЙ ГОЛУБОГО И КРАСНОГО ЦВЕТА	
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Медведев М.А., Петряков А.В., <u>Трушкин Н.И.</u>	74
ДИНАМИКА ПЕРЕХОДА СИЛЬНО ПЕРЕНАПРЯЖЕННОГО ДИФФУЗНОГО РАЗРЯДА В КОНТРАГИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ С СИЛЬНОТОЧНЫМИ КАТОДНЫМИ ПЯТНАМИ В H ₂ И D ₂	
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., <u>Трушкин Н.И.</u> , Шафиков А.Г.	75
СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В H ₂ И D ₂ В ПЕРЕНАПРЯЖЕННОМ ДИФФУЗНОМ И НИЗКОВОЛЬТНОМ КОНТРАГИРОВАННОМ РЕЖИМАХ	

<u>Усманов Р.А.</u> , Амиров Р.Х., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Полищук В.П., Першин Д.А., Самойлов И.С., Смирнов В.П., Ярцев И.М. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФFUЗНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА КАТОДЕ ИЗ ОКСИДА ЦЕРИЯ, МОДЕЛИРУЮЩЕГО ОКСИД УРАНА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ОЯТ	76
Асюнин В.И., Давыдов С.Г., Долгов А.Н., <u>Якубов Р.Х.</u> ИНИЦИИРОВАНИЕ РАЗРЯДА В ВАКУУМНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПУТЕМ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ ПРОБОЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА	77
<u>Асадуллин Т.Я.</u> , Галеев И.Г. КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА	78
<u>Ахатов М.Ф.</u> , Каюмов Р.Р., Гайсин Ф.М. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ЖИДКОСТИ	79
<u>Белоплотов Д.В.</u> , Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А. СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ПРОБОЙ ПРОМЕЖУТКОВ ЛЕЗВИЕ–ПЛОСКОСТЬ И ЛЕЗВИЕ–ЛЕЗВИЕ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ АЗОТА	80
<u>Белоплотов Д.В.</u> , Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИССД КАМЕРЫ СВЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ПРЕДПРОБОЙНОЙ СТАДИИ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ, АРГОНЕ И АЗОТЕ ПРИ ОБЕИХ ПОЛЯРНОСТЯХ	81
<u>Гайнуллин Р.Н.</u> , Кирпичников А.П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОГО ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	82
Гарипов М.М., <u>Юнусов Р.Ф.</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ПОТОКОМ ГАЗА	83
Гарипов М.М., <u>Юнусов Р.Ф.</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ	84
Герасимов А. В., Кирпичников А. П., <u>Сабирова Ф. Р.</u> МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМОВ ПРОВОДИМОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ, ПЛОТНОСТИ ТОКА И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ВЧИ-РАЗРЯДЕ	85
Адамс С.Ф., Демидов В.И., Кудрявцев А.А., Курляндская И.П., Майлс Д.А., Толсон Б.А. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ И ДЛИНЫ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА НА УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ КРИВЫХ ПАШЕНА В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ	86
<u>Kartasheva A. A.</u> , Golubovskii Yu. V., Karasev V. Yu. DUST PARTICLE CHARGE DETERMINATION IN CONSIDERATION OF NON-LOCAL EFFECTS IN A STRATIFIED GLOW DISCHARGE	87
<u>Касьянов В. С.</u> , Королев Ю. Д., Шемякин И. А., Гейман В. Г., Болотов А. В., В. О.Франц О. Б РАЗВИТИЕ ГАЗОВЫХ ПОЛОСТЕЙ И РАЗРЯДОВ В НИХ ПРИ НАПРЯЖЕНИЯХ ВЫШЕ ПОРОГОВОГО	88

<u>Кашапов Л.Н.</u> , Кашапов Р.Н. ИССЛЕДОВАНИЯ РОСТА ПАРОВОЗДУШНОЙ ОБОЛОЧКИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ РАСТВОРА ГИДРООКСИДА НАТРИЯ	89
Богданов Е.А., <u>Кудрявцев А.А.</u> , Рабаданов К. М. РОЛЬ АМБИПОЛЯРНОГО ПОЛЯ В ФОРМИРОВАНИИ ФРЭ И КРИТЕРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ	90
<u>Куркин С.А.</u> , Дербенев И.Н., Дятко Н.А., Филиппов А.В. КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ	91
Лебедев Ю.А., Аверин К.А., Иванов А.О., Борисов Р. С., Гарифуллин А.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ СВЧ РАЗРЯДА В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ	92
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., <u>Медведев М.А.</u> , Петряков А.В., Трушкин Н.И. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СТРИМЕРА ПО ПУЗЫРЮ, ПЛАВАЮЩЕМУ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ	93
Khomich V. Yu., Malashin M. V., Moshkunov S. I., <u>Podguyko N. A.</u> , Shershunova E. A. DYNAMICS OF NANOSECOND DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE DEVELOPMENT IN SYMMETRICAL AND ASYMMETRICAL DISCHARGE GAPS	94
Паль А. Ф., <u>Рябинкин А. Н.</u> , Серов А. О., Филиппов А. В. КРУГОВОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА	95
<u>Savichkin D. O.</u> , Kristya V. I. MODELING OF THE ION AND FAST ATOM ENERGY SPECTRA IN AN ARGON TOWNSEND DISCHARGE	96
Паль А. Ф., Рябинкин А. Н., <u>Серов А. О.</u> , Филиппов А. В. КОАГУЛЯЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО ВЧ РАЗРЯДА	97
<u>Султангалиева Г.И.</u> , Миронов М.М., Гребенщикова М.М. ОБРАБОТКА КСЕНОПЕРИКАРДА ХИРУРГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМОЙ	98
<u>Surov A. V.</u> , Popov S. D., Serba E. O., Nakonechny Gh. V., Subbotin D. I., Pavlov A. V., Spodobin V. A., Nikonov A. V. HIGH VOLTAGE AC PLASMA TORCH OPERATING ON VAPORS OF ORGANIC SUBSTANCES	99
Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев А.Х. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИСКРОВЫХ КАНАЛОВ В ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ И МЕДНЫМ АНОДОМ	100
<u>Тарасенко В.Ф.</u> , Бураченко А.Г., Бакшт Е.Х. ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКОВ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ ПРОБОЯ ГАЗОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	101
Сапронова Т.М., <u>Ульянов К.Н.</u> ТЕОРИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С УЧЁТОМ ТЕРМОЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ	102

Аньшаков А.С., Бутаков Е.Б., Домаров П.В., <u>Урбах А.Э.</u> , Чредниченко М.В. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА В ПОЛОСТИ ЭЛЕКТРОДА ПЛАЗМОТРОНА НА ЕГО ЭРОЗИЮ	103
Кузенов В.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. СИСТЕМА ИМПУЛЬСНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ РАЗРЯДОВ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ	104
Badriev I.B., Zheltukhin V.S., <u>Chebakova V. Yu.</u> SIMULATION CAPACITIVE COUPLED RADIO-FREQUENCY DISCHARGE: LOCAL AND NONLOCAL APPROXIMATION	105
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И., <u>Шафииков А.Г.</u> ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ВДОЛЬ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ	106
Khomich V. Yu., Moshkunov S.I., <u>Shershunova E.A.</u> DIFFERENCE IN DBD DEVELOPMENT IN AIR AT NANOSECOND AND MICROSECOND VOLTAGE RISE TIME	107
Khomich V. Yu., Podguyko N.A., Moshkunov S.I., <u>Shershunova E.A.</u> DBD-PLASMA SOURCE FOR POLIMER TREATMENT	108
Лебедев Ю. А., <u>Татаринов А. В.</u> , Эпштейн И. Л., Титов А. Ю. ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК АЗОТА НА ЭЛЕКТРОДНЫЙ СВЧ РАЗРЯД ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДОРОДЕ	109
<u>Мирханов Д.Н.</u> , Гайсин Ал.Ф. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ АНОДОМ	110
<u>Габдрахманов А.Т.</u> , Ибрафилов И.Х., Галиакбаров А.Т. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПАРОВАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ АЛЮМИНИЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ И ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ЕГО ФОРМУ	111
Секция 2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕ	112
Пономарев А.А., <u>Александров Н.Л.</u> КИНЕТИКА ЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ O ⁻ В РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ ПАРОВ ВОДЫ	113
Анохин Е.М., Попов М.А., Стариковский А.Ю., <u>Александров Н.Л.</u> ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАСПАД ПЛАЗМЫ В ГОРЮЧИХ СМЕСЯХ ПРИ ИХ ВОЗБУЖДЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЯДОМ	114
Апфельбаум Е. М. РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ Mo И Та	115
Арделян Н.В., <u>Бычков В.Л.</u> , Космачевский К.В. ПРОЦЕССЫ ПРИЛИПАНИЯ И ОТЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРЕДПОРОГОВЫХ УСЛОВИЯХ В ПЛАЗМЕ ВОЗДУХА	116
<u>Ланкин А.В.</u> ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ПЛОТНОСТИ НА РЕКОМБИНАЦИЮ ИОНОВ В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ	117

Воробьев В. С. ОСОБЕННОСТИ ТРОЙНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЕ	118
J.P.Booth, O.Guaitella, A.Chatterjee, Д.В.Лопаяев, С.М.Зырянов, Т.В.Рахимова, Д.Г.Волошин ДИССОЦИАЦИЯ O ₂ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ В ПЛАЗМЕ	119
Arkhipov D.N., Astashkevich S.A., Mityureva A.A., Smirnov V.V. PHOTOIONIZATION OF HYDROGEN MOLECULAR ION BY ULTRASHORT PHOTO-PULSE	120
Секция 3. ДИАГНОСТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ	121
Хусаинов Ю.Г., Рамазанов К.Н., <u>Муртазин Д.А.</u> , Золотов И.В. MODELLING OF IONNITRIDING IN HIGH-DENSITY GLOW DISCHARGE PLASMA	122
Хусаинов Ю.Г., Рамазанов К.Н., Агзамов Р.Д., <u>Муртазин Д.А.</u> , Бекасов В.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ	123
<u>Денисов В.В.</u> , Островерхов Е.В., Лопатин И.В., Ковальский С.С., Коваль Н.Н., Щанин П.М. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА В ИМПУЛЬСНОМ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОЛЫМ КАТОДОМ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА	124
Акишев Ю.С., <u>Каральник В.Б.</u> , Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафиков А.Г. ШИРИНА ЛИНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ, ИСПУЩЕННОГО У КАТОДА В ПЕРЕНАПРЯЖЕННОМ И КОНТРАГИРОВАННОМ РАЗРЯДЕ В H ₂ И D ₂	125
Акишев Ю.С., <u>Каральник В.Б.</u> , Медведев М.А., Петряков А.В., Трушкин Н.И. ДИНАМИКА КОНТРАКЦИИ ШИРОКОАПЕРТУРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИИ В H ₂ И D ₂ ПРИ МАЛЫХ ДАВЛЕНИЯХ	126
<u>Ломаев М.И.</u> , Климов А.С., Окс Е.М., Андрейчик А.П. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМОЙ ФОРВАКУУМНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ БЕЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	127
Варданян Э.Л., Рамазанов К.Н., <u>Нагимов Р.Ш.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА	128
Бекасов В.С., Варданян Э.Л., Кудрявцев А.А., <u>Нагимов Р.Ш.</u> , Рамазанов К.Н. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ	129
Babaeva N.Yu., <u>Naidis G.V.</u> DYNAMICS OF SUBNANOSECOND BREAKDOWN OF HIGH-PRESSURE GASES	130
G.V. Naidis SIMULATION OF PREBREAKDOWN PROCESSES IN DIELECTRIC LIQUIDS	131
Ortega A.M., Bes A., Bechu S., Lacoste A. MODELLING AND CHARACTERIZATION OF ELEMENTARY MICROWAVE	132

PLASMA SOURCES AT MEDIUM PRESSURE (1 TO 50 TORR) FOR HIGH RATE DEPOSITION	
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Медведев М.А., <u>Петряков А.В.</u> , Трушкин Н.И. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ВДОЛЬ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ, С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИКА И МЕТАЛЛА	133
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., <u>Петряков А.В.</u> , Трушкин Н.И., Шафиков А.Г. ФОРМА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПРИ ЕЕ СТОЛКНОВЕНИИ С НЕПОДВИЖНОЙ И ДВИЖУЩЕЙСЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	134
Сухинин Г.И., Сальников М.В., Федосеев А.В., Ростом А.М.. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПЛАЗМЫ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВЕЙКА ЗА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ	135
<u>Вафин Р.К.</u> , Ягафаров И.И., Хусаинов Ю.Г., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. ВЛИЯНИЕ СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	136
<u>Вафин Р.К.</u> , Швейва Т. В., Асылбаев А.В., Мухаметов Р.И., Николаев А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	137
Садилкин А.Г., Прохорович Д.Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСКУЛЯРНОЙ ЭМИССИИ ИЗ ПЕННИНГОВСКИХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ	138
<u>Филиппов А.В.</u> , Дербенев И.Н., Паутов А.А., Родин М.М. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В ПЛАЗМЕ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ	139
Франк А.Г. ДИАГНОСТИКА 3D СТРУКТУРЫ ТОКОВ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ХВОСТОВОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ	140
<u>Шахатов В.А.</u> , Лебедев Ю.А., *Lacoste A., *Vechu S. КИНЕТИКА ЗАСЕЛЕНИЯ ТРИПЛЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЫ ВОДОРОДА В ЭЦР РАЗРЯДЕ	141
<u>Шемахин А.Ю.</u> , Желтухин В.С. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ВЧ-ПЛАЗМЫ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ	142
Асташкевич С.А., Богданов Е.А., Кирсанов Г.В., <u>Кудрявцев А.А.</u> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКАМЕРНОЙ ФОТОПЛАЗМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	143
<u>Волынец А. В.</u> , Лопаев Д. В., Зотович А.И., Зырянов С.М., Рахимов А.Т. ASTINOMETRY OF O, N AND F ATOMS	144
<u>Галеев И.Г.</u> , Асадуллин Т.Я. MODELING OF GLOW DISCHARGE IN A GAS FLOW	145
<u>Деревянкин П.Г.</u> , Пенкин И.А., Сайфутдинова А.З., Клементьева И.Б., Пинчук М.Э., Лекс А.Г.	146

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА	
Дешко К.И.	147
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ МИНИАТЮРНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА	
<u>В.С. Желтухин</u> , И.А. Бородаев, А.А.Шахыров	148
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИЭТИЛЕНА	
Азанова А.А., Бородаев И.А, <u>Желтухин В.С.</u> , Шахыров А.А.	149
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С ТРИКОТАЖЕМ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН	
Жуховицкий Д.И., Наумкин В.Н., Хуснулгатин А.И., <u>Молотков В.И.</u> , Липаев А.М.	150
АНОМАЛЬНАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ РАДИОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ	
Коваль Т.В., <u>Кулигин С.М.</u> , Рябчиков А.И., Чан Ми Ким Ан	151
ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ	
<u>Ломовицкий П.В.</u> , Филиппов А.В.	152
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЗАРЯДА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ВЛАСОВА С УЧЕТОМ СТОЛКНОВЕНИЙ И СТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ	
<u>Паутов А.А.</u> , Филиппов А.В.	153
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПОСТОЯННЫХ ПОТЕНЦИАЛАХ ПОВЕРХНОСТИ	
<u>Родин М.М.</u> , Филиппов А.В.	154
ТОЧНЫЕ И ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЕМКОСТНЫХ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ СФЕРИЧЕСКИХ МАКРОЧАСТИЦ	
<u>Сайфутдинов А.И.</u> , Кудрявцев А.А., Сысоев С.С., Трофимов И.В.	155
АНАЛИЗ ПРИМЕСЕЙ ПО СПЕКТРАМ ПЕННИНГОВСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА	
<u>Сайфутдинов А.И.</u> , Кудрявцев А.А., Сысоев С.С., Трофимов И.В.	156
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ГАЗОВОМ АНАЛИЗАТОРЕ ХРОМАТО-ПЛЭС	
<u>Тряскин Я.В.</u> , Павлов В.А.	157
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛАБОИОНИЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ	
И.И. Файрушин	158
РАСЧЕТ СОСТАВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ И ЛЕГКОИОНИЗИРУЮЩИЕСЯ ПРИМЕСНЫЕ АТОМЫ	

Секция 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ВЕЩЕСТВОМ	159
Азарова В.В., Акишев Ю.С., Голяева А.Ю., Грушин М.Е., Краснов В.И., Петряков А.В., <u>Сухов Е.В.</u> , Трушкин Н.И. АКТИВАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТАКТА	160
<u>Амиров И.И.</u> , Изюмов М.О., Мазалецкий Л.А. САМОФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССАХ РАСПЫЛЕНИЯ И ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА	161
<u>Богатова Л.Ф.</u> , Кулевцов Г.Н. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ КОНСЕРВАЦИИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИЗ КОЖИ	162
<u>Голяева А.Ю.</u> , Товстопят А.В., Галеев В.А., Гафаров И.Г., Шарифулин Ф.С. ВЧ ИНДУКЦИОННЫЙ РАЗРЯД В ПРОЦЕССАХ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ	163
Zmievskaia G.I. STOCHASTIC MODELS OF THE PHASE TRANSITIONS FIRST KIND AT NON EQUILIBRIUM TAGE IN THE MODIFICATION OF SURFACE PROPERTIES	164
<u>Зырянов И.А.</u> , Решетников С.М. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СОСТАВА ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ	165
<u>Кашапов Р.Н.</u> , Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОМ РАЗРЯДЕ	166
Федотова Ю. В., Кулевцов Г.Н. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНСЕРВАЦИИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ШЕЛКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ННТП ОБРАБОТКИ	167
Вознесенский Э.Ф., <u>Мифтахов И.С.</u> , Нагмутдинова А.И., Трофимов А.В. ЭФФЕКТЫ ВЧИ-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СТЕКЛА	168
<u>Полищук В.П.</u> , Самойлов И.С., Амиров Р.Х., Киселев В.И. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДУГИ ПРИ НАГРЕВЕ ГРАФИТА ФИКСИРОВАННЫМ ТОКОМ	169
Софроницкий А.О., Садиков К.Г. ² , Ларионов В.М. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ДОБАВОК НА ПЛАЗМОЛИЗ ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ	170
Surov A.V., <u>Subbotin D.I.</u> , Popov V.E., Popov S.D., Litvyikova A.I., Nakonechniy Gh. V., Serba E.O., Obratsov N.V. THERMAL STEAM PLASMA DECOMPOSITION OF ORGANOCHLORINE COMPOUNDS	171
<u>Тересов А.Д.</u> , Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Крысина О.В. МОДИФИКАЦИЯ ИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ИЛИ	172

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКА

- Федотова А.В. 173
РАЗДЕЛЕНИЕ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД
ПОЛИСУЛЬФОНАМИДНЫМИ МЕМБРАНАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫМИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ
- Косенко А., Кузнецов Ю.А., Коломейченко А.В., Титов Н.В., Соловьев Р.Ю.,
Шарифуллин С.Н. 174
ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННО-
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВАХ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ ТИПА «КОН-Н₃ВО₃»
- М.В. Антонова, И.В. Красина, С.В. Илюшина 175
ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ КАК МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ
ГИДРОФИЛЬНОСТИ ТКАНЕЙ СМЕСОВОГО СОСТАВА
- Галимзянов И.И., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ф.М., Булатов Р.И.,
Иванова А. В. 176
ПУЛЬСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ
- Э.Ф. Вознесенский, Е.С. Васильев, А.К. Хайруллин 177
ПОЛУЧЕНИЕ КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
- Василькин Д.П., Шикова Т.Г., Титов В.А., Смирнов С.А., Хомякова Н.С. 178
МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ РАЗРЯДОВ
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОЗДУХЕ И АРГОНЕ
- Ибрагимов Р.Г., Вознесенский Э.Ф., Вишневская О.В. 179
ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ НА ГИГИЕНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕМБРАННЫМ ПОКРЫТИЕМ
- Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. 180
ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ СИЛИКАТНЫХ И
ТУГОПЛАВКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
- Minyazova A.N., Iyushina S.V., Antonova M.V., Krasina I.V. 181
RESEARCH OPPORTUNITIES USING PLASMA MODIFICATION FOR TECHNICAL
FABRICS
- Казиев А. В., Колодко Д. В., Зибров М. С., Степанова Т. В., Леонова К. А. 182
АНАЛИЗ ИОННЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ НЕРАСПЫЛЯЮЩЕГО
МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА
- Кирпичев Д.Е., Николаев А.А., Николаев А.В., Цветков Ю.В. 183
ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА
ВАННУ-АНОД ЛЕЙКОКСЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА
- S. Kolmakov, S. Koitov, I.Evdokimova 184
DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF CERAMIC UNITS AND
PARTS BY SELECTIVE LASER FUSION
- Леонова К.А., Тумаркин А.В., Казиев А.В., Колодко Д.В., Дробинин В.Е. 185
СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В МАГНЕТРОНЕ
С ГОРЯЧИМ КАТОДОМ

<u>Селезнёва Н. В.</u> , Гурвич Л. Г., Смоланов Н.А., Осипов А. К.	186
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ZrN-ПОКРЫТИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СТАЛИ СТЗ	
Даутов Г.Ю., Софроницкий А.О., Марков Е.О., <u>Даутов И.Г.</u>	187
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧАСТИЦЫ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРОПАН-БУТАНОВОЙ СМЕСИ	
Surov A.V., <u>Subbotin D.I.</u> , Popov V.E., Popov S.D., Litvyikova A.I., Nakonechniy Gh. V., Serba E.O., Obraztsov N.V.	188
USAGE OF AC PLASMA TORCH FOR PRODUCTION OF OXIDE POWDERS	
Вознесенский Э.Ф., Сабиров А.М., <u>Хайруллин А.К.</u>	189
УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНОГО ДУБИТЕЛЯ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ	
<u>Харьков М.М.</u> , Казиев А.В., Тумаркин А.В., Дробинин В.Е., Мещерякова Е.А., Писарев А.А.	190
МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПОТОКАМИ ИОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧИ РАЗРЯДА	
Махоткина Л.Ю., Христоролюбова В.И.	191
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ Пониженного Давления	
Коваль Т.В., <u>Чан Ми Ким Ан</u>	192
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ	
<u>Шаехов М.Ф.</u> , Кадыров Ф.Ф.	193
УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ МЕЗДРИЛЬНЫХ НОЖЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЕМКОСТНЫМ РАЗРЯДОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ	
<u>Гарифуллин А.Р.</u> , Каримуллин И.И., Карноухов А.Е., Парсанов А.С., Шаехов М.Ф.	194
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЯ, ПРОПИТАННОГО КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ	
<u>Шкергина М.В.</u> , Гурвич Л. Г., Смоланов Н. А., Осипов А.К.	195
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ИОННО – ПЛАЗМЕННЫХ КАРБОНИТРИДЦИРКОНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ 12Х18Н10Т	
Шарифуллин Ф.С., Гафаров И.Г.	196
ВЛИЯНИЕ ВЧ ПЛАЗМЫ Пониженного Давления НА ВСХОЖЕСТЬ СЕМЯН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	
<u>Yablokov M.Yu.</u> , Gilman A.B., Kuznetsov A.A.	197
PLASMA-INDUCED ELECTRET CHARGE IN POLYTETRAFLUOROETHYLENE FILMS	
Секция 5. ПЛАЗМОХИМИЯ	198
<u>Amouroux J.</u> , Cavadias S.	199
DBD PLASMA CATALYSIS PROCESS FOR CARBON RECOVERY	

<u>Гусев Г.И.,</u> Гушин А.А., Демьяновская А.В. КИНЕТИКА ДЕСТРУКЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ, СОРБИРОВАННЫХ ДИАТОМИТОМ, В ПЛАЗМЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА	200
<u>Данилаев М.П.,</u> Богослов Е.А., Польский Ю.Е., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Янилкин И.В., Тагиров Л.Р. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПЛАЗМЕ БАРЬЕРНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	201
<u>Зотович А.И.,</u> Прошина О.В., Лопаев Д.В., Зырянов С.М., Рахимова Т.В. КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПЛАЗМОХИМИИ ЕМКОСТНЫХ ВЧ- РАЗРЯДОВ В СМЕСЯХ CF ₄ /Ar И CHF ₃ /Ar MULTIFOLD STUDY OF VOLUME PLASMA CHEMISTRY IN CF ₄ /AR AND CHF ₃ /AR CCP DISCHARGES	202
<u>Константинов В.О.,</u> Шарафутдинов Р.Г., Щукин В.Г. ХОЛОДНЫЙ ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ КРЕМНИЯ	203
<u>Корнев Р.А.,</u> Сенников П.Г. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ И ИЗОТОПНЫХ МОДИФИКАЦИЙ КРЕМНИЯ, ГЕРМАНИЯ, БОРА И МОЛИБДЕНА ИЗ ИХ ЛЕТУЧИХ ГАЛОГЕНИДОВ	204
<u>Kravets L.I.,</u> Dyussembekova A.A., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. DEPOSITION OF NANOSIZED POLYMER FILMS ONTO TRACK-ETCHED MEMBRANE SURFACE OBTAINED BY PLASMA POLYMERIZATION OF HEXAMETHYLDISILAZANE	205
<u>Kravets L.I.,</u> Gilman A.B., Yablokov M.Yu., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. USING THE PLASMA CHEMICAL METHODS FOR DEPOSITION OF FLUORINATED POLYMER COATINGS ONTO TRACK-ETCHED MEMBRANE SURFACE	206
<u>Ляхович А.М.,</u> Шаков А.А. МЕЖФАЗНЫЙ СЛОЙ, ФОРМИРУЕМЫЙ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЖЕЛЕЗЕ	207
<u>Овцын А. А.,</u> Кадников Д. В., Смирнов С. А. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ПЛАЗМЕ ВОЗДУХА, РЕАГИРУЮЩЕЙ С ПОЛИКАРБОНАТОМ	208
<u>Сенников П.Г.,</u> Корнев Р.А. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛЕТУЧИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФТОРИДОВ	209
Титов В.А., <u>Смирнов С.А.,</u> Шикова Т.Г., Овцын А.А. ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ГЕТЕРОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ГЕНЕРАЦИЮ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ АРГОНА	210
<u>Тазмеев Х.К.,</u> Тимеркаев Б.А., Тазмеев Г.Х. ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ И ВЕЩЕСТВА В ГАЗОРАЗРЯДНУЮ ПЛАЗМУ ИЗ ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОЛИТНОГО КАТОДА, СОДЕРЖАЩЕГО СОЛИ ЩЕЛОЧНОГО МЕТАЛЛА	211

<u>Титов В.А.</u> , Кузьмичева Л.А., Хлюстова А.В., Никитин Д.И. МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С ЖИДКОСТЯМИ	212
<u>Filimonova E. A.</u> , Vocharov A.N., Bityurin V.A. IGNITION OF PROPANE-AIR MIXTURE WITH SPATIALLY-NONUNIFORM REACTIVITY, GENERATED BY STREAMER DISCHARGES	213
<u>Шутов Д.А.</u> , Рыбкин В.В. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ	214
<u>Marinova Plamena</u> , Benova Evgenia, Topalova Yana, Todorova Yovana, Zhekova Maya, Yotinov Ivaylo, Krсma Frantisek COLD ARGON PLASMA TORCH FOR WATER TREATMENT	215
Cartaya R. PROCESSING OF HYDROCARBONS DRIVEN BY ELECTRON BEAM AND NON- THERMAL PLASMAS	216
Khomich V. Yu., <u>Malanichev V. E.</u> , Malashin M. V., Shmelev V. M. ELECTROPHYSICAL INSTALLATION BASED ON BARRIER DISCHARGE FOR HYDROCARBON SYNTHESIS	217
<u>Сироткин Н.А.</u> , Титов В.А. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ РАСТВОРОВ ХЛОРИДОВ НАТРИЯ И КАЛЬЦИЯ	218
Khlyustova A.V., <u>Sirotkin N.A.</u> , Kraev A.S., Kochkina N.E., Titov V.A., Agafonov A.V. SYNTHESIS AND DEPOSITION OF AG NANOPARTICLES ONTO POLYPROPYLENE FILM BY ATMOSPHERIC PRESSURE GLOW DISCHARGE TREATMENT	219
Даутов Г.Ю., Даутов И.Г., Садиков К.Г., <u>Софроницкий А.О.</u> РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАЗМЕННОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	220
Секция 6. ПЛАЗМА В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ	221
<u>Schweigert I.</u> , Lin L., Keidar M. THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF PLASMA JET INTERACTION WITH SURFACE	222
<u>Babaeva N.Yu.</u> and Naidis G.V. INTERACTION OF HELIUM AND ARGON PLASMA JETS ARRAYS	223
<u>Demina T.S.</u> , Drozdova M.G., Zaytseva-Zotova D.S., Yablokov M.Yu., Gilman A.B., Markvicheva E.A., Akopova T.A., Zelenetskii A.N. EFFECT OF DC DISCHARGE PLASMA ON CHITOSAN-BASED FILMS: SURFACE PROPERTIES AND <i>IN VITRO</i> EVALUATION	224
<u>Лазукин А.В.</u> , Сердюков Ю.А., Кривов С.А., Никитин А.М. СРАВНЕНИЕ РЕАКЦИИ МОДЕЛЬНОГО БИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ ПЛАЗМЫ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА И СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	225

<u>Степанова О.М.</u> , Рыбальченко О.В., Орлова О.Г., Астафьев А.М., Кудрявцев А.А. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПОДАВЛЕНИЕ РОСТА КИШЕЧНОЙ ПАЛОЧКИ ПРИ ЕЁ ОБРАБОТКЕ СТРУЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ	226
<u>Шамсутдинов И.И.</u> , Баязитова Л.Т., Гребенщикова М.М., Миронов М.М. АНТИМИКРОБНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНДЕНСАТОВ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТАТОВ	227
<u>I. Tsonev</u> , T. Bogdanov, E. Benova MICROWAVE PLASMA FOR WOUND TREATMENT	228
<u>Султангалиева Г.И.</u> , Миронов М.М., Гребенщикова М.М. ОБРАБОТКА КСЕНОПЕРИКАРДА ХИРУРГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМОЙ	229
Наумова И.К., Субботкина И.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С ЖИДКОСТЯМИ, ДЛЯ ПРИДАНИЯ БАКТЕРИЦИДНЫХ СВОЙСТВ ВОДНЫМ РАСТВОРАМ И МЕДИЦИНСКИМ МАТЕРИАЛАМ	230
<u>Степанова О.М.</u> , Пинчук М.Э., Лазукин А.В. ² , Сподобин В.А., Кривов С.А.. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ПОТОКАХ ГЕЛИЯ, АРГОНА И АЗОТА В ПРИСУТСТВИИ АГАРИЗОВАННОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ В КАЧЕСТВЕ МИШЕНИ	231
<u>Субботкина И.Н.</u> , Наумова И.К. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ПОДГОТОВКИ СЕМЯН	232
<u>Токарев А.В.</u> , Лелевкин В.М. ЭКСПРЕСС СТЕРИЛИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКОГО ИНСТРУМЕНТА EXPRESS STERILIZATION OF MEDICAL INSTRUMENT	233
Секция 7. ПЛАЗМОДИНАМИКА	234
<u>Zakharov Yu.P.</u> , Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., Golubev A.I., Boyarintsev E.L., Vchivkov K.V., Melekhov A.V., Posukh V.G., Prokopov P.A. GENERATION OF QUASI-PERPENDICULAR COLLISIONLESS SHOCKS BY LASER-PRODUCED PLASMA TO SIMULATE THE EFFECTS OF SUPER- COMPRESSION OF THE EARTH MAGNETOSPHERE	235
Козлов А.В., Котов А.В., <u>Полищук В.П.</u> , Шурупов А.В., Шурупов М.А. МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ «ТЯЖЕЛЫХ» УДАРНИКОВ	236
Тукмакова Н.А., <u>Тукмаков Д.А.</u> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ, ВЫЗВАННЫХ САМОСОГЛАСОВАННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ	237
<u>Шайдуллин Л.Р.</u> , Кашапов Н.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА	238
Афанасьев В.В., Богослов Е.А., <u>Данилаев М.П.</u> , Польский Ю.Е. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ	239

Dremin D.V., Khomich Yu.V., <u>Rebrov I.E.</u> , Yamshchikov V.A. ELECTROHYDRODYNAMIC FLOW APPLICATION IN GAS DISCHARGE LASER CIRCULATION SYSTEM	240
Dremin D.V., Khomich Yu.V., <u>Rebrov I.E.</u> THRUST AND THRUST-TO-POWER RATIO IN ELECTROHYDRODYNAMIC PROPULSION ELECTRODE SYSTEMS	241
Dremin D.V., Khomich Yu.V., <u>Rebrov I.E.</u> COMPARISON OF DIFFERENT IONOCRAFT ELECTRODE SYSTEM MODELS	242
<u>Даутов Г.Ю.</u> , Кашапов Н.Ф., Даутов И.Г., Софроницкий А.О. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДУГОВОЙ КАМЕРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНА	243
Гавриков М.Б., <u>Таюрский А.А.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ЗАТУХАНИЯ АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ В ДИССИПАТИВНОЙ ПЛАЗМЕ	244
Loktionov E.Yu., <u>Telekh V.D.</u> О ВЛИЯНИИ СТРУКТУРЫ МИШЕНИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ	245
Loktionov E.Yu., Pasechnikov N.A., <u>Telekh V.D.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ	246
Секция 8. ПЛАЗМА В СИНТЕЗЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ	247
<u>Igor Matveev</u> , Svetlana Matveyeva, Sergei Zverev HIGH PRESSURE ICP/RF PLASMA SYSTEMS FOR NANO-MATERIALS PRODUCTION	248
<u>Данилаев М.П.</u> , Богослов Е.А., Польский Ю.Е. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ДЕНДРИТОВ В БАРЬЕРНОМ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	249
<u>Коробейщиков Н.Г.</u> , Роевко М.А., Николаев И.В. СВЕРХГЛАДКАЯ ПОЛИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УСКОРЕННОГО ИОННО-КЛАСТЕРНОГО ПУЧКА АРГОНА	250
Rybkin V.V., Shutov D.A., Ivanov A.A., <u>Smirnova K.V.</u> , Gromov M.V. SYNTHESIS OF ULTRADISPERSE CDO POWDERS IN A PLASMA-SOLUTION SYSTEM	251
Смоланов Н. А. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ЧАСТИЦ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ДУГОВОГО РАЗРЯДА	252
<u>Шавелкина М.Б.</u> , Амиров Р.Х., Канашенко С.Л. ² , Наумкин А.Н., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Янилкин И.В., Тагиров Л.Р. СИНТЕЗ N-ДОПИРОВАННЫХ ГРАФЕНОВ В ПЛАЗМОСТРУЙНОМ РЕАКТОРЕ	253
<u>A. Esmaceli</u> , Н.П. Никитин, И.В. Янилкин, И.Р. Вахитов, А.И. Гумаров, М.Н. Алиев, Р.В. Юсупов, Л.Р. Тагиров СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК Pd _{1-x} Fe _x , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ	254

<u>Владимиров В.И.</u> , Василяк Л.М., Депутатова Л.В., Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Сыроватка Р.А., Филинов В.С. УПОРЯДОЧЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ МИКРОЧАСТИЦ В ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ С КОРОНИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ	255
Попов В.Е., Дудник Ю. Д., Забоева Е.А., Изотова С. Г., <u>Кузнецов В.Е.</u> , Мартинсон К. Д., Наконечный Г. В., Образцов Н.В., Попков В. И., Серба Е. О., Субботин Д. И. ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ	256
Лелевкин В.М., <u>Богданов А.С.</u> , Токарев А.В., Виноградов В.В. ОЧИСТКА ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ ГАЗОВ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ	257
<u>Martyanov A.K.</u> , Sedov V.S., Ralchenko V.G., Khomich A.A. LAYERED COMPOSITE STRUCTURES SYNTESIS β -SiC - DIAMOND BY MICROWAVE PLASMA CVD IN H ₂ -CH ₄ -SiH ₄ GAS MIXTURES	258
<u>Mohammed W.M.</u> , Gumarov A.I., Vakhitov I.R, Yanilkin I.V., Nikitin S.I., Tagirov L.R., Yusupov R.V. ELECTRICAL PROPERTIES OF TITANIUM NITRIDE FILMS SYNTHESIZED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING	259
<u>Никитин Д.И.</u> , Титов В.А., Шукуров А.Л., Вайдулич М., Гануш Я., Веселы Й., Бидерман Х. ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	260
<u>Тимеркаев Б.А.</u> , Софроницкий А.О., Андреева А.А. СТЕЛЮЩИЙСЯ РАЗРЯД В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ	261
Снетов В.Н., Пинчук М.Э., Коликов В.А., Лекс А.Г., <u>Субботин Д.И.</u> ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ	262
<u>Тихонов В.Н.</u> , Алёшин С.Н., Иванов И.А., Тихонов А.В. МАЛОБЮДЖЕТНЫЕ СВЧ ПЛАЗМОТРОНЫ ДЛЯ НАУКИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ	263
<u>Пискарев М.С.</u> , Гильман А.Б., Кузнецов А.А., Озерин А.Н. МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА	264
<u>Саубанов Руз.Р.</u> , Карих Ф.Г., Вахитов Р.Ф., Саубанов Русл.Р., Батталова Л.Ф. ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ АТОМИЗАТОР ДЛЯ ОБЕССЕРИВАНИЯ ВЫСОКОСЕРНИСТОЙ НЕФТИ	265

Пленарные доклады

DBD DISCHARGE PROCESS: A SPECIFIC PLASMA TOOL FOR GAS TREATMENT

Amouroux J.¹, Dresvin S.²

¹Université Pierre and Marie Curie /ENSCP / France;

²State Polytechnic University of Saint Petersburg /Russia

DBD discharge is an innovative plasma process for specific chemical gas treatment. The main characteristics of the DBD plasma discharge are its possibility to work at atmospheric pressure with electrical nanopulses of streamers at high voltage of few kilovolts and high frequency of giga hertz.

To describe a little more the hydrodynamic properties of these discharge we have to take into account that the ions pulses from the high voltage electrode to the ground electrode produce a wind jet of hundred meters per second and behind each pulse a convective motion in the gas phase. For the design of a chemical engineering process we have the gas mixing and the recycling process which are the first main parameters for a global gas flow treatment.

The second aspect is connected with the specific properties of the excited species and more generally with the energy exchange between electron pulses and the gas molecules species.

If we take into account the electron energy distribution (FDE) and the capture cross section of each specie (molecules and radicals) we point out that the excited states are first of all vibrational states ,but also homo/lumo new species with odd electron and radical species and at last ,connected with the high voltage of the discharge ,strong polar molecules appear with unusual debye polarizability.

The third part of the DBD process is linked with the short time of the electron pulses (few nanosecond) in agreement with the time of the elementary chemical reactions. Usually the energy transfer from electrons to the boundary layer of a molecular orbital is close to 10^{-14} to 10^{-10} second while excited states are able to react and produce a new species in the range of 10^{-9} to 10^{-6} second . By that way the chemical reactions starting with the excited state, new molecular orbital and quenching process stabilize the non-equilibrium pathway and open a very efficient chemical process in a DBD reactor.

From this knowledge we have developed an industrial gas depollution pilot plant to eliminate the COV in a gas flow at a level of 500 ppm by an on line treatment at 60m³/mn. These polluted compounds produce by a bitumen industrial plant are treated in a triple steps DBD fluidized bed of zeolite and the DBD discharge produces a polymerization of the organic molecules and a desulfurization of the thiols which are trapped on the surface of the zeolite beads.

SURFACE-WAVE-SUSTAINED ARGON PLASMA TORCH FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

E. Benova¹, Y. Topalova², Y. Todorova², P. Marinova³, M. Atanasova⁴, T. Bogdanov⁵, I. Yotinov²,
K. Ivanov³, I. Tsonev³

¹*DLTIS, Sofia University, 27 Kosta Louchev Str., Sofia, 1111, Bulgaria*

²*Faculty of Biology, Sofia University, 8 Dragan Tsankov Blvd., Sofia, 1164, Bulgaria*

³*Faculty of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., Sofia, 1164, Bulgaria*

⁴*Faculty of Mathematics and Informatics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., Sofia, 1164, Bulgaria*

⁵*Medical University–Sofia, 15 Academician Ivan Evstratiev Geshov Blvd., Sofia, 1431, Bulgaria*

Plasma sustained by electromagnetic wave traveling along a dielectric-plasma interface can operate in broad range of discharge conditions: gas pressure from a few mTorr to several atmospheres; wave frequency from 10 MHz to above 10 GHz; plasma radius from 0.5 mm up to 12.4 cm produced till now; plasma length depends on the wave power and can reach several meters but also microplasma of a few millimetres length is in use. Surface-wave-sustained discharges (SWD) can operate in rare gases, molecular gases and gas mixtures. In most of the cases the plasma is non-thermal one – the electron temperature is much higher than the gas temperature even at atmospheric pressure.

These advantages give opportunities for applications in environmental protection, sterilization, treatment of living tissue, seeds, water, etc.

The surface-wave plasma torch operating at room temperature can be used for water treatment and activation as well as for direct treatment of seeds, products, living tissues, temperature sensitive materials, etc. In the direct plasma treatment several agents are included in the same time: UV radiation, electric field, charged and excited chemically active particles. If it is necessary plasma can operate in room temperature without heating the treated material but it is also easy to choose regime of operation with gas temperature above 1000 K using the heating as an additional treatment agent.

In this study the Argon SWD is applied for treatment of Gram positive and Gram negative bacteria in agar and in suspension. The treatment time is less than 1 min, the wave power up to 20 W and the plasma gas temperature is less than 36 degrees in order to avoid the thermal effects. At such conditions good sterilization effect is observed even at very short treatment time as 5 s. The plasma is also applied to other model biological systems.

Acknowledgments:

This work was supported by the Bulgarian Fund for Scientific Research at the Ministry of Education under Grant DH08/8 – 2016.

ION ACCELERATION THROUGH A MAGNETIC BARRIER SINGLE STAGE AND DOUBLE STAGE HALL THRUSTER

Boeuf J.P., Dubois L., Gaboriau F., Liard L.

LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse, France, jpb@laplace.univ-tlse.fr

In a Hall thruster, a plasma is formed in a channel between two concentric dielectric cylinders. The anode is placed at one end of the channel and an emitting hot cathode is located outside the channel. In a standard, single stage Hall thruster, neutral atoms are emitted on the anode side and are ionized by electrons emitted from the external cathode. A radial magnetic field, maximum in the exhaust region of the channel, is generated by coils (or magnets) and a magnetic circuit. The presence of this radial magnetic field, perpendicular to the electron current from cathode to anode, leads to a drop of electron conductivity and to the generation of a large axial electric field in the quasineutral plasma of the exhaust region. Ions (which are practically not magnetized) are extracted from the plasma by this electric field. The combination of axial electric field E and radial magnetic field B leads to a large EXB electron drift in the azimuthal direction (closed drift). Efficient operations of a Hall thruster are obtained when the injected gas flow is almost completely ionized by electrons emitted from the external cathode and accelerated by the axial electric field. The gas flow being practically fully ionized in the channel, the gas density in the exhaust region is very small. Because of the small neutral atom density in the exhaust region, electron transport through the magnetic barrier cannot be due to classical, collisional mechanisms.

In a first part of this lecture, we discuss, on the basis of particle simulations, the mechanisms of electron transport across the magnetic barrier, and the possible role of instabilities and turbulence.

In a second part of the lecture we address the question of double stage thruster. In the operation of a single stage thruster described above, the same electric field controls the electron energy (and therefore ionization), and the velocity of the extracted ions. Therefore, it is difficult to control separately the thrust and specific impulse (i.e. the velocity of the extracted ions). Telecommunications satellites will use only electric (plasma) thrusters in a very near future, and the new generation of electric thrusters must be able to operate efficiently for satellite station keeping as well as for orbit transfer. Therefore, there is a need to develop more versatile electric thrusters, able to operate in a large range of thrust and specific impulse (large thruster for orbit transfer, large specific impulse for satellite station keeping). The idea behind the concept of double stage Hall thruster is to use a plasma source (ionization stage, or first stage) upstream of the magnetic barrier, to control ionization separately from ion acceleration (acceleration stage, or second stage). In such double stage thruster, thrust would be controlled in the ionization stage by the power injected in the plasma source, while specific impulse could be adjusted in the acceleration stage, by the applied voltage. Different types of ion sources have been proposed in the literature for the ionization stage. In this lecture, we will describe and compare some of the different attempts at designing double stage Hall thrusters, discuss the concept of ion acceleration through a magnetic barrier in these thrusters, and propose directions for new designs.

PLASMA WATER VAPOR KINETICS AND PLASMA-LIQUID INTERACTIONS

Peter J. Bruggeman

*Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, 111 Church Street SE,
Minneapolis, MN 55455, USA, pbruggem@umn.edu*

Abstract

Non-equilibrium atmospheric pressure plasmas interacting with water offer a unique source of highly reactive chemistry beneficial for many applications [1]. This presentation will provide an overview of the current state-of-the-art of plasma-liquid interactions and identify key research challenges. I will focus on the plasma kinetics in the gas/vapor phase and the interfacial transfer of reactivity from the gas to the liquid water phase.

Although the water plasma kinetics of a diffuse atmospheric pressure glow discharge has been developed and partially validated [2], our current understanding of the complex kinetics in ubiquitous high electron density filamentary water containing discharges is limited. I will present results of a detailed study of a filamentary transient discharge in Ar-H₂O in which ionic reactions are important. Our current predictive modeling capabilities of the non-equilibrium water kinetics will also be summarized and additional remaining challenges will be identified.

In addition, I will discuss our recent results related to the transfer of reactive species in the context of plasma-biointeractions and nanoparticles synthesis at the plasma-liquid interface. My group has performed a large set of experiments with different plasma conditions leading to large variations in reactive species fluxes to the liquid [3,4]. This allowed us to indentify different chemical reaction pathways for plasma-biointeractions. The results clearly illustrate the importance of the plasma-liquid interface as a source of highly reactive chemistry. The important interpfacial processes will be discussed in detail.

Acknowledgments

This work is partially supported by the "Plasma Science Center on Control of Plasma Kinetics" of the United States Department of Energy, Office of Fusion Energy Science (DE-SC0001319), a Department of Energy Early Career Research Award (DE-SC0016053) and the National Science Foundation (PHY 1500135).

References

1. P.J. Bruggeman, M.J. Kushner, B.R. Locke et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016) 053001.
2. C.A.Vasko, et al, *Plasma Chem. Plasma Process* **34** (2014) 1081-1099.
3. Wende *et al.* *Biointerphases*, **10** (2015) 029548.
4. V.S.S.K. Kondeti *et al* (in preparation)

KINETIC MONTE CARLO ALGORITHMS FOR SURFACE KINETICS

Guerra V.¹ and Marinov D.²

¹Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

²imec, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium
vguerra@tecnico.ulisboa.pt

In this report we present and discuss the interest and efficiency of Kinetic Monte Carlo (KMC) algorithms to study heterogeneous atomic recombination and molecule formation [1]. KMC simulations are then used to validate deterministic calculations, where surface kinetics is formulated in terms of fractional coverages of different types of adsorption sites, described by a system of reaction-rate differential equations. The cases of NO oxidation on Pyrex and O recombination on silica forming O₂ and O₃ are discussed in detail.

Acknowledgments: VG was partially supported by FCT, Projects UID/FIS/50010/2013 and PTDC/FIS-PLA/1420/2014 (PREMiERE)

1. V. Guerra and D. Marinov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016) 045001.
2. D. Marinov, C. Teixeira, V. Guerra, **Plasma Process. Polym.** **14** (2017) 1600175.

ELEMENTARY MICROWAVE PLASMA SOURCES WITH EXTENDED OPERATING PARAMETERS (FROM LOW TO HIGH- PRESSURES) FOR LARGE AREA DEPOSITION

Lacoste A., Baele P., Ortega A.M., Bes A., Bechu S.

University Grenoble-Alpes

By an appropriate spatial distribution, a set of elementary plasma sources can be used for large area deposition over a low- and very low- pressure range. A real challenge is to obtain uniform depositions at pressures greater than the few Torr when the plasma diffusion is limited by the scale laws. Study of coupling modes and spatial distribution of the power deposition for microwave applicators operating at low pressure allows the prediction of new design of applicators devoted to work at higher pressures. Indeed, the operating range is strongly dependent on the geometrical dimensions, pressure and microwave frequency. As a result, the increase in pressure requires changes to the other two parameters. Different type of couplers (very low to medium pressure, at 2.45 GH and 915 MHz) will be described in terms of plasma performances related to the plasma impedance and coupling modes. Interest of this technology will be pointed out through some examples of applications.

DATA NEEDED FOR MODELING LOW-TEMPERATURE PLASMAS

L.C. Pitchford

LAPLACE, CNRS and University of Toulouse III
pitchford@laplace.univ-tlse.fr

The modeling of low temperature, non-equilibrium plasmas (LTPs) is centered on a description of the electron and ion components of the plasma. The transport of electrons and ions and the coupling of the charged particle transport to electromagnetic fields can be described using different levels of models ranging from macroscopic fluid models to detailed kinetic models such as particle in cell/Monte Carlo collision (PIC–MCC) simulations. Data needs depend on the level of description, but in all cases are extensive. For PIC–MCC simulations, electron/ion-neutral scattering cross sections are required input whereas the information required for fluid models includes electron/ion transport and rate coefficients. Hybrid models have been developed and these use a combination of both kinds of data. An important consideration is that the electron energy distribution function is generally non-Maxwellian and can be determined by solving the Boltzmann equation using cross section data as input.

The LXCat project was initiated in 2009 for the purpose of providing a warehouse for data related to the charged particle components of low temperature plasmas along with on-line tools to facilitate intercomparisons and evaluation. LXCat is a dynamic, open-access, website (www.lxcat.net) for collecting, displaying, and downloading **the** cross sections and transport coefficients required for modeling low temperature plasmas. This is a community-wide activity and anyone willing to contribute data or to contribute in other ways to the development of the project is welcome – at present there are over 40 members of the LXCat team. The contents and maintenance of the individual databases are the responsibility of the contributors. Also available on the LXCat site is an option for calculating electron transport and rate coefficients in pure gases or in gas mixtures when cross section data for the component species are available in the LXCat databases.

This talk will provide an overview and status report on the LXCat project. Also included in this talk will be mention of some recent efforts on the part of the Low Temperature Plasma community to extend the LXCat concept to plasma chemical kinetics models with associated reaction rates, validation by comparison of model predictions with target experiments, and distribution in open-access electronic format. Data related to plasma surface interactions are another issue which will be mentioned only briefly.

NANOPARTICLES IN THE VICINITY OF THE ARC DISCHARGE

M.N. Shneider

Princeton University, Princeton, NJ, USA 08544
m.n.shneider@gmail.com

The arc discharge between the graphite electrodes burning in the atmosphere of inert gases is one of the standard methods of nanoparticle synthesis. The arc is a very powerful light emission source, which is close to the blackbody. This radiation is scattered and partly absorbed by the nanoparticles. In the areas where a synthesis can occur theoretically, the radiation intensity of the arc is still quite high, and therefore, one should expect that the temperature of nanoparticles that absorb radiation may considerably exceed the local ambient gas temperature. A simple theoretical model of heating the nanoparticles, depending on their size and the parameters of the radiating arc and the surrounding gas is considered. Heating of nanoparticles by the radiation can affect the process of synthesis [1]. The degree of heating of the particle is determined by its geometry, which opens, apparently, additional possibilities for nonintrusive optical diagnostics.

An effect of intensive ultrasound on the suspension of soot microparticles and nanoparticles in the inert gas, resulting in the coagulation of relatively large soot particles and leading to the improvement of the efficiency of production of nanoparticles, as has been observed in experiments ((see., e.g., [2]), is discussed. The effect of the particles charge on the possibility of coagulation is analyzed [3].

The polarization forces in a weakly ionized plasma, acting on neutral atoms and molecules [4,5], are also considered. These forces may have a noticeable impact on the dynamics of nanoparticle synthesis and growth of soot particles and their thermal balance.

1. M.N.Shneider, “Carbon Nanoparticles in the Radiation Field of the Stationary Arc Discharge”, *Physics of Plasmas*. **22** (2015) 073303.
2. G.N. Churilov, “Synthesis of Fullerenes and Other Nanomaterials in Arc Discharge”, *Nanotubes and Carbon Nanostructures*. **16** (2008) 395.
3. M.N. Shneider, “Carbon Nanoparticles in the Radiation and Acoustic fields in the Vicinity of the Arc Discharge” (AIAA 2016-1693) 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, CA, 2016
4. M.N. Shneider, “Polarization Forces in the Vicinity of Nanoparticles in Weakly Ionized Plasma”, *Physics of Plasmas* **23** (2016) 094505.
5. M.N. Shneider, “Cross-Sections for Neutral Atoms and Molecules Collisions with Charged Spherical Nanoparticle”, *Physics of Plasmas* **23** (2016) 124503.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ ГАЗОВЫМИ РАЗРЯДАМИ В ПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ: ФИЗИКА, ПРИЛОЖЕНИЯ

ELECTRON BEAMS GENERATED BY GAS DISCHARGES IN SHORT GAPS UNDER STRONG OVERVOLTAGE: PHYSICS, APPLICATIONS

Акишев Ю.С., Балакирев А.А., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И.

*АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.
akishev@triniti.ru*

Аннотация. В докладе представлено современное состояние исследований в области генерации импульсных сильноточных электронных пучков средних энергий (до 25 кэВ). Показаны перспективы их применения на примере получения пучками сверхвысокой зарядки пылевых частиц, содержащих дейтерий или тритий, и создания на этой основе генератора нейтронов без сопутствующего жесткого рентгеновского излучения, который представляет большой интерес для биомедицины.

Abstract. The report presents the state-of-the-art in the field of generation of the pulsed electron beams with a high current and moderate energy (up to 25 keV). The prospects of their applications are shown by the example of an ultrahigh charging of dust particles by the e-beams. In the case of particles containing a deuterium or tritium this approach gives the chance to develop the generator of neutrons without the accompanying hard X-ray radiation - a such neutron generator is of great interest to biomedicine.

Доклад представит современное состояние исследований по генерации импульсных сильноточных электронных пучков средних энергий ($U \leq 25$ кэВ) с использованием перенапряженных разрядов при небольших давлениях плазмообразующего газа ($P < 10$ Торр) и в коротких промежутках ($d < 1$ см), поскольку увеличение параметров U , P , d приводит к резкому сокращению длительности перенапряженного разряда и формируемого им электронного пучка, что нежелательно для ряда научных и практических приложений. Будет представлена современная трехэлектродная система, обеспечивающая повышенную стабильность перенапряженного разряда.

Перспективы применения пучков средних энергий будут показаны на примере получения такими пучками сверхвысокой зарядки пылевых частиц, содержащих дейтерий или тритий, и окруженных плазмой. Реализация электронными пучками сверхвысокой зарядки дает возможность создания на этой основе генератора нейтронов без сопутствующего жесткого рентгеновского излучения, которое возникает при использовании пучков с энергиями около 100 кэВ. Генераторы нейтронов без сопутствующего жесткого рентгеновского излучения представляют большой интерес для биомедицины.

Работа выполнена при полной поддержке РФФИ (грант № 16-12-10458).

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ПЛАЗМОСТРУЙНОМ РЕАКТОРЕ: СИНТЕЗ, ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ

PRODUCTION OF CARBON NANOSTRUCTURES IN PLASMA JET REACTOR: SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, APPLICATION

Амиров Р.Х., Исакаев Э.Х., Шавелкина М.Б.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская
д. 13, стр.2, amirovravil@yahoo.com*

Исследованы процессы получения графенов и углеродных нанотрубок при использовании плазмотрона. Сделан вывод о возможности непрерывного высокопроизводительного бескаталитического синтеза углеродных наноматериалов в плазменных струях.

The synthesis of graphene and carbon nanotubes using plasma torch has been investigated. It is found the possibility of continuous high-performance carbon nanomaterials synthesis in a plasma jet without the use of catalysts.

Проведены экспериментальные исследования синтеза углеродных наноструктур в плазмоструйном реакторе на основе плазмотрона постоянного тока с расширяющимся каналом-анодом при электрической мощности плазмотрона до 40 кВт. В качестве плазмообразующего газа применялись гелий, аргон и азот при давлениях 150- 730 Торр. В качестве прекурсора углерода использовались сажа, метан, пропан-бутановая смесь, ацетилен и этанол. Полученные углеродные нанотрубки и графеновые материалы были исследованы методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопией, рентгеноструктурного анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, термогравиметрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Пористые свойства графенов изучены методами БЭТ и «Лимитированного испарения». Была обнаружена возможность прямого гидрирования графеновых материалов при их синтезе и получения графана. Метод экспресс – гравиметрии показал возможность наличия водорода в синтезированных образцах при атомарном соотношении вплоть до Н:С - 1:4. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности непрерывного высокопроизводительного бескаталитического синтеза углеродных наноматериалов в плазменных струях.

Проведены электрохимические исследования синтезированных графенов. Показана возможность применения их в качестве носителей катализаторов для электродов топливных элементов, источников тока. По технологии реакционно-связанного карбида кремния были получены и исследованы образцы карбид кремниевой керамики с добавкой синтезированных жгутов углеродных нанотрубок. Исследования показали улучшение физико- механических свойств керамики при определенном содержании нанотрубок. Установлена взаимосвязь свойств керамических материалов на основе нитрида бора с фазовым составом материала. При добавлении 0,5 масс.% полученных графеновых структур наблюдался максимум значения предела прочности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: гранты № 15-08-00165-а, 16-08-00145-а.

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАЗРЯДЫ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

MICROWAVE DISCHARGES IN LIQUID DIELECTRICS

Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л.

Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Россия, 119991, Москва,
Ленинский проспект, 29, lebedev@ips.ac.ru*

Дан обзор работ по относительно новому направлению в физике и применении низкотемпературной плазмы, а именно по микроволновым разрядам в жидких диэлектриках. Описаны основные типы экспериментальных установок (генерация плазмы с помощью штыревых и щелевых антенн, при одновременном воздействии ультразвука и микроволн), представлена имеющаяся информация о параметрах плазмы, полученная методом эмиссионной спектроскопии. Рассмотрены примеры применения разрядов в жидких диэлектриках: решение экологических задач, получение водорода, наноматериалов, алмазов.

A review presents the relatively new field of physics and the use of low-temperature plasma, namely the microwave discharge in liquid dielectrics. The basic types of experimental facilities (plasma generation by rod and slot antennas, by microwaves accompanied by ultrasound radiation) при одновременном воздействии ультразвука и микроволн) are described along with the available information on the plasma parameters obtained by emission spectroscopy. The examples of the application of discharges in liquid dielectrics are given in the solution of environmental problems, the production of hydrogen, nanomaterials, diamonds, etc.

Рассматриваемая в обзоре область физики плазмы является новой и публикации связаны, в основном, с описанием методов генерации микроволновой плазмы в различных жидкостях, феноменологическому описанию плазмы и различным ее применениям. Плазма зажигается в газовых пузырях в объеме жидкости и существует при постоянном обмене с жидкостью массой и энергией. Плазма является неоднородной, как правило, неравновесной и гетерогенной. Пузыри могут создаваться при нагреве антенны и испарении жидкости, при вводе дополнительного газа, или ультразвуковыми волнами. Изучаются разряды при давлениях от 5 кПа до атмосферного. Анализ литературы показал, что скорости плазмохимических процессов в таких разрядах значительно превышают скорости, известные в традиционных плазмохимических процессах в газовых разрядах. Это показывает перспективность использования плазмы для решения прикладных задач. В то же время эти новые плазменные объекты представляют обширное поле деятельности для исследования данных о параметрах плазмы ввиду практически полного их отсутствия в отличие от разрядов других типов в жидкостях, где данных значительно больше. Так, зачастую для анализа используются представления равновесной плазмы, применимость которых не обоснована, особенно при пониженных давлениях. Без решения задач диагностики и моделирования микроволновой плазмы в жидкостях невозможно дальнейшее эффективное развитие этой перспективной области физики плазмы.

EVOLUTION OF ACTIVE STRUCTURES IN NON-IDEAL DUSTY PLASMA

Petrov O.F.^{1,2}, Statsenko K.B.^{1,2} and Vasiliev M.M.^{1,2}

¹*Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia, 12412, Moscow, Izhorskaya, 13-2*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, Dolgoprudny*
ofpetrov@ihed.ras.ru

We study self-propulsion of a metal-coated grains, suspended in gas, under laser irradiation. The motion is caused by photophoresis: i.e., absorption of a laser at the metal-coated surface of the particle creates radiometric force which in turn drives the particle. We observed experimentally the active Brownian motion (irregular or directed) caused by radiometric force at different Coulomb coupling of charged grains.

The charged dust represent a non-neutral or quasi-neutral systems (dusty plasmas) containing micron-sized particles (dust or grains) of a substance with electrical charges up to 10^2 - $10^5 e$. As a result of strong interaction of the strongly charged dust particles they may form the ordered structures of liquid and crystal types that are different from gas-like or chaotic systems.

Most of the laboratory studies of dusty plasmas are carried out in weakly ionized gas discharge plasmas. As a result, the laboratory dusty plasma is the unique object for studying the structure, phase transitions and transport properties of the systems of interacting grains on the “kinetic level”.

We study Brownian motion of a metal coated grains, suspended in rf gas discharge, under laser irradiation. The motion is caused by photophoresis: i.e., absorption of a laser at the metal-coated surface of the particle creates radiometric force which in turn drives the particle. The grains gain sufficiently high electrical charge ($\sim 10^2$ - 10^5 of electron charge) under the flows of plasma particles or in the emission processes. The action of external forces and forces of interparticle interaction combined with dissipative mechanisms in these systems can lead to the self-organization of the system, resulting in formation of quasi-stationary crystal- or liquid-like structures. We observed experimentally the active Brownian motion (irregular or directed) caused by radiometric force at different Coulomb coupling of the charged grains.

We present the results of our studies the evolution of strongly coupled systems of charged dust particles at cryogenic temperatures (temperatures of liquid helium and nitrogen). The confinement of strongly charged (up to $10^7 e$) superconducting micron-sized particles in a static magnetic trap in liquid nitrogen or in nitrogen vapor at temperatures of 77–91 K is observed experimentally. The macroparticles with sizes up to 60 μm levitate in a nonuniform static magnetic field $B \sim 2500$ G. The formation of strongly correlated structures comprising as many as $\sim 10^3$ particles is reported.

НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ: ФИЗИКА И ПРИМЕНЕНИЕ

HIGH PRESSURE NANOSECOND SURFACE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE: PHYSICS AND APPLICATION

Попов Н.А.¹, Стариковская С.М.², Щербанев С.А.²

Popov N.A.¹, Starikovskaya S.M.², Shcherbanev S.A.²

¹*НИИ Ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Ленинские горы, Россия, NPopov@mics.msu.su*

²*CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne Universities, University of Pierre and Marie Curie-Paris 6, route de Saclay, 91128 Palaiseau, France*

В работе [1] было показано, что характерной особенностью высоковольтных наносекундных диэлектрических барьерных разрядов высокого давления является переход от стримерной формы разряда к филаментированной, которая характеризуется существенным уменьшением числа плазменных каналов и изменением их параметров. В данной работе представлены результаты исследования эмиссионных характеристик поверхностного разряда с временным и пространственным разрешением в УФ и видимой областях спектра. Разряд инициировался ВВ импульсами длительностью 20 нс, временем нарастания 2 нс и амплитудой $U = 20 - 60$ кВ при начальных давлениях $P > 3$ атм. Показано, что переход в филаментированный режим сопровождается появлением интенсивного излучения непрерывного спектра и широких атомных линий. Плотность электронов, рассчитанная по Штарковскому уширению линий атомарного водорода, составила $N_e \geq 10^{18}$ см⁻³, а измеренные времена распада плазмы в послеразрядный период превышали 20 нс. Обсуждаются возможные механизмы контракции разрядов высокого давления на наносекундных временах, а также возможные причины появления сплошного спектра и высокой плотности электронов в каналах филаментов.

Streamer-to-filament transition is a general feature of high pressure high voltage nanosecond surface dielectric barrier discharges [1]. The transition was studied experimentally using time- and space-resolved optical emission in UV and visible parts of spectra. The discharge was initiated by HV pulses 20 ns in duration and 2 ns rise time, positive or negative polarity, 20 - 60 kV in amplitude on the HV electrode. The experiments were carried out at initial pressures $P > 3$ atm and ambient initial temperature in air, $H_2 : N_2$ and $O_2 : Ar$ mixtures. It was shown that the transition to filamentary mode is accompanied by the appearance of intense continuous radiation and broad atomic lines. Electron density calculated from line broadening is characterized by high absolute values $N_e \geq 10^{18}$ cm⁻³ at $P > 5$ atm and long decay time. Possible mechanisms of the contraction of high-pressure nanosecond discharges and possible reasons of the appearance of a continuous spectrum and a high electron density in the filament channels are discussed in detail.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект No 17-52-16001), French National Research Agency, ANR (ASPEN Project), LabExPlas@Par.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.A. Stepanyan, A.Yu. Starikovskiy, N.A. Popov, S.M. Starikovskaia *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** (2014) 045003.

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ПЛАЗМА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ И ТЕХНОЛОГИИ НА ЕЕ ОСНОВЕ

Р.Г. Шарафутдинов, Э.Е. Сон

Институт теплофизики СО РАН

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 1

e-mail: molkin@itp.nsc.ru

Объединенный институт высоких температур РАН

Россия, 125412 г. Москва, ул. Ижорская, д.13/2 son.eduard@gmail.com

В работах авторов, начиная с 70-х годов разработана теория, программы расчета свойств и технологии неравновесной плазмы (стелс технологии, упрочнение материалов, покрытия, биомедицинские приложения и многие другие). Спектр приложений холодной неравновесной плазмы включает технологии обработки различных материалов и синтез новых химических веществ. В отличие от неравновесной плазмы, создаваемой с помощью различного типа разрядов электронно-пучковая плазма в сверхзвуковом потоке это контролируемый и управляемый метод, что не присуще для разрядной плазмы. Контролируемый перенос рабочих газов осуществляется в хорошо воспроизводимых сверхзвуковых струях. Для создания плазмы используется электронный пучок, вводимый в газовый поток. Электронный пучок с необходимыми параметрами создается независимым источником ионизации. Для изменения вида функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) к электронно-пучковой плазме дополнительно подводится внешнее электромагнитное поле.

Приложения метода делятся на три класса. Первый – это инициирование химических реакций в газоплазменном потоке (плазменный катализ). Второй – электронно-пучковые технологии вне вакуума. Третий - осаждение и обработка поверхностей. Новый метод в каждом из указанных классов приложений имеет свои достижения. В первом – это высочайшие скорости осаждения слоев материалов (кремний и др.) на твердых поверхностях с произвольной структурой этих слоев от аморфного до кристаллического. Во втором классе приложений это возможность напрямую получения жидкости из углеводородного сырья минуя стадию получения синтез-газа в компактных модульных установках. На базе научных разработок сформированы два проекта - опытно-промышленное производство тонкопленочных кремниевых солнечных модулей на гибких пластиковых подложках и солнечных систем на их основе и разработка модульных установок производительностью до 1000 м³/час по получению из попутного нефтяного газа или шахтного метана метанола на базе плазменного катализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sharafutdinov R.G.1, Son E.E.2, Alekseenko S.V.1, Konstantinov V.O.1, Shchukin V.G.1, Skovorodko P.A.1, Gorodetskiy S.A.1, Karsten V.M. Gas Jet Electron Beam Plasma CVD/CVR Method and Applications, 32nd ICPIG, July 26-31, 2015, Iasi, Romania

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ И ПРИМЕНЕНИЮ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В КАЗАНСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

**RESEARCH ON PHYSICS AND APPLICATION OF LOW-TEMPERATURE
PLASMA IN THE KAZAN FEDERAL UNIVERSITY**

Кашапов Н.Ф.

*Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, Россия
e-mail: kashnail@gmail.com*

Объектами исследований являются: лазерная плазма, пылевая плазма, образующаяся в процессах получения функциональных покрытий; аномальный тлеющий разряд при пониженном давлении в присутствии реакционного газа; тонкопленочные покрытия, полученные с помощью электроискровой и вибродуговой обработки; тлеющий разряд в поле акустической волны.

The objects of research are: laser plasma, dust plasma, formed in the processes of obtaining functional coatings; an anomalous glow discharge under reduced pressure in the presence of a reaction gas; thin-film coatings obtained with the help of electric spark and vibro-arc treatment; glow discharge in the acoustic wave field.

В результате исследований проводимых в КФУ был разработан ряд физических моделей напыления и получены покрытия с заданными свойствами.

1) Создана математическая модель положительного столба тлеющего разряда с учетом влияния акустических течений.

2) Разработана модель электронной эмиссии из частиц конденсированного вещества в условиях низкотемпературной плазмы и с учетом особенностей процессов плазменно-дугового нанесения покрытий. С применением модели «желе» к частицам конденсированного вещества, получены самосогласованные пространственные распределения электронной плотности во всем объеме частиц и окружающей их плазме, а также распределения концентрации ионов легкоионизирующихся примесных атомов.

3) Установлены режимы и выработана модель реактивного магнетронного распыления при пониженном давлении в присутствии реакционного газа.

4) Исследовано возникновение ударных волн при плазменно-электролитной обработке. Выявлены механизмы генерации ударных волн в переходной области из электролиза в стационарный режим горения разряда.

5) Проведены испытания покрытий на микротвердость, полученных на стали с помощью электроискровой и вибродуговой обработки. Предложена модель трибоплазмы.

6) Исследованы особенности возникновения оптического разряда и рассмотрены процессы селективного лазерного спекания и сплавления.

Секция 1

ФИЗИКА ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ ТИПА ХОЛЛОВСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УСЛОВИИ ПОВЫШЕННОЙ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ С ПОВЕРХНОСТИ Al_2O_3 , БОМБАРДИРУЕМОЙ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

STUDY OF THE HALL THRUSTER TYPE GAS DISCHARGE PLASMA FOR THE CASE OF ENHANCED SECONDARY ELECTRON EMISSION FROM Al_2O_3 SURFACE BOMBARDED BY ELECTRON BEAM

Швейгерт И.В., Александров А.Л., Фомичев В.П., Ядренкин М.А.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование плазменного слоя, формируемого у поверхности Al_2O_3 , бомбардируемой пучком электронов с изменяемой энергией. Показано, что структура слоя зависит от энергии пучка электронов. Наблюдались такие структуры, как Дебаевский слой, формирование виртуального катода у поверхности диэлектрика и исчезновение его при увеличении энергии пучка электронов. Дополнительный электрод в виде сетки расположенный у эмиттирующей пластины использовался для управления потоком вторичных электронов.

Theoretical and experimental study of plasma sheath formed near Al_2O_3 surface bombarded by electron beam was performed. It was shown that the sheath structure depends on beam energy. For low energy a Debye sheath was observed, a virtual cathode was formed with larger energy and disappeared with further energy increase. Additional mesh-electrode near the emissive plate was used to manipulate with secondary electron flux.

Формирование различных типов плазменных слоев вблизи поверхности эмиттирующего вторичные электроны диэлектрика наблюдалось, например, в эксперименте [1]. В настоящей работе проведено кинетическое моделирование приповерхностного плазменного слоя методом PIC-MCC для пластины Al_2O_3 бомбардируемой пучком электронов с катода. Физическая модель представлена в [2]. Разработана экспериментальная установка для исследования плазменного слоя около пластины Al_2O_3 при реализации вторичной электронной эмиссии с поверхности пластины пучком электронов с энергией E . Дополнительный электрод в виде сетки расположенный у эмиттирующей пластины использовался для управления потоком вторичных электронов. Показано, что при различных энергиях пучка электронов, бомбардирующих диэлектрическую пластину, возле её поверхности формируются различные типы переходного слоя. Так, при малых E , когда вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) невелика, наблюдается Дебаевский слой. При повышении энергии пучка возникает ток ВЭЭ, и в плазменном слое формируется виртуальный катод, обеспечивающий нулевой баланс токов на поверхность пластины. При дальнейшем росте E баланс токов обеспечивается с участием холодных электронов плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.J. Langendorf et al., *AIAA paper*, (2013) 2013-4128.
2. I.V. Schweigert, et al. *P S S T*. **24** (2015) 025012.

EFFECT OF SECONDARY ELECTRON EMISSION ON SUBNANOSECOND BREAKDOWN IN HIGH-VOLTAGE PULSE DISCHARGE

I.V. Schweigert¹, A.L. Alexandrov¹,

P. Gugin², M. Lavrukhin², P.A. Bokhan², Dm.E. Zakrevsky²

¹*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia*

²*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk 630090, Russia*

A subnanosecond breakdown in high-voltage pulse discharge is studied in experiment and in kinetic simulations for mid-high pressure in helium. It is shown that the characteristic time of the current growth can be controlled by the secondary electron emission. We test the influence of secondary electron yield on plasma parameters for three types of cathodes made from titanium, silicon carbide and Cu Al Mg-alloy. By changing the pulse voltage amplitude and gas pressure, the area of existence of subnanosecond breakdown is identified.

Recently serious attention is paid to the study of phenomena of subnanosecond current development in discharge in high-electric fields at mid- and high-pressures. We study the breakdown development in the high voltage discharge in the experiment and in PIC MCC simulations, for cathodes made from 3 different materials with enhanced secondary electron emission yield. Our purpose is to find a way to decrease the breakdown time by testing different cathode materials and changing the gas pressure and voltage. The breakdown in the high-voltage pulse discharge in helium is studied in the experimental cell with two round cathodes placed 6 mm apart. A mesh-anode is placed between the cathodes. The pulse voltage is applied to both cathodes and two opposite electron beams are generated due to cathode emission. The voltage amplitude U ranges from 4 kV to 12 kV and $P=10-35$ Torr. The cathodes are symmetrically connected to the external low-inductance circuit and the mesh-anode is grounded. The pulse shape is registered with the low-inductive resistive divider using oscilloscope Tektronix DPO 70804C with a bandwidth of 8 GHz. The experimental details were described in [1]. In the experiments, the cathodes made from titanium (Ti), silicon carbide (SiC), and CuAlMg alloy were tested. All these materials have large SEE coefficient γ_e , but the dependence of γ_e from the electron energy is different. In our simulations, we solve Boltzmann equations for electrons, ions and fast neutral atoms. Poisson equation describes the electric potential. The details of the model can be found in [2,3]. The record observed switching time for SiC and CuAlMg-alloy is $\tau_s < 0.4$ ns and for Ti is 4-5 times larger. In conclusion, there is a specific range of discharge parameters, 5-10 kV and $P=15-35$ Torr, within that the record switching time $\tau_s < 1$ ns can be achieved.

REFERENCES

- [1] P.A. Bokhan et al 2016 *In: Generation of runaway electron beams and x-rays in high pressure gases*, Nova Science Publishers Inc, NY (2016) p. 221.
- [2] I.V. Schweigert et al. *Phys.Rev.E* **90** (2014) 051101(R);
- [3] I.V. Schweigert et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** (2015) 044005.

PERIODICAL PLASMA STRUCTURES CONTROLLED BY EXTERNAL MAGNETIC FIELD

I. Schweigert^{1,2}, M. Keidar¹

¹*George Washington University, Washington D.C. 20052, USA*

²*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia*

The characteristics of 2D periodical structures in propulsion type magnetized plasma are studied in kinetic PIC MCC simulations. With increasing an angle of magnetic field the ridges (maxima) of electron and ion densities form in the plasma volume in cylindrical chamber. These ridges are shifted relative each other that results in the formation of 2D double-layers structure. Depending on Larmor radius and Debye length up to nineteen potential steps appear across the oblique magnetic field.

Recently some methods to control the Hall effect thruster characteristics with applying the oblique magnetic field B with respect to the channel walls is widely discussed (see [1]). Nevertheless with increasing the magnetic field angle α_B , discharge plasma properties can essentially change. For example, a several magnetized double-layers were observed in a laboratory experiment for this type of plasma [2]. In this work [3], in kinetic simulations we consider the DC discharge plasma in the external oblique magnetic field at $P=0.0001$ Torr. Our purpose is to study the plasma structure modification with changing the electron temperature, magnetic field strength and obliqueness. In simulations, the plasma is embedded in a cylindrical chamber with $r=4$ cm and $H=10$ cm. All walls are grounded and the cathode is biased with -90 V, $B=25-100$ G and $\alpha_B = 0-77^\circ$. To describe the plasma in electro-magnetic field we solve Boltzmann equations for the distribution functions for electrons and ions with particle-in cell Monte Carlo collision method and Poisson equation for the electrical potential. The periodical structure with ridges of ion and electron densities was found for larger α_B . The electron and ion ridges are shifted with respect to each other and double-layer structure appears across B -field and along the potential rise. The double-layers structure forms due to a distortion of local quasineutrality in the presence of oblique magnetic field. The ion current to the wall considerably increases and has a peaked profile in the case of large α_B . This effect can lead to an additional local erosion of wall material. The current flow channels are associated with ridges of electron and ion densities and aligned with B -vector. The characteristics of plasma structure such as the number of peaks, gap between them, their broadening depend on the Larmor radius, Debye length and the size of quasineutral plasma.

REFERENCES

- [1] J. Miedzic et al. *Phys. Plasmas* **22** (2015) 043511
- [2] T. Intrator, J. Menard, and N. Hershkowitz. *Physics of Fluids B* **5** (1993) 806.
- [3] I. Schweigert, M. Keidar, *Plasma Sources Sci and Technol*. 2017 accepted

CAPILLARY NANOSECOND DISCHARGE IN MOLECULAR GASES: HIGH ELECTRIC FIELDS AT HIGH SPECIFIC DEPOSITED ENERGY

Lepikhin N.¹, Pokrovskiy G.¹, Popov N.², Starikovskaia S.¹

¹Laboratory of Plasma Physics (CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne Universities, University of Pierre and Marie Curie-Paris 6, University Paris-Sud), Ecole Polytechnique, route de Saclay, 91128 Palaiseau, France

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Leninsky gory, Russia

Strongly non-equilibrium plasma at high electric fields and high specific deposited energy was studied in capillary nanosecond discharge in 20 Torr N₂:O₂ mixtures. The discharge developed in the quartz capillary with inner diameter 1.5 mm and length 80 mm. The capillary was inserted into the break in the coaxial cable at the distance 25 m from the high-voltage generator (FID FPG 10-MKS20 HV, FID GmbH). Pulses of 20 kV amplitude on the electrode, 30 ns FWHM and 4 ns rise time were repeated with a frequency of a few Hz to accumulate the signal; gas flow rate provided change of the gas in the capillary between two pulses. Calibrated back current shunts were used to measure current, voltage in the cable and energy stored in plasma. The electric field was measured by capacitive gauge and from optical emission spectroscopy. For emission spectroscopy measurements, the Acton spectrometer (SP-2500i, 1200 I/mm grating, Princeton Instrument) was combined with Pi-Max4 (Princeton Instruments) ICCD camera or with UV and IR photomultipliers (Hamamatsu). Measurements of oxygen atoms in the discharge and afterglow ($t < 100$ ns) were carried out by actinometry, using 5% of Ar addition as actinometer. Two-photon absorption laser induced fluorescence (TALIF) was used to measure O-atoms density in the late afterglow ($t < 1000$ ns).

Measured specific deposited energy in the discharge was as high as 0.5-1.0 eV/molecule, the electric field on the stage of maximum energy deposition was in the range of 200-400 Td. It was shown that kinetics in the discharge requires taking into account reactions of interaction between charged/dissociated and excited species. High quenching of electronically excited species by electrons was observed in early afterglow [1]. Dissociation degree of oxygen in the discharge reached tens of percent, increasing to 100% at microseconds due to reactions between O₂ and electronically excited nitrogen. Heating of the gas up to a few thousand K was observed at the time scale less than VT-relaxation due to energy release in collisions with electronically excited species.

Acknowledgments: The work was partially supported by the French National Research Agency, ANR ASPEN Project (ANR-16-CE30-0004-01), LabEx Plas@Par and Linked International Laboratory LIA KaPPA (France-Russia), RFBR project 17-52-16001. The work of Georgy Pokrovskiy is supported by PhD Saclay Doctoral Program.

REFERENCES

1. N.D. Lepikhin, A.V. Klochko, N.A. Popov, S.M. Starikovskaia, *Plasma Sources Sci. Tech.* **25** (2016) 045003 (11pp).

РАЗРЯД МЕЖДУ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫМ ЖИДКИМ КАТОДОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ THE DISCHARGE BETWEEN THE JET-DRIP LIQUID CATHODE AND METAL ANODE

Ал.Ф.Гайсин¹, Э.Е.Сон², Н.Ф.Кашапов³

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева –
КАИ, Россия

²Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

E-mail: almaz87@mail.ru

Исследован газовый разряд между струйно-капельным жидким катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении. Представлены результаты по составу плазмы, электрофизические характеристики, концентрации электронов, описаны формы разряда.

Investigated gas discharge between the jet-drip liquid cathode and a metal anode at atmospheric pressure. The results of the plasma composition, electrical characteristics, electron concentration, the forms of discharge.

Установлено зажигание газового разряда в межэлектродном промежутке при напряжении $U = 250 - 1000\text{В}$, ток $I = 0.7 - 2.5\text{А}$, длина струи $l_c = 30\text{мм}$, давление внешней среды $p = 10^5\text{Па}$, с частотой пульсаций тока $\nu = 30 - 100\text{Гц}$, в качестве анода была взята медная пластина диаметром $d_a = 1\text{мм}$. Разряд генерируется в двух областях системы: 1 – на границе между струйно-капельным жидким катодом и медным анодом, 2 – в области утончения струи, между формирующимися каплями электролита. Для оценки состава плазмы и концентрации электронов газового разряда применен метод оптической спектроскопии. Аппаратное уширение в спектрах проверено по атому калия К I - 766.2 нм. В обоих спектрах минимальная ширина одиночных линий составляет $\Delta\lambda_g = 1\text{ нм}$, она и принята за аппаратную ширину. Из анализа спектра излучения газового разряда видно, что в наблюдаемом участке плазмы присутствуют элементы различного наименования: кислород O I, водород H I, натрий Na I, калий K I, цинка Zn I, ионы кальция Ca II, ионы цинка Zn II, а так же молекулы азота N₂⁺ (С-В) и гидроксил OH (А-Х). Для определения концентрации электронов в плазме ВЧЕ разряда проведен анализ контуров водородных линий в серии Бальмера (H_α, H_β, H_γ). Для расчёта концентрации электронов n_e определена ширина Фойгтовского контура водородных линий. Полуширина линий на полувысоте для H_α равна $\Delta\lambda_f = 1.4\text{ нм}$, для H_β равна $\Delta\lambda_f = 1\text{ нм}$, а для H_γ равна $\Delta\lambda_f = 1.2\text{ нм}$. Расчет n_e по линии H_β не производилась, так как ее полуширина оказалось равной минимальной ширине одиночных линий $\Delta\lambda_g = 1\text{ нм}$. С учётом аппаратного уширения в предположении Фойгтовского контура регистрируемой линии Лоренцевская составляющая линии H_α равна $\Delta\lambda_L = 0.661\text{ нм}$, а линии H_γ равна $\Delta\lambda_L = 0.34\text{ нм}$. Величины $\Delta\lambda_L$ обусловленные линейным Штарк-эффектом соответствуют концентрациям электронов порядка $n_e \approx 10^{15} - 10^{16}\text{см}^{-3}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (3-е изд., перераб. и доп.). Долгопрудный, 2009. 734 с.
2. Файрушин И.И., Даутов И.Г., Кашапов Н.Ф., Шамсутдинов А.Р. *Письма в ЖТФ*, Т. 42. №23. 2016. С.42-50
3. Dautov G., Fayrushin I., Kashapov N., Dautov I. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. T. 567. № 1. С. 012008.

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ДИАГНОСТИКА КЛАСТИРОВАННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ АЗОТА

THE ELECTRON BEAM DIAGNOSTIC OF CLUSTERED SUPERSONIC NITROGEN JETS

Автаева С.В., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яковлева Т.С.

НГУ, Россия, , 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, s_avtaeva@srd.nsu.ru

Методом электронно-пучковой спектроскопии изучены аксиальные и радиальные распределения температуры и плотности газа в кластированных сверхзвуковых струях азота в диапазоне давлений торможения 1-6 Бар. Показано, что распределения температуры и плотности газа в исследованных кластированных струях азота сильно отличаются от изэнтропических, что связано с формированием кластеров в струе и проникновением в нее окружающего газа. Изучено влияние давления на скорость охлаждения газа в расширяющейся струе.

Axial and radial distributions of the gas temperature and density in clustered supersonic nitrogen jets were studied using the electron beam fluorescence technique at stagnation pressures of 1-6 Bar. It is shown, the gas temperature and density distributions in the studied clustered nitrogen jets are unlike to the isentropic distributions because of cluster formation in the jet and ambient gas penetration in the jet. A pressure effect on gas cooling rate in the expanding jets is studied.

Методом электронно-пучковой спектроскопии изучены аксиальные и радиальные распределения температуры и плотности газа в кластированных сверхзвуковых струях азота в диапазоне давлений торможения 1-6 Бар. По распределению интенсивностей вращательных линий в (0-1) полосе 1-й ОС азота восстановлена вращательная температура T_{rot} основного состояния N_2 в соответствии с методом, предложенным Мюнцем [1]; по интегральной интенсивности этой полосы изучено распределение плотности газа в струе. Вследствие быстрой вращательной релаксации T_{rot} равна температуре газа в струе T_g . Форма и размер струи фотографировались.

Струи получали на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2. Использовали два сверхзвуковых сопла: 1) с входным диаметром $D_{in}=0.17$ мм, 2) с $D_{in}=0.215$ мм. Давление торможения P_0 составляло 1-6 бар, давление в камере расширения $P_h=2.6-27$ мТорр. При этих условиях в струе формируются кластеры азота, средний размер которых зависит от параметров сопла и отношения P_0/P_h . Ток электронного пучка составлял 20-40 мА, энергия электронов 10 кэВ, диаметр ~ 1 мм. Излучение регистрировалось с помощью ДФС-452, оборудованного ПЗС линейками.

Показано, что на расстоянии 10-20 мм T_g в струе падает до ~ 20 К, затем начинает возрастать, достигая величины ~ 100 К на расстоянии диска Маха от сопла. Распределение температуры и плотности газа в кластированных струях азота отличаются от изэнтропических, что связано с формированием кластеров и проникновением в струю окружающего газа. Изучено влияние давления на аксиальные распределения температуры и плотности газа в струе.

ЛИТЕРАТУРА

Е.Р. Muntz. *Phys. of Fluids*. **5** (1962) 80.

О ВЛИЯНИИ ПРИЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ХЛОРЕ И ЕГО СМЕСЯХ С КСЕНОНОМ ON ELECTRON ATTACHMENT EFFECT ON CHARACTERISTICS OF THE DBD IN CHLORINE AND ITS MIXTURE WITH XENON

Автаева С.В.

НГУ, Россия, , 630090, Новосибирск, ул. Пурогова, д. 2, s_avtaeva@srd.nsu.ru

Изучено влияние прилипания электронов на характеристики БР в хлоре и его смесях с ксеноном. Характеристики БР в чистом хлоре и в смесях ксенон-хлор с содержанием хлора 0.1-5% моделировались в рамках гидродинамической модели. Показано, что прилипание электронов ограничивает величину тока БР, способствует формированию 'вторичных' импульсов тока, возникновению двойного слоя вблизи поверхности диэлектриков, образованию эксимерных молекул XeCl^* и приводит к перераспределению мощности вкладываемой в разряд: больше мощности вкладывается в ионы и меньше в электроны.

The electron attachment effect on DBD characteristics in chlorine and its mixtures with xenon has been studied. Characteristics of the DBDs in pure chlorine and in xenon-chlorine mixtures with a chlorine content of 0.1-5% were modeled using the hydrodynamic model. It is shown that the electron attachment limits a magnitude of the DBD current, contributes to formation of the "secondary" current pulses, appearance of a double layer near the dielectrics surface, formation of the XeCl^* excimer molecules, and leads to a redistribution of the power deposited into the discharge: more power is deposited into ions and less one is deposited into electrons.

Характеристики БР в чистом хлоре и в смесях ксенон-хлор (0.1-5% Cl_2) моделировались в рамках гидродинамической модели. Геометрия разряда – плоскопараллельные электроды покрытые одинаковыми слоями диэлектрика (1-2 мм), расстояние между которыми 4-8 мм. Напряжение синусоидальное с амплитудой 4.25-8 кВ и частотой 25-100 кГц, давление газа 15-300 Тор.

Показано, что прилипание электронов, ограничивая величину тока, в случае малых перенапряжений приводит к не полной нейтрализации поверхностного заряда на диэлектриках во время прохождения 'первичного' импульса тока, что способствует формированию 'вторичного' импульса тока в в смесях Хе- Cl_2 [1] и появлению серии последовательных импульсов тока в чистом хлоре. При движении к диэлектрику волны ионизации прилипание электронов приводит к появлению двойного слоя вблизи диэлектриков, что связано с резким изменением электрического поля, скоростей ионизации и прилипания, и разделяющим влиянием поля на заряженные частицы.

БР в смесях Хе- Cl_2 (0.5-5% Cl_2) эффективно излучает в полосе XeCl^* ($\text{B} \rightarrow \text{X}$), 308 нм. Наибольший вклад в формирование XeCl^* молекул во время импульсов тока обеспечивает гарпунная реакция $\text{Xe}^* + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Cl}$, во время послесвечения – ион-ионная рекомбинация $\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Xe}$ [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. S.V. Avtaeva. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** (2014) 229.
2. S. Avtaeva. *Eur. Phys. J. D.* **68** (2014) 90.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОМАСЛЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИСУЛЬФОНАМИДНЫХ МЕМБРАН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УНИПОЛЯРНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

INTENSIFICATION OF SEPARATION OF OIL-WATER EMULSIONS USING POLYSULFONAMIDE MEMBRANES MODIFIED BY UNIPOLAR CORONA DISCHARGE

М.Ю. Алексеева, И.Г. Шайхиев, В.О. Дряхлов, М.Ф. Галиханов, И.Р. Низамеев

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015, Республика Татарстан, Казань, ул.К.Маркса, 68*

E-mail: musoke@mail.ru

Исследовано разделение водомасляной эмульсии полисульфонамидными мембранами, модифицированными униполярным коронным разрядом. Инструментальными методами анализа ИК-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, сидячей капли и атомно-силовой микроскопии определены поверхностные и структурные характеристики исходной и модифицированной мембраны.

Studied the separation of oil-water emulsion using polysulfonamide membranes, modified by unipolar corona discharge. Instrumental methods of analysis infrared spectroscopy, x-ray diffraction, hip drops and atomic force microscopy showed the surface and structural characteristics of initial and modified membranes.

Проведены исследования разделения водомасляной эмульсии плоскими полисульфонамидными мембранами, обработанными в поле униполярного коронного разряда при напряжении $U = 5-15$ кВ и времени обработки 0,5-1,5 мин.

На основании экспериментальных данных показана тенденция к увеличению эффективности разделения эмульсии с увеличением времени обработки мембран. Наименьшее значение ХПК = 1040 мг $O_2/дм^3$ достигнуто при обработке $\tau = 5$ мин и $U = 5$ кВ. Таким образом, эффективность разделения эмульсии составила 95,4 %.

Методами ИК-спектроскопии, сидячей капли, атомно-силовой микроскопии и дифрактометрии определены поверхностные и структурные характеристики исходной и наиболее эффективной электретированной при $U = 5$ кВ и $\tau = 5$ мин ПСА мембраны. Выявлена частичная деструкция поверхности полимера и снижение степени кристалличности, а также значительное увеличение шероховатости и уменьшение краевого угла смачивания. Таким образом, увеличение смачиваемости коронообработанных ПСА мембран способствует увеличению эффективности разделения эмульсий.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Goldman. *Pure and Applied Chemistry*. **57** 9 (1985) 1353-1362.
2. A.R. Blythe. *Surface modification of polyethylene by electrical discharge treatment and the mechanism of autoadhesion Polymer*. **19** 11 (1978) 1273–1278.

ПОТОК И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ НА ЭЛЕКТРОДЕ В ДВУХЧАСТОТНОМ ВЧЕ РАЗРЯДЕ

ION FLUX AND ENERGY DISTRIBUTION AT AN ELECTRODE IN AN RF DUAL-FREQUENCY CCP DISCHARGE

Богданова М. А.^{1,2,*}, Лопаев Д.В.¹, Зырянов С.М.^{1,2}, Рахимова Т.В.¹, Волошин Д.Г.¹

¹НИИЯФ МГУ, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

²МГУ, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр.

**bogdanova.masha91@gmail.com*

The possibility of the ion flux and energy virtual diagnostics at an rf-biased electrode in an asymmetric rf dual-frequency CCP discharge in Ar, N₂ and Xe plasmas is considered. Ion energy distributions (IEDs) were calculated according to the semi-analytical model of the ion motion through the sheath including a set of externally measurable discharge parameters. Direct IED measurements were carried out via the Retarded Field Energy Analyzer (RFEA). The ion flux was measured by the pulsed self-bias method.

Поток и энергия ионов являются ключевыми параметрами ион-стимулированных плазмохимических процессов, широко используемых в современных технологиях изготовления наноструктур, модифицирования поверхностей и пр. Однако, измерение этих параметров во время технологического процесса зачастую невозможно. Данная работа посвящена идее создания виртуального датчика потока и энергии ионов [1], представляющего собой быстрый расчёт энергетического спектра ионов согласно полуаналитической модели движения ионов в приэлектродном слое, включающей в себя ряд внешне измеряемых параметров разряда. Проверка данной идеи была осуществлена в асимметричном двухчастотном ВЧЕ разряде низкого давления (20, 100 мТорр) в Ar, N₂ и Хе плазмах при нескольких значениях частоты и амплитуды приложенного к нижнему электроду вч смещения ($F_{\text{bias}} = 2 \div 12$ МГц, $V_{\text{bias}} = 0 \div 120$ В). Экспериментально энергетические спектры ионов были получены анализатором энергий частиц RFEA. Для анализа полученных результатов были также произведены расчёты согласно модели Монте-Карло методом частиц в ячейке. Для калибровки измеренных энергетических спектров по абсолютной шкале, в данной работе были произведены измерения потока ионов методом переменного автосмещения. Также, данная работа содержит исследование зависимости потока ионов на электрод с ростом давления (20 ÷ 200 мТорр) при нескольких значениях плотности плазмы. В простейшем бесстолкновительном случае, поток ионов на электрод связан с плотностью плазмы следующим соотношением:

$$F_i = kn_0v_B, \quad (1)$$

где $k = n_s/n_0$ – падение плотности плазмы на границе слой-предслой относительно плотности плазмы в центре разряда, v_B – Бомовская скорость. Из (1) была получена зависимость k от давления. Экспериментально полученные k были сопоставлены расчётам согласно двумерной модели собирания ионного тока плоским зондом. Работа выполнена при поддержке российского научного фонда (РНФ) грант № 14-12-01012.

Литература

[1] М. А. Bogdanova, D. V. Lopaev, S. M. Zyryanov and A. T. Rakhimov, Phys. Plasmas **23** (2016) 073510.

ИЗ ИСТОРИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 0.1 – 3.0 ТОРР

FROM THE HISTORY OF THE HIGH-FREQUENCY CAPACITIVE DISCHARGE AT PRESSURES OF 0.1-3.0 TORR

Даутов Г.Ю.¹, Дресвин С.В.², Гафаров И.Г.³

¹КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Россия, г. Казань, ул. к. Маркса, 10.

²СПбПУ, Петра Великого, Россия, г. Санкт Петербург, Политехническая ул., 29.

³НВФ «РЕНАРИСОРБ», г. Москва, Россия, Ленинский проспект, д.88/3.

e-mail:renari@mai.ru

Представлена информация о первых исследованиях высокочастотного емкостного разряда при низких давлениях на частотах 1.0 – 20.0 МГц, проведенных в Казанском авиационном институте в 80-х годах прошлого века.

Provides information about the first studies of the high-frequency capacitive discharge at low pressure, at frequencies of 1.0-20.0 MHz in Kazan Aviation Institute in 80-ies of the last century.

В 1982 году в Казанском Доме Ученых на научно техническом семинаре «Низкотемпературная плазмы для предприятий Республики Татарстан» были представлены первые результаты исследований параметров ВЧЕ плазмы при давлениях 0.1 – 3.0 Торр. В Казанском авиационном институте на кафедре “Общая физика” к этому времени были созданы две установки. Первая, исследовательская установка, позволяла получать разряды индукционного и емкостного типа в диапазоне частот 1.0 – 20.0 МГц при мощности от 50 до 1000 Вт. Это позволило провести сравнительные исследования ВЧ разрядов на частотах 1.76, 2.64, 5.28, 13,36 МГц, разрешенных для промышленных плазменных установок. Проведены опыты по сравнению Е- и Н- форм ВЧ разрядов, что всегда интересовало исследователей с начала изучения этих разрядов. Апробированы различные схемы емкостного разряда: с плоскими электродами; с внешними неохлаждаемыми и внутренними охлаждаемыми электродами; коаксиальная схема расположения электродов. Это позволило разработать различные конструкции ввода плазмы в реакторы.

Другая установка уже представляла опытно-промышленный вариант с колебательной мощностью ВЧ генератора до 10 кВт на частоте 13,35 МГц и мощностью в ВЧЕ плазматрон до 3 кВт. СВЧ способом исследованы концентрация электронов, эффективная частота столкновения электронов с тяжелыми частицами. Проведены опыты по изучению напряжения пробоя разряда для различных газов, давлений и геометрии разрядных камер плазмотронов, получены энергетические характеристики разряда и плазмотронов.

В 1982-85 годах по результатам исследований этого разряда были получены первые авторские свидетельства на изобретения по способам обработки внутренней поверхности тепловых труб, модификации поверхности металлов, переработки битуминозной породы с целью получения синтез - газа и выделения из нее редких металлов; опубликованы первые статьи. Сегодня, спустя 35 лет, ВЧ-емкостной разряд в этом диапазоне давлений, широко используется в различных технологических процессах.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СТАЦИОНАРНОМ ОТКРЫТОМ РАЗРЯДЕ

ON EFFICIENCY DURING THE GENERATION OF RUNAWAY ELECTRONS BEAMS IN STATIONARY OPEN DISCHARGE

Войтешонок В.С., Головин А.И., Туркин А.В., Шлойдо А.И.
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Россия, 125438, г. Москва, ул. Онежская, д. 8,
kerc@elnet.msk.ru

Проведены измерения эффективности формирования пучков убегающих электронов в гелии, воздухе и парах воды при различных давлениях для различных материалов катода. В гелии и водяном паре продемонстрировано получение пучка убегающих электронов с энергетической эффективностью около 80%.

Measurements of energetic efficiency were accomplished in generation of runaway electrons beams for helium, air and water vapor with various cathode materials. The efficiency near 80% was demonstrated for runaway electrons beam generated in helium and water vapor.

Генераторы электронных пучков (ГЭП), работающие непосредственно в газовой среде, являются перспективным средством решения многих технологических задач [1]. В [2] предложено несколько вариантов конструкции таких ГЭП, а в работе [3] и ряде других проведены исследования функционирования ГЭП.

Важнейшей характеристикой технологических ГЭП является энергетическая эффективность (КПД). Для его оценки осуществлялись измерения температуры корпуса ГЭП в процессе длительной работы и при последующем охлаждении. Некоторые результаты приведены в таблице.

Результаты экспериментов соответствуют теоретической модели [0].

Результаты экспериментов по определению энергетической эффективности

Материал катода	U , кВ	Рабочий газ	P , Па	КПД, %
LaB ₆	4,4	гелий	1513	71
Mo	4,4	гелий	1507	48
Cu	8,0	гелий	2060	83
Cu	7,0	гелий	1504	78
сталь	6,5	гелий	964	76
сталь	4	воздух	307	59
сталь	6	вода	310	79

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Головин, А.И. Шлойдо. *Успехи прикладной физики*. 4 5 (2016)
 2. В.А. Бобров, В.С. Войтешонок и др. // Патент РФ 2535622 РФ.
 3. В.А. Бобров, В.С. Войтешонок и др. *ЖТФ* 83 8 (2013) 121-126
- А.И. Головин *Прикладная физика*. 1 (2016) 77-81 439-448

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

STRUCTURE PECULIARITIES OF SURFACE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE FORMED BY IMPULSE AND SINUSOIDAL VOLTAGE

Соколова М.В.¹, Воеводин В.В.¹, Малашин М.В.², Ребров И.Е.², Киселев Н.А.³.

¹НИУ «МЭИ» Россия, г. Москва, 111250, Красноказарменная ул., д.14.

²ИЭЭ РАН, Россия г. Санкт-Петербург, 191186, Дворцовая наб., 18.

³ООО «Сириус», Россия, г. Москва, 127015, ул. Новодмитровская, д.2, к. 2.

E-mail: mvsokolova@mail.ru

Аннотация: В работе получено, что структура поверхностного разряда и его характеристики определяются формой кривой напряжения, амплитудой, длительностью и полярностью импульсов, крутизной фронта и моментом возникновения разряда.

Abstract: It is shown in the paper that the structure of the surface discharge and its characteristics depend on the form of the voltage curve, its amplitude, duration and polarity, the impulse front steepness and the moment of the discharge ignition.

Имеющиеся в литературе данные по влиянию питающего напряжения на разряд относятся в большинстве к случаю барьерного разряда в промежутке [1]. В приводимой работе исследован поверхностный разряд в воздухе при нормальных условиях по поверхности барьера (пластины из керамики 22ХС). Картины разряда, полученные с помощью скоростной камеры Phantom v2511 и цифровой фотокамеры Lumix (Panasonic DMC-FS3), сопоставлены с соответствующими осциллограммами тока микроразрядов. Амплитуда $U_{m,imp}$ импульсного напряжения, создаваемого генератором, описанным в [2], составляла 7-8 кВ, длительность импульса 0,5-45 мкс и длительность фронта импульса 150 нс. Для синусоидального напряжения той же частоты $2U_{m, sin} = U_{m, imp}$. В отличие от синусоидального питания (0,18 V/ns), разряд на фронте импульсов обеих полярностей возникает при высокой скорости нарастания напряжения (50 V/ns для $U_{m, imp} = 8$ кВ) и имеет большую интенсивность. На спаде импульсов развитие разряда идет при снижении приложенного потенциала и основным фактором, определяющим возникновение и развитие разряда, становится поле заряда, осевшего на поверхность барьера. Разряд на спаде импульса имеет структуру, подобную структуре разряда на отрицательном полупериоде синусоидального напряжения. Помимо характера воздействующего напряжения, сильное влияние на структуру разряда и его интенсивность оказывают параметры импульсов (их полярность, крутизна фронта, амплитуда импульса и его длительность) и поле зарядов, осевших на поверхность барьера.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-08-04384.

ЛИТЕРАТУРА:

1. T. Noder et al. *Physics of Plasmas*. **19** (2012) 070701.
2. М. В. Малашин и др. *Приборы и техника эксперимента*. **№ 2** (2016) 71-75.

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗРЯДА В АРГОНЕ

EFFECT OF ACOUSTIC OSCILLATIONS ON THE PARAMETERS OF A DISCHARGE IN ARGON

Фадеев С.А.¹, Сайфутдинов А.И.^{1,2}, Кашапов Н.Ф.¹

¹Казанский федеральный университет 420008, Казань, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе представлены экспериментальные и численные исследования разрядов постоянного тока в поле интенсивных акустических колебаний. Разряд зажигался в длинной ($L=0,25$ м), узкой ($R=0,01$ м) трубке с плоскими медными электродами на концах при давлениях от 20 до 60 Торр. С помощью электродинамического излучателя, с концентрирующим, акустическую энергию, конфузоров в газоразрядной камере возбуждались резонансные акустические колебания первой продольной моды. Показано, что наличие интенсивного акустического поля ведет к увеличению сопротивления газоразрядного промежутка, растет напряжение и уменьшается ток при тех же параметрах электрической цепи в отсутствие акустических колебаний. При фиксированном токе, напряжение растет пропорционально уровню звукового давления.

Experimental and numerical studies of DC discharges in the field of intense acoustic oscillations are presented. The discharge chamber had a long ($L = 0.25$ m) and narrow ($R = 0.01$ m) tube with flat copper electrodes at the ends. The pressure range was from 20 to 60 torr. The acoustic energy emitted by the electrodynamic was concentrated by the confuser. Resonant acoustic vibrations of the first longitudinal mode were excited in the discharge chamber. It is shown that the presence of an intense acoustic field leads to an increase in the resistance of the gas-discharge gap. The voltage increases and the current decreases with the same parameters of the electrical circuit in the absence of acoustic oscillations. With a fixed current, the voltage rises in proportion to the sound pressure level.

Резонансные колебания в газоразрядной плазме сопровождаются различными нелинейными явлениями [1]. В частности, касательно влияния колебаний на плазму разрядов постоянного тока, особо стоит отметить акустические течения [2, 3], возникающие в стоячей звуковой волне в виде двух осесимметричных тороидальных вихрей, вращающихся в противоположных направлениях относительно друг друга. В представленной работе с помощью численных экспериментов, было показано, что при наличии интенсивных акустических течений, происходит уменьшение разрядного тока и увеличение напряжения на разрядном промежутке [3]. По результатам численных и натуральных экспериментов показано, что уменьшение разрядного тока обусловлено выносом заряженных частиц на стенки трубки и их гибели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60187 мол_а_дк и гранта Президента РФ № МК-539.2017.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hamilton M.F., Blackstock D.T. *Nonlinear Acoustics*, Academic Press, 1998.
2. Natsagortsyun K.Z., Galechyan G.A. *Laser Physics*. 4 (1994) 502–506.
3. Сайфутдинов А.И., Фадеев С.А., Сайфутдинова А.А., Кашапов Н.Ф. *Письма в ЖЭТФ*. **102** (2015) 726–731.

**ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В
ВАКУУМНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ИМПУЛЬСОМ ОПТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ И
ИНТЕНСИВНОСТЬЮ $10^6 - 10^{10}$ ВТ/СМ²**

**FEATURES OF ARC DISCHARGE INITIATION IN VACUUM GAP BY
PULSED NANOSECOND OPTICAL RADIATION WITH INTENSITY
OF $10^6 - 10^{10}$ W/cm²**

В.И. Асюнин, С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Россия,
e-mail: vniia@vniia.ru*

Для вакуумного промежутка с иницированием дугового разряда лазерным излучением измерено значение минимальной энергии, необходимой для коммутации, и обнаружено существование пороговой величины энергии излучения, при которой происходит изменение характера зависимости регистрируемых временных параметров процесса коммутации от энергии излучения. На основании полученных экспериментальных данных выдвинуто предположение о том, что в межэлектродном пространстве в продуктах эрозии электродов зажигается первоначально тлеющий разряд, который затем в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости испытывает контракцию токового канала и переходит в дуговой.

Minimum energy required for switching was measured for the vacuum gap with laser initiation of arc discharge, and existence of threshold emission energy was found, at which change occurs in the nature of relationship between the recorded timing parameters of switching process and the emission energy. Based on the experimental data, it was suggested that in electrode erosion products in the interelectrode space, an initially glow discharge ignites, which then as a result of ionization-overheating instability undergoes contraction of current channel and moves into an arc channel.

Проведено исследование зависимости временных параметров процесса коммутации вакуумного промежутка, управляемого импульсом лазерного излучения наносекундной длительности, от энергии излучения, падающего на катод-мишень, и от материала катода. Показано, что характер зависимости регистрируемых параметров от энергии излучения одинаков для различных материалов. Величина энергии лазерного импульса определяет скорость замыкания вакуумного промежутка. С ростом энергии излучения в диапазоне 200-2000 мкДж время задержки уменьшается более чем на порядок величины. При величине энергии излучения, превышающей пороговое значение, падающее излучение не только вызывает термоэмиссию электронов и выброс продуктов эрозии материала катода в межэлектродное пространство, но и ускоряет процесс развития ионизационно-перегревной неустойчивости тлеющего разряда и его переход в дуговой разряд.

К ТЕОРИИ ШНУРОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО И НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДОВ В ГАЗЕ

TO THE THEORY OF MICROWAVE AND NANOSECOND GAS DISCHARGES FILAMENTATION

Двинин С.А.

МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы. 1–2. E-mail: s_dvinin@mail.ru

Рассмотрена задача об устойчивости разряда, распространяющегося по поверхности диэлектрика, расположенного над земляным электродом. Показано, что неустойчивость может быть связана с падающей вольт-амперной (мощностной) характеристикой разряда, либо с возбуждением волн, распространяющихся вдоль поверхности фронта.

Stability problem of the stability of a discharge propagating over the surface of a dielectric located above the earth electrode is considered. It is shown that the instability can be related to the incident volt-ampere (power) characteristic of the discharge, or to the excitation of waves propagating along the front surface.

Разряд высокого давления, поддерживаемый наносекундными импульсами или сверхвысококачастотным полем, при распространении по поверхности диэлектрика при высоком давлении иногда принимает форму отдельных волокон [1, 2], причем природа наблюдаемого процесса не получила однозначного объяснения [2, 3]. В данной работе мы остановимся на электродинамических эффектах, которые могут привести к появлению этого эффекта в микроволновых и импульсных в наносекундном диапазоне времен разрядах.

Расчеты показывают, что возмущения в разряде можно разделить на три типа: 1. Возмущения, плотности электронов и поля, локализованные по всей длине разряда, 2. Возмущения плотности электронов и поля, локализованные вблизи фронта. 3. Возмущения формы поверхности фронта, обусловленные изменением его скорости распространения. Все типы возмущения удовлетворяют различным уравнениям, со своими характерными временами и размерами, но оказываются связанными между собой. Развитие неустойчивости происходит в том случае, если рост возмущений приводит к формированию падающей ВАХ разряда как целого.

В силу качественного характера кинетической модели проводимые расчеты не могут претендовать на количественное описание шнурования разряда, однако дают представление о характере протекающих процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.A. Shcherbanev, N.A. Popov, S.M. Starikovskaya. *Combust.&Flame*. **176** (2016) 272.
3. В.М. Шибков, Л.В. Шибкова, А.А. Карачев. *Теплофизика Высоких температур*. 47 (2009) 650.
3. S.A. Shcherbanev, N.A. Popov, S.M. Starikovskaya. *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** (2017) 02LT01.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАЗРЯДАХ В ОГРАНИЧЕННОЙ СРЕДЕ

IONIZATION INSTABILITIES IN HIGH FREQUENCY AND MICROWAVE DISCHARGES IN LIMITED MEDIA

Двинин С.А., ^{*}Довженко В.А., ^{**}Синкевич О.А.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1–2. E-mail: s_dvinin@mail.ru

^{*}ИФА имени А.М.Обухова РАН, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

^{**}НИУ МЭИ, Россия, 111250, Москва, Красноказарменная улица, 14. E-mail: oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru

Исследуются особенности развития ионизационных неустойчивостей в ВЧ и СВЧ разрядах в ограниченном и бесконечном плазменном столбе. Рассчитаны стационарные режимы развитой неустойчивости. Определены пороговые поля, условия реализации периодических и аperiodических режимов. Обсуждены возможности развития ионизационных неустойчивостей в технологических установках низкого давления.

Ionization instabilities in HF and microwave discharges in the limited and infinite plasma column are investigated. Stationary modes of the developed instability are found. Threshold fields, conditions of periodic and aperiodic modes realization are defined. Ionization instabilities in low pressure technological installations are discussed.

Впервые решена задача о вынужденном возбуждении ионизационно-полевой неустойчивости [1, 2] внешним источником в ВЧ и СВЧ разрядах в ограниченном и неограниченном по длине плазменных столбах. Получены выражения для коэффициента усиления возбуждаемых возмущений. Теоретически найдены условия наблюдения абсолютной неустойчивости и реализации периодического и аperiodического режимов ее развития. Рассмотрены резонансный, связанный с возбуждением собственных волн плазменного столба (поверхностных или вытекающих волн [3, 4]), и нерезонансный, обусловленный особенностями кинетики электронов, режимы неустойчивости.

Вне зависимости от того, будет ли на начальном этапе неустойчивость периодической или аperiodической, в результате ее развития может устанавливаться стационарное состояние с неоднородным распределением плотности электронов в пространстве и отсутствием колебаний во времени. Расчеты согласуются с экспериментами, проведенными в СВЧ разряде в волноводе [5]. Для ограниченной плазмы решена задача о стабилизации неустойчивости.

Аналогичные неустойчивости могут наблюдаться также в плазмохимических реакторах и других технологических устройствах низкого давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Mackey, L. Plantie, M.M. Turner. *Appl. Math. Lett.* **18** (2005) 865.
2. С.А. Двинин, В.А. Довженко, Г.С. Солнцев. *Физика плазмы.* **8** (1982) 1228.
3. Т. Tamir, А.А. Oliner. *Proceedings IEE*, **V110** (1963) 310 - 325.
4. В.В. Шевченко. *Плавные переходы в открытых волноводах.* Наука, Москва, 1969.
5. С.А. Двинин, Г.С. Солнцев и др. *Физика плазмы.* **9** (1983) 1297.

ACCOUNT OF NONLOCAL IONIZATION AND SLOW ELECTRON ENERGY BALANCE IN GLOW DISCHARGE MODELS

Eliseev S.I.¹, Bogdanov E.A.¹, Kudryavtsev A.A.¹

¹*St. Petersburg State University, Ulyanovskaya, 3, St. Petersburg, Russia,*
step.eliseev@yandex.ru

Numerical simulation of cathode region of DC glow discharge is a serious challenge due to complex kinetic behavior of electrons, the most important being non-local ionization by fast electrons which stream from cathode sheath. Applicability of different simulation approaches –extended fluid, particle/kinetic, hybrid –towards numerical modelling of direct-current (DC) glow discharges and their ability to correctly describe non-local ionization has been discussed intensively during last decades [1,2]. Simple hybrid approach seems to be the most promising in terms of accuracy and computational efficiency, since it combines fluid description for ions and slow electrons with analytical formulation of non-local ionization source [3].

We present overview and details of simple hybrid approach in appliance with DC glow discharge simulations together with formulation of slow electron energy balance. Electrons originating from non-local ionization by fast electrons contribute significantly to the energy balance of slow electrons in negative glow plasma. This heating process has to be accounted for if accurate estimations of electron density and electron temperature in plasma region of discharge are required. An approach towards calculating effective energy brought by a secondary electron to the group of slow electrons by means of coulomb collisions is suggested. The value of effective energy shows considerable dependence on external parameters of a discharge, such as gas pressure, type and geometric parameters.

The slow electron energy balance was implemented into simple hybrid model and allowed calculating electron density and electron temperature. Simulations of short (without positive column) DC glow discharge in argon were carried out for a range of gas pressures. Comparison with experimental data showed good agreement in terms of current-voltage characteristics, electron density and electron temperature.

REFERENCES

1. Z. Donkó, P. Hartmann, K. Kutasi. *Plasma Sources Science and Technology* **15** 2 (2006) 178.
2. A. Derzsi, P. Hartmann, I. Korolov, J. Karacsony, G. Bánó, Z. Donkó. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **42** 22 (2009) 225204
3. I. Rafatov, E. A. Bogdanov, A.A. Kudryavtsev. *Physics of Plasmas (1994-present)* **19** 9 (2012) 093503.

ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ ОРГАНИЗАЦИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ГАЗА

POSSIBILITIES OF CONTROL OF THE CHARACTERISTICS OF A DISCHARGE BY THE ORGANIZATION OF SUPERSONIC GAS FLOW

Залялиев Б.Р.¹, Тимеркаев Б.А.¹, Сайфутдинов А.И.², Амирзянов Д.Р.¹.

¹Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева, Россия, г. Казань, 420111, ул. Карла Маркса, 10, kai@kai.ru.

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7/9, spbu@spbu.ru.

Обсуждаются возможности тлеющих разрядов в сверхзвуковом потоке в ограниченной области.

The possibilities of glow discharges in a supersonic flow in a limited region are discussed.

Как известно, при зажигании тлеющего разряда происходит самоорганизация слоистой структуры приэлектродных зон, а для их описания вполне подходят законы подобия. Оказывается, можно нарушить эти закономерности, сделав управляемыми катодные процессы разряда. В самом деле, если организовать сверхзвуковой поток газа не во всем межэлектродном промежутке [1,2], а только в ограниченной области [3-6], то концентрации частиц в разных областях межэлектродного промежутка могут оказаться разными. Поскольку концентрация частиц газа при неизменной температуре определяет длину свободного пробега частиц газа, то толщины приэлектродных зон так же изменятся. Возможны два предельных случая эффективного управления распределением внутренних параметров тлеющего разряда. Первый случай – случай предельно низких давлений, когда организация сверхзвукового потока, например, вблизи анода, позволяет обеспечить в этой области необходимые условия для зажигания и поддержания нормального тлеющего разряда, несмотря на то, что без организации сверхзвукового потока условие самоподдержания разряда просто не выполнялось бы. Второй случай – случай средних давлений. В этом случае сверхзвуковой поток, организованный в определенной области межэлектродного пространства, позволяет концентрировать разряд именно в этой области. Например, можно сузить приэлектродные зоны, либо сузить положительный столб.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Галеев, В. Гончаров, Б. Тимеркаев и др. *ТВТ*. **28** (1990) 843.
2. И. Галеев, В. Гончаров, Б. Тимеркаев. *ТВТ*. **30** (1992) 439.
3. Б. Тимеркаев, Б. Залялиев. *ТВТ*. **52** (2014) 489.
4. В. Тимеркаев, В. Zalyaliev, А. Saifutdinov. *Journal of Physics: Conference Series*. **567** (2014) 012032.
5. А. Saifutdinov, В. Тимеркаев, В. Zalyaliev. *Journal of Physics: Conference Series*. **567** (2014) 0120313.
6. А. Saifutdinov, В. Тимеркаев, В. Zalyaliev. *High Temperature*. **54** (2016) 669.

ON THE FEATURES OF ELECTRIC FIELDS CHARACTERIZATION IN DC ATMOSPHERIC PRESSURE HELIUM DISCHARGES USING POLARIZED STARK SPECTROSCOPY

L.V. Simonchik, A.V. Kazak

Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

E-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

The effect of fluctuations in the discharge current on the Starks broadening components of helium and hydrogen lines in the cathode fall layer of the potential is investigated. The oscillations are analyzed with the use of elements of chaos theory.

Polarized Stark spectroscopy is frequently used for electric field determination in plasma. In this report we consider some features of its applications in dc atmospheric pressure helium discharges starting from Townsend discharge and terminating at a high-current glow discharge. These discharges and their characteristic regions have quite different plasma conditions leading to the H_{β} (486.1 nm) and He I (492.2 nm) line profiles broadening.

In Townsend discharge, electron concentration is extremely low and gas temperature is close to room temperature. Therefore, the main broadening mechanism of Stark components of H_{β} line is a Wan-der-Waals broadening (~ 0.05 nm). At a fitting of H_{β} line profile from region located close to anode, we obtain electric field about 5 kV/cm.

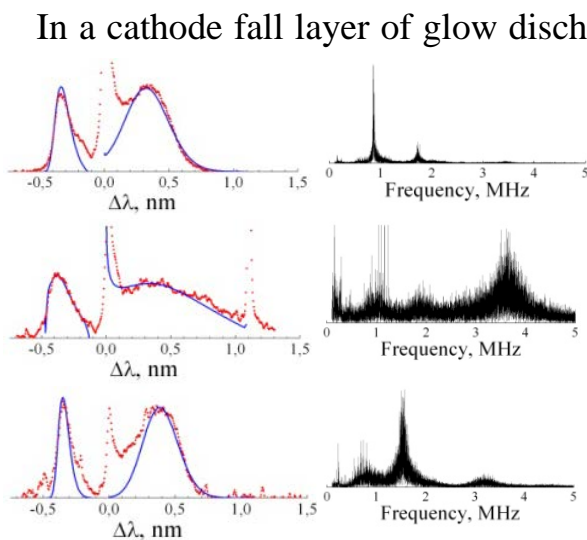


Fig. 1. The measured and simulated (solid) He I 492.2 nm line shapes (left column) and spectra of current fluctuations

as well as He I line are strongly broadened (Fig. 1a). The performed analyze of possible broadening mechanisms in this layer shows that such strong line broadening is caused by fluctuations of discharge parameters in megahertz range due to anode spots [1]. These fluctuations do not effect significantly the line profiles in the other discharge regions.

Electric field in cathode layer is represented as: $E = E_0 + E_{\sim}$, where E_0 is constant component of electric field and E_{\sim} is its variable one. So, E_0 is ~ 60 kV/cm and E_{\sim} is ~ 17 kV/cm close to cathode surface. Shapes of H_{β} and He I lines in the

cathode fall depend on admixtures of other gases in helium. In Fig 1 the shapes of He I line with of argon (b) and nitrogen (c) admixtures are shown. It can be seen, the profile becomes more broadened in the first case and more narrow in the second case in comparison with helium discharge. That is accompanied with changing of a discharge current fluctuation spectrum and an anode spots picture. Discharge current fluctuations are analyzed with an involvement of the elements of chaos theory.

REFERENCE

1. V.I. Arkhipenko et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** (2008) 045017

APPLICATION OF DC ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA JETS FOR INACTIVATION OF MICROORGANISMS CONSORTIUMS

A.V. Kazak, L.V. Simonchik, N.V. Dudchik*, O.A. Emeliyanova*

*Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk, Belarus,*Republican unitary enterprise «Scientific Practical Centre of Hygiene», Minsk, Belarus,*

E-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

Experimental results for inactivation of microorganism test strains of *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* separately and in such consortium by air plasma jet are presented. For monocultures of *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* the characteristic D-times are practically the same and are around 1.5 min, while for the consortium these is 3 min.

This report presents experimental results for inactivation of planktonic microorganism test strains of *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* separately and in their consortiums *E. coli* + *P. aeruginosa* and *S. aureus* + *E. coli* + *P. aeruginosa*. The total initial concentration in each experiment is 10^5 CFU/ml. The DC atmospheric pressure air plasma jet at 40 mA [1] is used for microorganisms inactivation. The concentration of bioactive molecules are $\text{NO} = 180$ ppm, $\text{NO}_2 = 140$ ppm, $\text{HNO}_2 = 25$ ppm. The efficiency of plasma exposure is estimated with a percentage of the survived cells in the strains. The temperature in Petri dish was controlled with a thermal imager FLIR E4 and did not exceed 30°C .

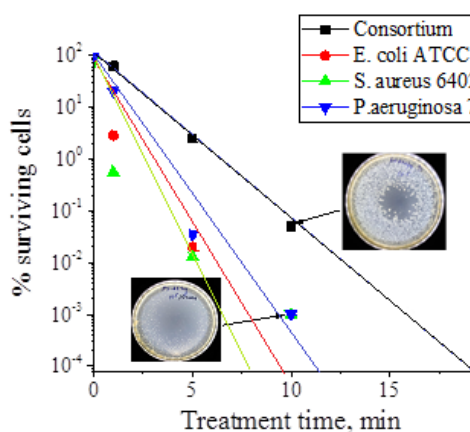


Fig.1. Inactivation curves of individual microorganisms and their consortium in result of plasma jet exposure

The efficiency of plasma exposure is estimated on the percentage of the survived cells in strains of the planktonic microorganisms and the consortium (Fig. 1). It is shown that the characteristic D-times defined as the time interval during of which the number of surviving microorganisms is reduced by 10 times were rather different. Thus, for monocultures of *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* the characteristic D-times were the same and were about 1.5 min. At the same time, the D-time for consortium of all these three strains of microorganisms exceeded 3 min. Therefore, microorganisms are steadier in the consortiums.

REFERENCES

1. A.V. Kazak, A.A. Kirillov, I.V. Lipsky, L.V. Simonchik, M.S. Usachonak, *ESCAMPIG XXIII, Bratislava, Slovakia, July 12-16, 2016* / edited by: V. Medvedka, P. Papp, J. Orszagh, S. Matejcik – Bratislava, 2016 – P. 365-366.

THE INFLUENCE OF EXTERNAL FLOW ON THE DYNAMIC OF ARC CHANNEL MOVING ALONG THE WALL WITHIN A MAGNETIC FIELD

V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, P.N. Kazanskiy, R.E. Karmatsky, I.A. Moralev

Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia, 127415, Moscow, Ijorskaja, plot 13, building 2, knispel.kurt@gmail.com

A theoretical study of the arc behavior has been conducted. The moving arc in surface magnetic field is used in high-voltage circuit breakers, plasma actuators. In practice, an important role plays the exact position of the discharge relative to the device construction or the heterogeneity of the environment. The arc discharge is moving in the magnetic field under the action of Lorentz force $\mathbf{f} = [\mathbf{j}\mathbf{B}]$, pressure gradient and, to a certain extent, viscosity forces. The Lorentz force and the viscosity forces cannot be balanced by the pressure gradient, this way a continuous vortex generator is formed within the flow. The influence of the wall on the arc channel trajectory is determined by the remoteness of the arc from the wall and border conditions on the wall. The main parameter analyzed in the experiment was the trajectory of the arc discharge front line, first of all the distance between the wall and the arc center. At the beginning, after the ignition of the arc discharge, there is a shift from the surface of the wall, approximately equal to the arc diameter. When the discharge is moving against the flow, a decrease of indent h is observed, compared to the absence of external flow. The external flow doesn't have considerable influence on the value h . It was shown that the increasing velocity of external flow leads to the intensification of the effect. At the same time, the external flow has influence on the velocity of the arc: the velocity of the arc increases moving along the flow and decreases moving against it. A theoretical calculation of the arc discharge moving in external flow under the action of the Lorentz force was conducted using the package PlasmAero. This package enables us to make a self-concordant solution of Navier-Stokes equations and Maxwell's equations in MHD-approximation for real gases in 2D-non-stationary case [1]. The achieved trajectories of the "hot point" of the discharge are close to the experimental ones. Features of the velocity and pressure distribution in near the arc channel have been detected. It was determined, that the velocity of the "hot point" depends on the conductivity model of the working mass (in this study it was the air), in particular, on the effective relation of conductivity on temperature. It was shown, that the velocity field near the arc channel is formed mainly by a pair of vortexes, and the velocity of the working mass in the "hot point" is approximately two times greater than phase velocity of the "hot point". A further research is needed in order to study the mechanism of the arc's indent from the wall in greater detail.

REFERENCES

1. V.A.Bityurin, A.N.Bocharov, Advanced Mhd Assisted Mixing of Reacting Streams // *AIAA 2001-0793, 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 8-11 January 2001, Reno, Nevada.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ПОЛОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ И РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В НИХ ПРИ НАПРЯЖЕНИЯХ БЛИЗКИХ К ПОРОГОВОМУ

GAS CAVITIES FORMATION IN ELECTROLYTE AND DISCHARGE EVOLUTION WITHIN CAVITIES AT VOLTAGE IN VICINITY OF CRITICAL VALUE

Касьянов В. С.^{1,2}, Королев Ю. Д.^{1,2}, Шемякин И. А.^{1,2}, Гейман В. Г.^{1,2}, Болотов А. В.^{1,2}, Нехорошев^{1,2} В. О.

¹*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, 63455, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, 63455, Russia, kasyanov_vs@bk.ru*

Изучается незавершенный пробой в растворе соли в воде. Используются импульсы напряжения до 1000 В микро и миллисекундной длительности. Исследуются процессы формирования газовых полостей и возникновения плазмы в них. Показано сильное влияние данных процессов на величину и форму разрядного тока.

An incomplete breakdown in a solution of salt in water is studied. The micro and millisecond pulsed voltage up to 1000 V was applied to the gap. The processes of formation of gas cavities and the appearance of plasma in them were investigated. A strong effect of these processes on the magnitude and shape of the discharge current was shown.

В настоящее время разряды в электролитах находят широкое применение в медицине, биологии эхолокации и т. д. [1, 2]. В данной работе рассматриваются процессы, протекающие в трехпроцентном растворе NaCl в воде в геометрии электродов штырь - плоскость. Длительность импульса, прикладываемого к промежутку, лежит в микро и миллисекундном интервале, а амплитуда напряжения близка к пороговому (в растворе возникает плазма) [3]. Приводится набор данных о процессе формирования, развития и деградации газовых полостей при различных полярностях приложенного импульса напряжения и различных концентрациях соли в растворе. Анализируется физический механизм эволюции полостей. Представлены данные (фотографии ССД камеры, поведения свечения промежутка во времени, спектральные измерения) о процессе формирования газоразрядной плазмы в полостях. Показано, что возникновение полостей и зажигание плазмы в них оказывает существенное влияние на протекание тока.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-08-00652а.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Schaper., W. G. Graham, K.R. Stalder. *Plasma Sources Sci. Technology*. **20** (2011) 034003.
2. P. Bruggeman., C Leys. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 5 (2009) 053001.
3. Y.D Korolev, I.A. Shemyakin, R.V. Ivashov, V.S. Kasyanov, N.V. Landl., Y.H. Sun, T Shao., Y Gao. *Journal of Physics: Conference Series*. **552** (2014) 012005.

CURRENT PASSAGE MECHANISM OF THE AUXILIARY GLOW DISCHARGE IN THE TRIGGER UNIT OF A COLD-CATHODE THYRATRON

Landl N.V., Korolev Yu.D., Frants O.B., Geyman V.G., Bolotov A.V.,
Argunov G.A., Nekhoroshev V.O.

*Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskoy Avenue, Tomsk
634055, Russia. landl@inp.hcei.tsc.ru*

The report deals with the investigation of the low-current glow discharge with a hollow cathode and hollow anode in the trigger unit of a cold-cathode thyatron. Two discharge regimes were observed: the so-called hindered glow discharge and the conventional glow discharge. A model of the current sustainment in a hollow-cathode discharge is proposed. Instead of the conventional secondary emission coefficient, the model uses a generalized emission coefficient that takes into account not only ion bombardment of the cathode, but also the emission current from an external source. The results of calculations agree well with the experimental data.

Since the end of 1980s, considerable interest has been generated to a new type of low-pressure high-current switching device with a cold cathode (the pseudospark switch) [1–5]. A range of operating pressures of the switch corresponds to the conditions of the left branch of Paschen's curve when the electron free path for ionization is much in excess of the electrode separation. For both self-breakdown of the main gap of the switch and for external discharge triggering a considerable prebreakdown electron current is required [2, 4]. This current is provided due to a trigger unit that is placed in the main cathode cavity [3].

Various types of the trigger units are used in the switches [2, 3]. One type of the trigger devices is based on an auxiliary low-current hollow-cathode glow discharge. The conditions of the auxiliary discharge burning significantly determine the rating characteristics of the switch itself. Therefore, the investigations of the auxiliary discharge seem to be of a great importance.

In this report, the data on the regimes of the auxiliary glow discharge with a hollow cathode and hollow anode are presented. The model for current sustaining in hollow-cathode discharge has been developed. The model interprets well the current-voltage characteristics.

The work was supported by Russian Science Foundation under the Grant № 14-19-00139.

REFERENCES

1. Frank K and Christiansen J. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **17** (1989) 748–53
2. Korolev Y D and Frank K. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** (1999) 1525–37
3. Bochkov V D, Dyagilev V M, Ushich V G, Frants O B, Korolev Y D, Shemyakin I A and Frank K. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29** (2001) 802–8
4. Korolev Y D, Frants O B, Landl N V, Shemyakin I A and Geyman V G. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** (2013) 2087–96
5. Meena B L, Rai S K, Tyagi M S, Pal U N, Kumar M and Sharma A K. *J. Phys. Conference Series* **208** (2010) 012110

СВЧ РАЗРЯД В ПОТОКЕ ГАЗА

MICROWAVE DISCHARGE IN A GAS FLOW

В.М. Лелевкин

*Кыргызско-Российский Славянский университет, Кыргызстан,
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44, lelevkin44@mail.ru*

Проводится расчет характеристик СВЧ разряда при атмосферном давлении в коаксиальном канале в зависимости от подводимой мощности электромагнитного излучения и расхода газа.

The characteristics of atmospheric pressure microwave discharge in a coaxial channel are calculated, depending on the input power of electromagnetic radiation and the gas flow.

На основе решения МГД уравнений проводится расчет характеристик СВЧ разряда в коаксиальном канале (плазмотрон МИФ-1 [1]) в зависимости от подводимой мощности электромагнитного излучения и расхода аргона.

Под действием электромагнитного излучения СВЧ разряд формируется в глубине канала в потоке «холодного» газа ($T=300\text{K}$). В канале реализуются две характерные области:

1. Высокотемпературное ($T \geq 4000\text{K}$), электропроводящее ($\sigma \neq 0$) ядро плазмы ($n_e > n_{ec} = m_e(\omega^2 + \nu_e^2)\epsilon_0 / e^2$), где в области скин-слоя идет диссипация излучения и затухание электромагнитной волны;

2. Низкотемпературный ($T < 4000\text{K}$), не проводящий ($\sigma \approx 0$) плазменный факел или «шуба» [1], где распространяется практически без поглощения поверхностная электромагнитная волна и коаксиальный поток «холодного газа», предохраняющий стенки канала от перегрева.

С уменьшением подводимой мощности электромагнитного излучения ($Q=1000, 350, 250$ Вт) снижается мощность, диссипация в ядре СВЧ разряда ($Q_d=447, 181, 96$ Вт), уменьшаются температура ядра ($T_{max}=9500, 8800, 8600\text{K}$) и скорость потока плазмы ($u_{max}=450, 240, 148$ м/с), происходит перемещение переднего фронта разряда вниз по потоку «холодного» газа ($z=-18,8; -10; -4$ мм), возрастают напряженность электрического поля ($E_{max}=56, 95, 98$ кВ/см) и «джоулево тепло» на переднем фронте разряда ($Q_{max}=3,4; 16,8; 18,3$ кВт/мм³).

С увеличением расхода газа ($G=1, 5, 10$ л/мин) снижается диссипация мощности электромагнитного излучения ($Q_d=730, 520, 460$ Вт), передний фронт СВЧ разряда смещается вниз по потоку, разряд интенсивнее охлаждается потоком «холодного» газа и сжимается в радиальном направлении. Это приводит к росту напряженности электрического поля ($E_{max}=11,9; 13,8; 36,4$ кВ/см), увеличению температуры в ядре микроволнового разряда ($T_{max}=8921, 9148, 9322\text{K}$) и скорости потока плазмы ($u_{max}=135, 197, 277$ м/с).

ЛИТЕРАТУРА

1. С.М. Грицинини др. *Физика плазмы*. **39** 7 (2013) 655-667.

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ СУБМИЛЛИСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ВАКУУМНЫХ ДИОДАХ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

COMPARISON OF TWO ELECTRON-OPTICAL SYSTEMS IN EXPERIMENTS ON THE GENERATION OF INTENSE SUBMILLISECOND ELECTRON BEAMS BY A VACUUM DIODE WITH A PLASMA-CATHODE

В.Т. Астрелин¹, М.С. Воробьёв², И.В. Кандауров¹, Н.Н. Коваль²,
В.В. Куркуचेков¹, С.А. Сулакшин², Ю.А. Трунев¹

**Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

***Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

E-mail: astrelin@inp.nsk.su, vorobyovms@yandex.ru

Аннотация. Используя электронный источник с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления проведено экспериментальное сравнение двух электронно-оптических систем (ЭОС): двухэлектродной мультиапертурной ЭОС №1 и ЭОС №2 с сетчатым плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей анодной плазмы. Эксперименты, проведенные в сопоставимых условиях, были направлены на достижение максимальной энергоемкости пучка субмиллисекундной длительности. Показано, что работа источника электронов с ЭОС №1 характеризуется большей пространственно-временной стабильностью пучка, но его меньшей энергоемкостью в сравнении с ЭОС №2, при работе с которой возрастает электрическая прочность высоковольтного ускоряющего промежутка, что позволяет повысить любой из основных параметров электронного пучка (энергию, амплитуду и длительность пучка). Однако, при работе с ЭОС №2 имеется высокая неоднородность плотности тока по его сечению, которая существенно ограничивает дальнейшее применение такого пучка в материаловедческих целях. Обсуждаются механизмы формирования и транспортировки пучка в обеих системах.

Abstract. Using an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge, an experimental comparison of two electron-optical systems (EOS) were carried out: a two-electrode multi-aperture EOS No. 1 and an EOS No. 2 with a mesh plasma cathode and a plasma anode with open bound. Experiments carried out under comparable conditions were aimed at achieving the maximum energy capacity of the submillisecond beam. It is shown that the operation of the electron source with EOS No. 1 is characterized by greater spatio-temporal stability of the beam, but its lower energy capacity in comparison with EOS No. 2, which increases the electrical strength of the high-voltage accelerating gap, which allows increasing any of the basic parameters of the electron beam (energy, amplitude and duration of the beam). However, when working with EOS No. 2, there is a high inhomogeneity in the current density across its cross-section, which significantly limits the further application of such beam in materials science. The mechanisms of beam formation and transport in both systems are discussed.

Эксперименты проведены в рамках программы фундаментальных исследований РАН (проект №0366-2015-0009) при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты №16-38-00739 и №16-08-00785).

ЛИТЕРАТУРА:

1. М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин. *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40. В.12. С.24-30.
2. В.Т. Астрелин, И.В. Кандауров, Ю.А. Трунев. *ЖТФ*. 2014. Т. 84. В. 2. С.106–111.

ИМПУЛЬСНО - ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ВЧ-РАЗРЯД ИНДУКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА САМООГРАНИЧЕННЫХ ПЕРЕХОДАХ PULSE-PERIODIC HF INDUCTION TYPE DISCHARGE FOR PUMPING LASERS ON SELF-TERMINATING TRANSITIONS

В.М. Батенин¹, В.Т. Карпухин,¹ М.М. Маликов¹, М.А. Казарян²

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН),
Россия, Москва, 125412, ул. Ижорская, 13, стр.2. e-mail: mmalikov@oivtran.ru.

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Россия, Москва, 119991,
Ленинский пр-т, 53

Представлены результаты численных исследований физических процессов, протекающих в рабочей смеси лазера на парах меди, возбуждаемого цугами высокочастотных (10–70 МГц) колебаний электрического тока, следующих друг за другом с частотами (2–30) кГц. Безэлектродный разряд создавался новым для этого лазера индукционным способом.

The results of numerical studies of physical processes working mixture of the copper vapor lasers excited by high frequency trains (10–70 MHz) oscillations of electric current, following each other with frequency (2–30) kHz are presented. The electrodeless discharge was created new for this laser induction method.

В работе исследовалась возможность эффективной накачки лазера высокочастотным разрядом. Для этого использовались разработанные в [1] физическая модель индукционного лазера на парах меди (ИЛПМ) и программы расчёта, которые позволяют находить самосогласованные значения всех плазменных, электрических и тепловых искомым величин. В рассмотренной схеме ИЛПМ импульс накачки представляет собой цуг затухающих ВЧ колебаний. Мощность джоулева тепловыделения носит пульсирующий характер и соответственно, наблюдаются заметные пульсации электронной температуры T_e . Однако, это не мешает возникновению и поддержанию инверсной заселённости на самоограниченных переходах рабочих лазерных уровней. На спадах $T_e(t)$ скорость заселения верхнего лазерного уровня продолжает опережать скорость заселения нижнего уровня, вследствие снижения скорости расселения верхнего уровня на вышележащие уровни в эти моменты времени. В целом, картина генерации излучения ИЛПМ при возбуждении цугами ВЧ тока, носит более сложный характер, чем в обычном электродном ЛПМ с длинным (~250 нс) аperiodическим импульсом накачки. Показано, что преимуществом ВЧ накачки является более высокая скорость ввода энергии в плазму. Отметим, что при объёме разрядной камеры в 1.7 литра, выходная мощность достигала 170 Вт, при физическом и техническом кпд соответственно 3.7 % и 1.9 %. Это свидетельствует о перспективности создания эффективных мощных ИЛПМ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00410

ЛИТЕРАТУРА

1. V. M. Batenin, M. A. Kazaryan, V. T. Karpukhin, N. A. Lyabin and M. M. Malikov. *Plasma Physics Reports*. **42(11)** (2016) 1057.

EXPERIMENTS ON PHASE TRANSITIONS IN 3D DUSTY PLASMA UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

Molotkov V.I.¹, Naumkin V.N.¹, Lipaev A.M.¹, Zhukhovitskii D.I.¹, Usachev A.D.¹,
Fortov V.E.¹, Thomas H.M.²

¹*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Izhorskaya 13 Bld 2, Moscow 125412, Russia, molotkov@ihed.ras.ru*

²*Institute of Materials Physics in Space (DLR-MP) German Aerospace Center,
51147 Cologne, Germany*

The investigations have been performed onboard the International Space Station (ISS) with the help of the PK-3 Plus laboratory. Due to the manipulation of the interaction potential between the microparticles it is possible to initiate a phase transition from isotropic plasma into electrorheological plasma. The crystal–liquid phase transition was obtained in large 3D isotropic dusty plasma system. First observations of a transition of the dusty plasma system state due to variations of the plasma component density are presented.

Complex (dusty) plasmas are composed of weakly ionized gas and charged microparticles and represent the plasma state of soft matter [1]. Due to the “heavy” component, microparticles, and the low density of the surrounding medium, the rarefied gas and plasma, it is necessary to perform experiments under microgravity conditions to cover a broad range of experimental parameters which are not available on ground. The investigations have been performed onboard the International Space Station (ISS) with the help of the PK-3 Plus laboratory [2]. This laboratory was mainly built to investigate the crystalline state of complex plasma, the so-called plasma crystal, its phase transitions and processes in multi-particle mixtures. One of the important results achieved using the PK-3 Plus laboratory was the first observation of the electrorheological effect in complex plasmas or a phase transition from an isotropic fluid into a so-called electrorheological string fluid. We performed experimental investigations of the fluid-solid phase transitions in large 3D complex plasmas under microgravity conditions. These phase changes were driven by manipulating the neutral gas pressure. It was observed that the system of charged particles can exhibit melting upon increasing the gas pressure, in contrast to the situation in ground-based experiments where plasma crystals normally melt upon reducing the pressure. The other quite a new observation concerns a study of transitions of the dusty plasma system state due to variations of the ion density. It was demonstrated a rather complicated character of the dependence of the system order upon the ion density.

The work is supported by the Russian Science Foundation, grant 14-12-01235.

REFERENCES

1. V.E. Fortov, G.E. Morfill (eds). *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space Series in Plasma Physics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
2. H.M. Thomas et al. *New J. Phys.* **10** (2008) 033036.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ИМПУЛЬСНОМ НАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ
В ДИОДЕ С ОСТРИЙНЫМ КАТОДОМ
МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**STUDY OF NEAR-ELECTRODE PROCESSES AT NANOSECOND
PULSE DISCHARGE INTO DIODE WITH POINT CATHODE
BY LASER PROBING**

Е.В. Паркевич^{1,2}, С.И. Ткаченко², А.В. Агафонов¹

⁽¹⁾*Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия;*

⁽²⁾*Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700
Долгопрудный, Россия; parkevich@phystech.edu*

Лазерными методами изучалась предпробойная стадия разряда при атмосферном давлении в диоде с сильной перенапряженностью поля на катоде. В случае разряда в воздухе было обнаружено, что начальная стадия пробоя сопровождается появлением плотного облака плазмы на торце катодного острия с электронной плотностью около $N_e \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на масштабе нескольких десятков микрон.

The prebreakdown stage of a gas discharge in a diode with strongly overloaded cathode is studied by laser methods at atmospheric pressure. It is shown that the initial stage of breakdown of a discharge gap is accompanied by the emergence of a dense plasma bunch at the end of a tip with electron density of about $N_e \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ with a size of tens of microns

Для исследования импульсного разряда в широком диапазоне давлений от 10^{-5} тор до 1 атм была создана малогабаритная установка с жёсткой синхронизацией момента зондирования пикосекундного Nd:YAG лазера LS-2151 (энергия в импульсе до 40 мДж; две гармоники – $\lambda = 1064$ и 532 нм) с подаваемым импульсом напряжения на исследуемую нагрузку (точность синхронизации импульса напряжения и зондирующего луча ~ 1 нс). Установка позволяет получать импульсы напряжения амплитудой до 10 кВ и длительностью ~ 150 нс, длительность фронта импульса – 20 нс, максимальный ток – 1.5 кА. Электрические сигналы с датчиков тока и напряжения регистрировались цифровыми осциллографами Tektronix TDS 3054В с полосой пропускания 500 МГц. Момент прихода зондирующего лазерного луча в разрядную камеру определялся по сигналу фотодатчика. Сильная перенапряженность электрического поля на катоде достигалась использованием в качестве одиночного острия тонких проволочек диаметром от 10 мкм и более. Используемая оптическая схема позволяет получать до трёх кадров за один выстрел с одновременной регистрацией в каждом канале интерференционного, теневого и шпирен-изображения. Время экспозиции кадра определяется длительностью лазерного импульса – 70 пс.

В случае разряда в воздухе атмосферного давления было обнаружено, что начальная стадия пробоя сопровождается появлением плотного облака плазмы на торце катодного острия с электронной плотностью около $N_e \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на масштабе нескольких десятков микрон. Одновременно с появлением облака плотной плазмы на торце острия анодный шунт начинает регистрировать резкий рост суммарного тока через диод; средняя скорость нарастания составляет $\sim 15 \text{ А/нс}$.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ XE И Cl₂ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСИМЕРНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА

INFLUENCE OF VARIATION OF RF CAPACITIVE DISCHARGE PARAMETERS IN XE – Cl₂ MIXTURE ON EXCIMER UV RADIATION

Головицкий А.П., Пелли А.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, ул. Политехническая, д.29, Санкт-Петербург, Россия, pelli.alexandr@gmail.com

Посредством численного 1D моделирования емкостного ВЧ разряда в смеси Хе и Cl₂ определен оптимальный с точки зрения максимизации мощности и кпд выхода эксимерного УФ излучения состав смеси газов.

The optimal gas mixture composition providing the maximal power and efficacy of UV excimer radiation is found by 1D modeling of capacitive RF discharge in the mixture of Xe and Cl₂.

Разряды в смесях инертный газ – галоген применяют как эффективные безртутные источники мощного узкополосного ультрафиолетового (УФ) излучения мощностью от единиц до тысяч ватт [1, 2]. Большой интерес представляет изучение безэлектродных разрядов, в частности ВЧ – как обеспечивающих большую долговечность отпаянных приборов. Доныне все подобные исследования были сугубо эмпирическими, а имеющиеся модели электроотрицательной плазмы ВЧ разряда обходят вниманием вопросы излучения плазмы.

В данной работе посредством численного моделирования исследовано влияние парциального давления хлора на излучательную мощность W_{UV} и кпд η ВЧ разряда. Амплитуда ВЧ напряжения $U_0 = 200 - 800$ В при межэлектродном зазоре 4 см. Показано, что оптимальные значения кпд достигаются при относительном содержании Cl₂ порядка 0.001 – 0.03 (рис. 1a,b), что согласуется с экспериментальными данными [3]. Дано физическое объяснение полученным закономерностям

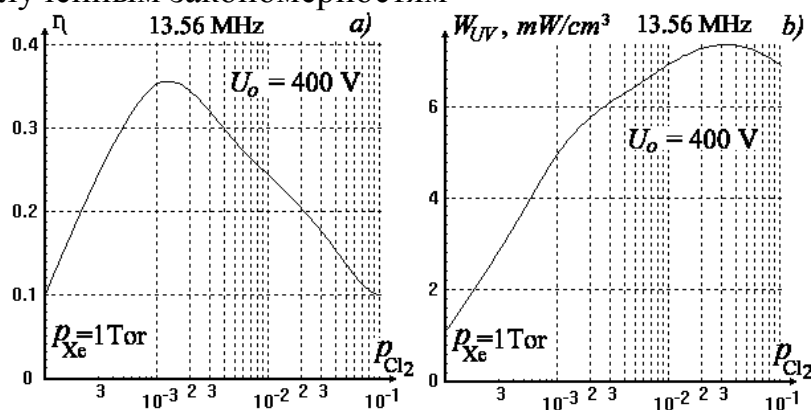


Рис.1

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р. Golovitskii Tech. Phys., 56 (2011), 371 – 380.
2. V.S. Skakun, M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko et al. *Laser and Particle Beams* 21 (2003) 115 – 119.
3. Головицкий А.П. *Письма в ЖТФ* 24 6 (1998) 63 – 67.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКАМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА
INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF LOW-TEMPERATURE
FREQUENCY PULSE PLASMA DISCHARGE IN RELATION TO AIR
CLEANING UNITS**

А.З. Понизовский, С.Г. Гостеев, О.С. Кужель
ФМКБ «Горизонт» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», РФ, м/о
г. Дзержинский, ул. Энергетиков, д.7, *Email: horizont156@rambler.ru*

In paper it studied parameters of low-temperature plasma (LTP) used in systems for cleaning waste gas. LTP created by positive nanosecond corona discharges, generated by high voltage pulses with a rise time of 50-100 ns, duration up to 100-600 ns, an amplitude up to 90 kV and pulses repetition 50-1000Hz. in coaxial electrode system with gap space 3-10 cm through which moving air.

В настоящее время находят применение высоковольтные электрофизические установки с многоточечными коронирующими электродами, работающие в частотно-импульсном режиме. Практическое использование таких систем возможно только в случае достаточно полной передачи энергии ($E_{пл}$) от генератора импульсов в газ. В работе проведены исследования параметров низкотемпературной плазмы в герметической камере, состоящей из заземленной трубы с коаксиально расположенным высоковольтным электродом в виде последовательно расположенных звездочек. Плазма создавалась импульсами напряжения с фронтами 50-100 нс, длительностями 100-600 нс, амплитудами (U_a) до 90 кВ и частотами следования 50-1000Гц, генерируемыми 3-х ступенчатыми ГИНами по схеме Фитча. Данное устройство позволяет накладывать импульсы напряжения U_a на постоянное напряжение (U_d), причем в безнагрузочном режиме $U_a / U_d \sim 3$. Опыты проводились в проточном воздухе при скоростях $v_f = 0,01 - 10$ м/с. В экспериментах измерялись: ток стримеров зондовой методикой, напряжение на высоковольтном электроде, разрядный ток и визуально оценивалось интегральное свечение через окно в торце камеры. Экспериментально установлено, что частота генерации стримеров, средний заряд головки стримеров, и, следовательно, $E_{пл}$ является функцией крутизны импульса напряжения. Было установлено, что в частотно-импульсном режиме возможен переход стримера в искру в сантиметровых воздушных промежутках при средних напряженностях электрического поля менее 10 кВ/см, что ограничивает максимальное значение $E_{пл}$. Другое ограничение $E_{пл}$ связано с тем, что характер разряда зависит от скорости потока и частоты следования импульсов. При $v_f > 0,15$ м/с при положительной полярности импульса наблюдаются две стадии стримерного процесса – первичный и вторичный стример. Для скоростей потока $v_f \leq 0,15$ м/с наблюдается полное исчезновение вторичного стримера, вследствие чего происходит существенное снижение $E_{пл}$ при одинаковых параметрах импульсного напряжения. Полученные результаты использованы при конструировании плазменных установок для очистки газов от экологически вредных выбросов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ 'ПОВЕРХНОСТНЫЙ ДБР - ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ' ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF THE SURFACE DBD AND THEIR EFFECT ON THE RESONANT POWER SOURCES

Селивонин И.В.^{1,2}, Моралев И.А.²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 112500, Москва,
Красноказарменная ул., 14

²Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127415, Москва, Ижорская
ул., 13/2

E-mail: inock691@ya.ru

Аннотация: В данной работе были исследованы факторы, определяющие форму ВКЦ барьерного разряда, а также влияния ДБР как емкостной нагрузки на резонансный источник питания.

Abstract: In this paper, we investigated factors determining the shape of the VCC of a barrier discharge and the influence of DBD as a capacitive load on a resonant power source.

Главной задачей данной работы является анализ основных факторов, влияющих на форму циклограммы поверхностного ДБР и построение количественной модели взаимодействия разряда с резонансным источником питания. Емкость разряда может быть определена как $C_p(t) = dQ/dU$ [1].

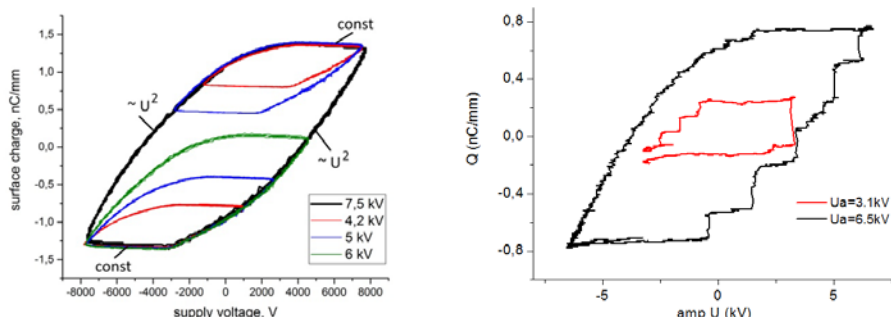


Рис.1. Интегральная ВКЦ для различных напряжений (слева) и ВКЦ в случае узкого электрода (2 мм).

Влияние разряда на источник питания с резонансным фильтром на выходе исследовалось аналитически. Проводился анализ линеаризованного уравнения (1) методом разложения параметрического члена $C_p(t)U$ в ряд Фурье и последующего анализа амплитуды гармоник возмущения. Данный подход позволяет вычислить средний заряд, рассеиваемую мощность, нелинейность напряжения и гармонические искажения как функции формы ВКЦ.

$$q_p'' + q_p \omega_0^2 - \frac{C_p}{C_0} \frac{U_{0a}}{L} \sin(\omega t) = 0 \quad (1)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Kriegseis, S. Grundmann, and C. Tropea, *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 1, p. 013305, 2011.

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ КРОМКИ И ПРИЛЕЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БАРЬЕРА В ПОВЕРХНОСТНОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

ELECTRODE AND DIELECTRIC BARRIER MODIFICATION IN A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

Селивонин И.В.^{1,2}, Лазукин А.В.¹, Моралев И.А.², Кривов С.А.¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 112500, Москва, Красноказарменная ул., 14

²Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127415, Москва, Ижорская ул., 13/2

E-mail: inock691@ya.ru

Аннотация: В данной работе были исследованы процессы модификация электродной кромки и прилегающей поверхности барьера в поверхностном диэлектрическом барьерном разряде

Abstract: In this paper, we investigated electrode and dielectric barrier modification in a dielectric barrier discharge

Данная работа посвящена феноменологическому исследованию модификации кромки медного и алюминиевого электродов и поверхности керамического барьера под воздействием поверхностного разряда, а также динамики вложенной энергии. Экспонирование разрядных ячеек проводилось в течение 96 часов при частотах синусоидального питающего напряжения 25 и 110 кГц и амплитудах 3,3 и 4,2 кВ. В процессе экспонирования производилась микросъемка разряда и поверхности электрода, а также измерение рассеиваемой мощности. Также были получены картины рельефа поверхности.

Независимо от материала, на кромке коронирующего электрода уже при экспозиции в несколько часов наблюдаются ярко выраженные морфологические изменения. Обнаружено, что структура кромки электрода после экспонирования напрямую связана с динамикой микроударов. Динамика микроударов существенно различается в зависимости от материала электрода. Диэлектрический барьер повреждается под действием разряда незначительно. На его поверхности высаживаются оксидные образования, вследствие чего возрастает степень шероховатости барьера. Скорость и интенсивность процессов модификации коронирующего электрода растет с ростом питающего напряжения.

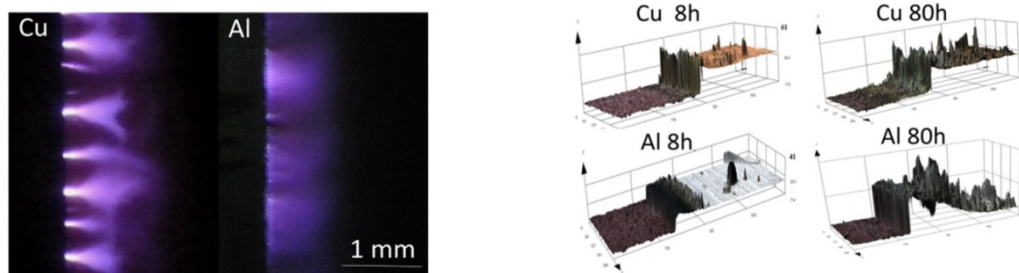


Рис.1. Изображения разряда для алюминиевого и медного электродов (слева) и рельеф электродов при различных временах экспозиции (справа)

НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

NANOSECOND SURFACE BARRIER DISCHARGE IN AIR: NUMERICAL MODELING AND ANALYTICAL ESTIMATIONS

Соловьев В.Р.^{1,2}, Кривцов В.М.^{1,3}

¹МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

²ОИВТ РАН, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

³ВЦ РАН, 119333, Москва, Вавилова, д.44, кор.2

Выполнено численное моделирование поверхностного барьерного разряда (ПБР) в атмосферном воздухе в случае его возбуждения импульсом напряжения длительностью 30-50 нс. Поверхностный барьерный разряд, возбуждаемый импульсом напряжения такой длительности, является предпочтительным объектом исследования для выяснения физики происходящих в разряде процессов, поскольку протекает в форме единичных импульсов с известными начальными условиями, обеспечивающими надежную интерпретацию полученных результатов в сравнении с экспериментальными данными. Полученные результаты по генерации импульсов разряда на переднем и заднем фронте импульса напряжения и по форме тока разряда хорошо совпадают с результатами эксперимента. Пространственная структура разряда на переднем и заднем фронте импульса напряжения сильно отличается. Проанализированы причины такого различия и получена аналитическая оценка длины и высоты зоны разряда при различной полярности высоковольтного электрода. Численно промоделированы и аналитически оценены распределения по длине разряда мощности энерговыклада и накопления активных радикалов, прежде всего атомарного кислорода, необходимые для оценки возможности ускорения зажигания топливных смесей с помощью ПБР. Предложенные аналитические оценки показывают функциональные зависимости параметров разряда от приложенного напряжения, толщины диэлектрика и значения его диэлектрической проницаемости.

Numerical simulation of the surface dielectric barrier discharge (SDBD) in atmospheric air has been done for a case of its ignition by a 30-50 ns voltage pulse. The SDBD driven by such a pulse is a preferable object of investigation to get the discharge physics, because it develops as a single discharge current pulse based on the well known initial conditions, giving the possibility of reliable interpretation of obtained results in comparison with experimental data. The simulated results for electrical current pulse waveform and for discharge pulses generation at the leading and trailing edges of the voltage pulse are in a good agreement with experimental data. The spatial structure of the discharge at the leading and trailing edges of the voltage pulse is quite different. The reasons of such a difference have been analyzed and the analytical estimation of the discharge length and thickness has been got for different exposed electrode polarities. The discharge power deposition and active species accumulation (atomic oxygen, first of all) along the discharge length have been both numerically simulated and analytically estimated. These data are important for estimation of plasma assisted ignition using nanosecond SDBD. The proposed analytical estimations reveal the functional dependencies of discharge parameters on applied voltage, dielectric thickness and dielectric relative permittivity.

SCIENTIFIC RESEARCH IN LABORATORY OF HYPERSONIC AND PLASMA TECHNOLOGIES

Arefyev K.Yu., Prokhorov A.N., Son E.E., Son K.E.

*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Russia, Dolgoprudny, Moscow
region, son.ke@mipt.ru*

The research laboratory of hypersonic and plasma technologies (HPT laboratory) is established in Moscow Institute of Physics and Technology with the view of fundamental and applied researches in prospective aerospace systems and their propulsion units, the laboratory carries also a professional training in the aerospace field. It is an item of the Program 'Five Top 100' by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. As partners of the laboratory there are some leading academic and applied-research institutes, enterprises of aerospace industry, and institutes of higher education.

The HPT laboratory has recently obtained new computational-experimental data in the following fields of its research:

- thermal gasdynamic processes at hypersonic flow around bodies of various shape;
- thermophysical properties and material durability under higher thermal load;
- hydro-gas-dynamic and plasma-chemical processes in high-enthalpy multiphase flows.

The research works of HPT laboratory within the international project HEXAFLY-INT (High Speed Experimental Fly Vehicles - International) demonstrate the resource of simulation technique for external and internal gasdynamic processes under the incoming hypersonic flow against a prototype plane. The comparison of results obtained by computations and experiments proves their acceptable accuracy to predict the aerogasdynamic features of hypersonic aircraft.

A current task of the HPT laboratory is computational-engineering development of some possible validation models of a hypersonic aircraft with its integrated propulsion unit so that to perform comparative trials at various hypersonic installations and wind tunnels, and as well to compare predictive computational research with experimental data.

A configuration of the modelling hypersonic stand is presented for both educational laboratory works and scientific research over a wide range of Mach number.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗЫ ПРОБОЯ ПРОМЕЖУТКА “ОСТРИЁ-ПЛОСКОСТЬ” ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ АЗОТА, АРГОНА И ВОЗДУХА

BREAKDOWN OF “TIP-PLANE” GAP BY SUBNANOSECOND-RISETIME VOLTAGE PULSES AT HIGH PRESSURES OF NITROGEN, ARGON AND AIR

Сорокин Д.А., Ломаев М.И., Белоплатов Д.В., Тарасенко В.Ф.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, г. Томск,
пр-т Академический 2/3, E-mail: SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru

При помощи метода электронно-оптической хронографии проведено исследование стадии пробоя межэлектродного промежутка импульсами напряжения с скоростью нарастания до $\sim 10^{14}$ В/с. Исследования проводились посредством регистрации временного хода интенсивности излучения полос второй положительной системы молекулы азота и атомарной линии аргона (750,4 нм) из плазмы разряда, формируемой в диоде при зазорах 5-8 мм, заполненном азотом, воздухом или аргоном при давлениях сотни-тысячи Торр. Установлено, что при подаче на межэлектродный промежуток, выполненный в геометрии “острие-плоскость”, импульсов напряжения амплитудой 45-55 кВ с длительностью фронта 0.5 нс пробой происходит в виде волны ионизации, начинающейся от катода с малым радиусом кривизны. Это имеет место как в результате прихода на промежуток первичного импульса напряжения, так и при последующих – отраженных от генератора импульсах. Измеренные средние значения скорости волны ионизации достигают $\sim 0.3 \cdot 10^{10}$ см/с. На основании зарегистрированного временного хода интенсивности излучения полос первой отрицательной и второй положительной систем молекулы азота оценены значения электронной температуры T_e и приведенной напряженности электрического поля E/N в плазме разряда.

Using the technique of electron-optical-chronography the phase of break down of an interelectrode gap by voltage pulses having the rate of $\sim 10^{14}$ V/s was investigated. The study was carried out by means of registration out of discharge plasma the time dependence of the emission intensity of the bands of the second positive system of a nitrogen molecule and atomic line of the argon (750.4 nm). Plasma was formed in the diode with electrode spacing of 5-8 mm filled with nitrogen, air or argon at pressure of hundreds-thousands Torr. It has been established that when applying voltage pulses with the amplitude of 45-55 kV and the risetime of 0.5 ns the breakdown of the gap is occurred in the form of the ionization wave. This occurs both during the arrival of the primary voltage pulse on the gap, and for subsequent pulses reflected from the pulser. The measured average values of ionization wave velocity are achieved $\sim 0.3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Based on the recorded time dependencies of the emission intensity of the bands of the first negative and second positive systems of the nitrogen molecule, the values of the electron temperature T_e and the reduced electric field strength E/N in the discharge plasma were estimated.

ЛАБОРАТОРНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ В ВОЗДУХЕ МИНИ-СТРУЙ ГОЛУБОГО И КРАСНОГО ЦВЕТА

LABORATORY DEMONSTRATION IN THE AIR BLUE AND RED MINI-JETS

Тарасенко В.Ф., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А.

Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия. E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Плазменные мини-струи (апокампы) голубого и красного цвета, подобные струям (blue jets и red sprites), наблюдаемым в верхних слоях атмосферы, были зарегистрированы при импульсно-периодическом разряде в воздухе при давлениях 1-760 Торр.

The formations of mini plasma jets (apokamps) of blue colored similar blue jets, and red colored similar red sprites observed during the discharges in the upper layers of atmosphere were registered in air during pulse-repetitive discharge under the pressures 1-760 torr.

В наших работах [1, 2] сообщалось о наблюдении нового режима разряда, который было предложено называть апокампом. Апокамп был зарегистрирован при атмосферном давлении воздуха и имел форму диффузных струй, которые формируются в местах усиления электрического поля около изгибов диффузного канала импульсно-периодического разряда: отсюда и название явления, которое развивается от изгиба канала (от греч. *από* – «от» и *καμπή* – «изгиб», «поворот»). Апокампы (диффузные струи) были направлены перпендикулярно каналу и распространялись преимущественно вверх при горизонтальном расположении искрового канала. При вертикальном положении канала импульсно-периодического разряда апокампы распространялись почти параллельно поверхности экспериментального стенда. Основные отличия апокампа от широко известных «плазменных струй» это отсутствие дополнительной прокачки газа через область разряда, а также формирование апокампа и импульсно-периодического разряда в открытом пространстве, не ограниченном диэлектрическими стенками.

Установлено, что ряд свойств апокампов, имеющих при низких давлениях размеры в единицы-десятки сантиметров, подобны свойствам гигантских плазменных струй (спрайтов, стартеров и голубых струй), наблюдаемых в атмосфере Земли на высотах 17-100 км. В докладе приводятся фотографии апокампов в различных условиях, их спектры, а также осциллограммы импульсов напряжения, тока и излучения. В лабораторных условиях продемонстрировано постепенное изменение цвета диффузных струй с уменьшением давления воздуха. Установлено, что плазменную мини-струю существенно легче сформировать при положительной полярности диффузного канала основного разряда. Приводятся данные о динамике формирования апокампа, полученные с помощью высокоскоростных камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.А. Соснин и др. *Письма в ЖЭТФ*. **103** (2016) 857.
2. Э.А. Соснин и др. *Оптика атмосферы и океана*. **29** (2016) 855.

ДИНАМИКА ПЕРЕХОДА СИЛЬНО ПЕРЕНАПРЯЖЕННОГО ДИФFUЗНОГО РАЗРЯДА В КОНТРАГИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ С СИЛЬНОТОЧНЫМИ КАТОДНЫМИ ПЯТНАМИ В H_2 И D_2

ON TRANSITION OF A STRONGLY OVERVOLTAGE DIFFUSIVE DISCHARGE INTO THE CONSTRICTED REGIME WITH THE HIGH- CURRENT CATHODE SPOTS IN H_2 AND D_2

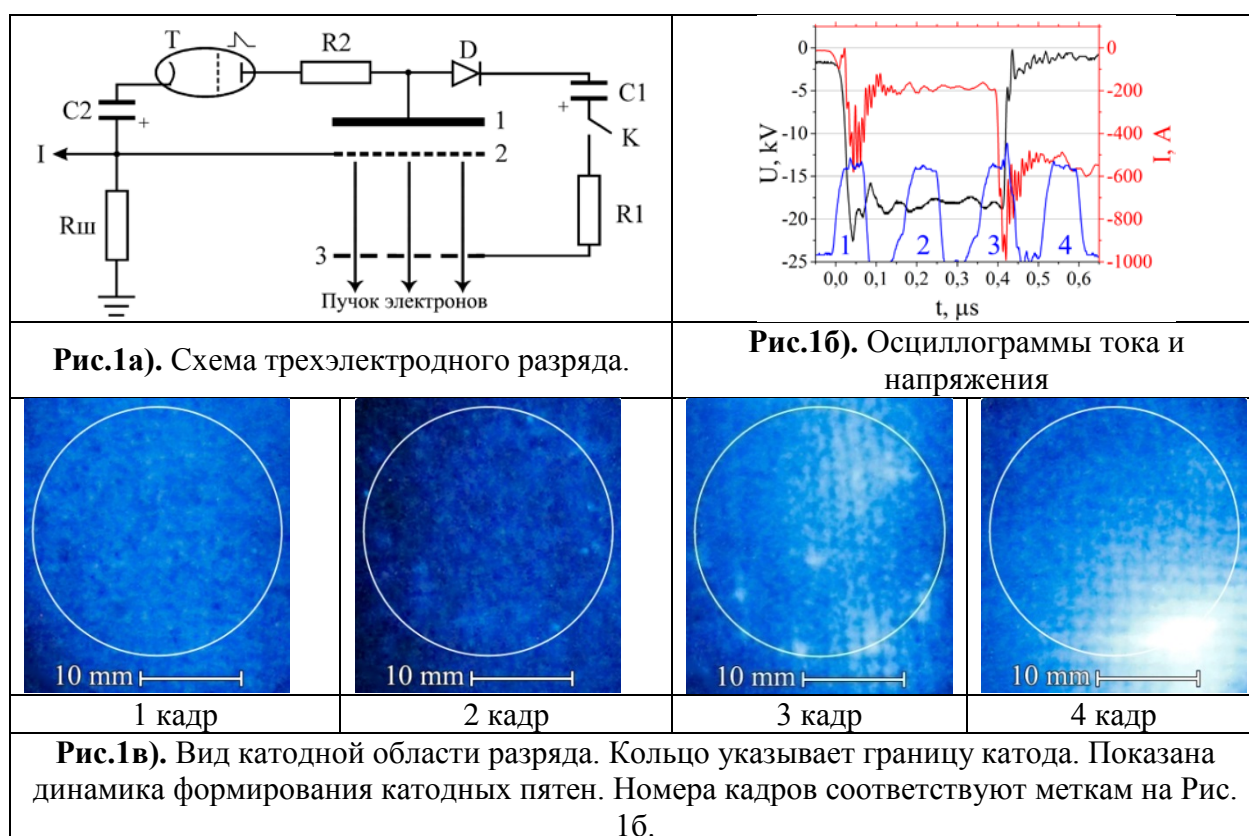
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Медведев М.А., Петряков А.В., Трушкин Н.И.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12, trushkin@triniti.ru

В докладе раскрыт сценарий перехода высоковольтного разряда в искру.

The report presents the results showing the transition of high-voltage discharge in spark.

Исследован срыв генерации электронного пучка в трехэлектродной схеме (Рис.1а) с сильно перенапряженным разрядом в H_2 и D_2 за счет развития неустойчивости катодного слоя, которая приводит к формированию сильноточных катодных пятен и переходу высоковольтного диффузного разряда в искру. Результаты, представленные на Рис.1б и Рис.1в, кратко демонстрируют сценарий указанного перехода для D_2 при $P=1$ Тор. Подробная информация будет изложена в полной версии доклада.



Работа выполнена при полной поддержке РФФ (грант № 16-12-10458).

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В H_2 И D_2 В ПЕРЕНАПРЯЖЕННОМ ДИФФУЗНОМ И НИЗКОВОЛЬТНОМ КОНТРАГИРОВАННОМ РЕЖИМАХ

SPECTRUM OF EMISSION FROM THE CATHODE REGION OF PULSED DISCHARGE IN H_2 AND D_2 IN BOTH STRONGLY OVERVOLTAGE DIFFUSIVE AND LOW-VOLTAGE CONSTRICTED REGIMES

Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафииков А.Г.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, д. 12, trushkin@triniti.ru

Представлены результаты по спектрам излучения из зоны сильноточного разряда с катодными пятнами и из зоны вне разряда, возбуждаемой импульсным пучком убегающих электронов, созданных разрядом в H_2 и D_2 при низком давлении.

Optical spectrum of the emission from high-current cathode spots in H_2 , D_2 is studied.

Перенапряженный режим трехэлектродного диффузного разряда в H_2 и D_2 при давлении $P=0.1-3.0$ Торр используется для генерации импульсного электронного пучка. Обрыв генерации обусловлен контракцией разряда и его переходом в низковольтный режим вследствие формирования сильноточных катодных пятен. В спектре излучения из зоны разряда с токовыми пятнами обнаружены линии ионов материала катода, что свидетельствует о термической природе этих пятен (Рис.1а). По отношениям интенсивностей линий Бальмеровской серии определена электронная температура в катодном пятне. Излучение из зоны вне разряда (Рис.1б) создается возбуждением газа пучком электронов. Это излучение существенно слабее и не содержит линий ионов железа. Подробная информация будет изложена в полной версии доклада.

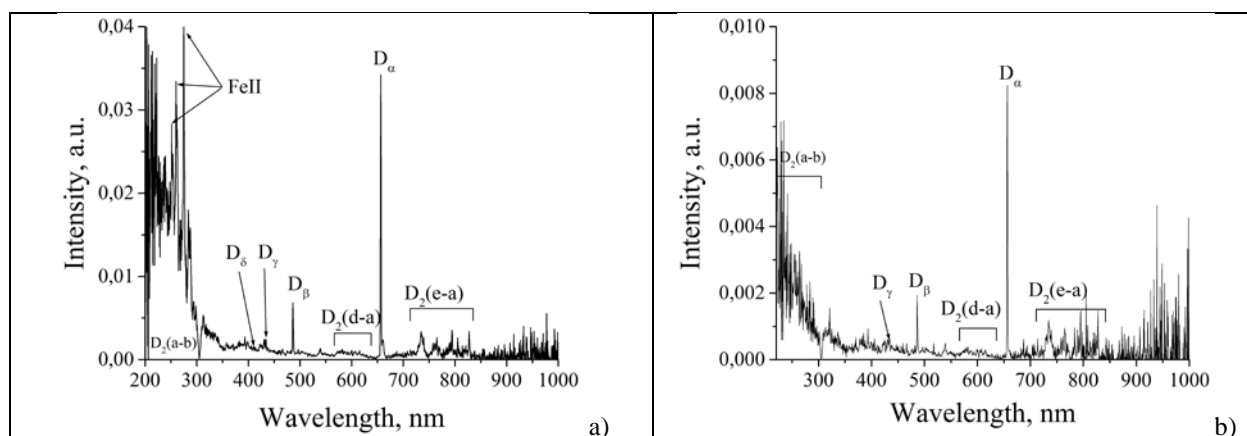


Рис.1. Обзорные спектры излучения из зоны разряда (а) и зоны вне разряда (б). Газ - D_2 , давление $P=2$ Торр. Амплитуда приложенного напряжения 20.2 кВ.

Работа выполнена при полной поддержке РФФ (грант № 16-12-10458).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА КАТОДЕ ИЗ ОКСИДА ЦЕРИЯ, МОДЕЛИРУЮЩЕГО ОКСИД УРАНА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ОЯТ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DIFFUSED VACUUM ARC WITH CERIUM OXIDE CATHODE MODELING URANIUM OXIDE FOR THE METHOD OF SNF PLASMA SEPARATION

Усманов Р.А., Амиров Р.Х., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Лизякин Г.Д.,
Полищук В.П., Першин Д.А., Самойлов И.С., Смирнов В.П., Ярцев И.М.

ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, ravus46@yandex.ru

Представлены результаты исследования стационарного диффузного разряда на катоде из CeO_2 , моделирующим процессы получения плазмы UO_2 . Измерена ВАХ разряда при токах 20-120 А и температуре катода 2.1-2.4 кК. Зондовыми методами определены температура и концентрация электронов и энергия ионов в пространстве за анодом. Спектральными методами установлен компонентный состав плазмы.

The results of an experimental study of the stationary diffused discharge with cerium oxide hot cathode modeling vaporization and ionization processes of UO_2 are presented. The CVC of the discharge was measured at currents of 20 - 120 A and cathode temperature of 2.1-2.4 kK. Electron temperature, their concentration and ion energy after anode space were studied by probe techniques. The plasma component composition was determined by spectral method.

Диффузная вакуумная дуга рассматривается в качестве источника плазмы для технологии плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Катодом дуги являлся оксид церия, который способен моделировать особенности процессов испарения и ионизации диоксида урана – основного компонента ОЯТ. Схема эксперимента описана в работе [2]. Для внешнего разогрева катода дуги использовался электронно-лучевой подогреватель (ЭЛП), что позволяло изменять температуру катода при фиксированном токе разряда. Представлены зависимости напряжения горения разряда (9-13 В) и температуры электронов (0.7-1.0 эВ) от тока дуги и температуры катода. Измерены значения коэффициента электропереноса в разряде (~0.02 атом/электрон). Методом задерживающего потенциала измерена энергия ионов в плазме за анодом. В исследованной области параметров получено относительно слабое влияние мощности внешнего подогрева катода на параметры плазмы паров катодного материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 14-29-00231.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.Kh. Amirov et al. *Plasma Phys. Rep.* **41** (2015) 808.
2. R.Kh. Amirov et al. *J. Phys.: Conf. Ser.* **774** (2016) 012190.

ИНИЦИИРОВАНИЕ РАЗРЯДА В ВАКУУМНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПУТЕМ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ ПРОБОЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА

INITIATION OF DISCHARGE IN VACUUM GAP BY INJECTING BREAKDOWN PLASMA ALONG DIELECTRIC SURFACE

Асюнин В.И., Давыдов С.Г., Долгов А.Н., Якубов Р.Х.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Россия,
e-mail: vniia@vniia.ru*

Обнаружено изменение условий протекания тока и увеличение длительности процесса пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме в присутствии продольного магнитного поля. Наблюдалось замедление процесса пробоя при наличии предваряющей искры слаботокового разряда. В вакуумном промежутке в облаке разреженной плазмы наблюдалось развитие электронной неустойчивости, прохождение катодного электронного пучка и пучка аномальных ионов с последующим всплеском тока на начальной стадии дугового разряда, что соответствует модели аномального ускорения ионов межэлектродной плазмы на искровой стадии вакуумного разряда.

A change in current flow conditions and increase of breakdown duration on dielectric surface in vacuum in presence of a longitudinal magnetic field was discovered. Deceleration of breakdown in presence of low-current discharge preceding the spark was observed. In the vacuum gap in the rarefied plasma cloud, the development of electron instability was observed, along with the passage of the cathode electron beam and the abnormal ion beam, followed by a current surge at the initial stage of arc discharge, which corresponds to the pattern of abnormal acceleration of the interelectrode plasma ions on the spark stage of vacuum discharge.

Уменьшение амплитуды и затягивание длительности импульса тока поджига связано с тем, что слаботоковый разряд по поверхности диэлектрика, предшествующий искре, разогревая поверхность, вызывает выброс в окружающее пространство сгустка молекул газа и продуктов эрозии диэлектрика, экранирующего область формирования катодного пятна от вакуумного промежутка катод-анод. В случае присутствия замороженной в магнитное поле электронной компоненты плазмы у поверхности диэлектрика происходит раскачка альфвеновских волн в плазме. При значительной толщине диэлектрика падает амплитуда тока по поверхности диэлектрика, замедляются процессы ионизации газообразных продуктов эрозии и роста проводимости канала тока, затягивается передний фронт импульса напряжения пробоя. При изучении с наносекундным временным разрешением вольт-амперных характеристик процесса коммутации высоковольтного вакуумного промежутка плазмой искрового разряда по поверхности диэлектрика обнаружены свидетельства эффективной ионизации остаточного газа излучением катодного пятна, сформированного во вспомогательном разряде.

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА

COMBINED METHOD OF STABILIZATION OF THE GLOW DISCHARGE IN GAS FLOW

Асадуллин Т.Я., Галеев И.Г.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
gpd_kstu@rambler.ru

Для многих практических приложений тлеющего разряда необходимо повышать его мощность и давление газа. При этом, как правило, неизбежно возникают неустойчивости, нарушающие нормальный режим горения. В этом докладе рассматривается совместное применение двух способов стабилизации тлеющего разряда в потоке газа.

Many applications of the glow discharge need the discharge power and gas pressure grow up. As usual this cause the appearance of discharge instabilities which violate the normal glow mode. Here the combination of two methods of stabilization of the glow discharge with gas flow is considered.

Для достижения стабильных значений электрических и тепловых характеристик тлеющего разряда [1-3] эффективно применяются методики воздействия на катодную область тлеющего разряда. Это связано с тем, что переход разряда в контрагированное состояние сопровождается сжатием катодного пятна.

Для предупреждения сжатия катодного пятна разряда применялась организация специальной формы поверхностей секционированных катодных секций [4], стимулирующая распределение катодного пятна по большей эффективной поверхности. При этом достигалась большая эффективность охлаждения катодных секций занятых разрядом. Также применялось динамическое управление потенциалами катодных секций [5].

Совместное применение этих методик позволяет повысить эффективность борьбы с развитием неустойчивостей тлеющего разряда в поперечном потоке газа. Применение комбинированной методики позволяет достичь более высоких значений тока разряда без развития неустойчивостей, приводящих к переходу разряда в контрагированное состояние. В первую очередь это относится к развитию неустойчивостей из-за ионизационно-перегревной неустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.G. Galeev, I.A. Tikhomirov, T.Ya. Asadullin. 1995, Rus. Phys. J. **38**, Is.10, 1036-39.
2. I.G. Galeev, B.A. Timerkaev. 1986, J. of Eng. Phys. **51**, 1112-16.
3. T.Ya. Asadullin, I.G. Galeev, B.A. Timerkayev. Journal of Physics: Conference Series (2016) **669** 012001.
4. I.G. Galeev, T.Ya. Asadullin. IOP Journal of Physics: Conference Series (2016) **669** 012015.
5. I.G. Galeev, T.Ya. Asadullin.. IOP Journal of Physics: Conference Series (2017) **789** 012012.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ЖИДКОСТИ

EFFECT OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON ELECTRICAL DISCHARGE IN LIQUID

М.Ф. Ахатов¹, Р.Р. Каюмов¹, Гайсин Ф.М¹.

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

E-mail: ahatov.81@yandex.ru

Аннотация: В данной работе был экспериментально исследован электрический разряд между струйным электролитическим катодом и твёрдым анодом для различного состава электролита.

Abstract: In this paper, an electric discharge between an electrolytic cathode and a solid anode for a different composition of an electrolyte was experimentally investigated.

Существует большое количество разновидностей электролитов, которые отличаются друг от друга своими химическими составами, а значит и физическими и химическими свойствами. Также от состава электролита будут зависеть и результаты исследования, проводящиеся в электролитных разрядах, а именно условия зажигания разряда, формы электрического разряда, вольт-амперные характеристики разряда.

В данной работе приведены результаты ВАХ разряда между струйным электролитическим катодом и твёрдым анодом для различного состава электролита.

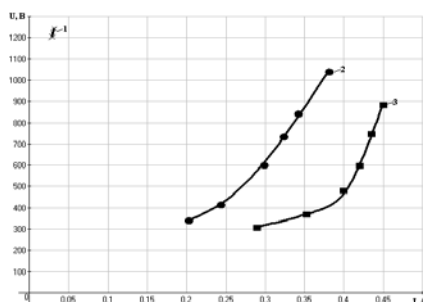


Рис.1. ВАХ разряда в струйном электролитическом катоде.

Анализ ВАХ разряда между струйным электролитическим катодом и твёрдым анодом для растворов NaCl, KCl и CuSO₄ в технической воде на рис. 1 показал, что в случае насыщенного раствора CuSO₄ (кривая 1) разряд горит при малых токах $I = 0,03$ А и больших напряжениях $U > 1200$ В форме кольца вблизи металлического анода. В случае использования насыщенного раствора NaCl (кривая 2) в технической воде приводит к тому, что в интервале $I = 250 \div 450$ мА величина U возрастает почти линейно. В случае использования в качестве струйного электролитического катода насыщенный раствор KCl в технической воде (кривая 3) величина U в интервале от 200 до 250 мА возрастает медленно, а в интервале $I = 250 \div 380$ мА напряжение разряда возрастает резко.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Трутнев Е.Н., и др. «Исследования горения электрического разряда между твердым электродом различной формы и электролитом» XXII ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. 2015.

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ПРОБОЙ ПРОМЕЖУТКОВ ЛЕЗВИЕ–ПЛОСКОСТЬ И ЛЕЗВИЕ–ЛЕЗВИЕ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ АЗОТА

SUBNANOSECOND BREAKDOWN OF BLADE-TO-PLANE AND BLADE-TO-BLADE GAPS AT ELEVATED NITROGEN PRESSURE

Белошотов Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

Аннотация. Экспериментально исследована динамика формирования плазмы при субнаносекундном пробое промежутков «лезвие–плоскость» и «лезвие–лезвие» одинаковой длины ($d = 13$ мм) при давлении азота 0,1–0,7 МПа. Произведён расчёт распределения напряжённости электрического поля для соответствующих промежутков без плазмы. На лезвийный электрод подавались импульсы напряжения ($U = 110$ кВ, $\tau_{0,5} = 2$ нс, $\tau_{0,1-0,9} = 0,5$ нс) от генератора РАДАН-220 отрицательной и положительной полярности. За один импульс регистрировались напряжение, ток разряда, временной ход интенсивности излучения плазмы разряда. Оптическая схема позволяла регистрировать излучение из различных участков вдоль промежутка с пространственным разрешением 1 мм. Получены следующие результаты. Заземлённые стенки разрядной камеры, окружающие заземлённое лезвие, служат причиной асимметрии в распределении напряжённости электрического поля в промежутке «лезвие–лезвие». В результате в обоих промежутках процессы ионизации всегда стартуют вблизи потенциального лезвия независимо от полярности; встреча волн ионизации в промежутке «лезвие–лезвие» наблюдается на расстоянии 1–3 мм от заземлённого лезвия в зависимости от давления и полярности; по характеру пробоя промежутков «лезвие–лезвие» подобен промежутку «лезвие–плоскость» (в условиях эксперимента).

Abstract. Dynamics of plasma formation at subnanosecond breakdown of blade-to-plane and blade-to-blade gaps of the same length ($d = 13$ mm) at a nitrogen pressure of 0.1–0.7 MPa was investigated experimentally. Electric field distribution for the gaps without a plasma was calculated. Voltage pulses ($U = 110$ kV, FWHM is 2 ns, rise time is 0.5 ns) of both polarities produced by RADAN-220 were applied to the potential blade. Three parameters were registered per pulse: a voltage, a discharge current, a time dependence of the radiation intensity. Optical registration system allowed to register a discharge plasma radiation from different zones along a gap with a space resolution of 1 mm. The following results were obtained. The grounded walls of the discharge chamber are the cause of the asymmetry of the electric field distribution in the blade-to-blade gap. As the result, ionization processes always begin near the potential blade irrespective of the polarity; in the blade-to-blade gap collision of ionization waves was observed at a distance of 1–3 mm from the grounded blade depending on the polarity and pressure; breakdown character of the blade-to-blade gap is similar to the one of the blade-to-plane gap.

**ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ICCD КАМЕРЫ СВЕЧЕНИЯ
ПЛАЗМЫ В ПРЕДПРОБОЙНОЙ СТАДИИ НАНОСЕКУНДНОГО
РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ, АРГОНЕ И АЗОТЕ ПРИ ОБЕИХ
ПОЛЯРНОСТЯХ**

**ICCD IMAGING OF A PLASMA GLOW DURING A PREBREAKDOWN
STAGE OF NANOSECOND DISCHARGES IN AIR, ARGON, AND
NITROGEN AT BOTH POLARITIES**

Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, г. Томск,
пр. Академический, 2/3.

E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

Аннотация. Посредством четырёх канальной ICCD камеры hsfс pro 12 bit исследовалась динамика свечения плазмы в предпробойной стадии наносекундного разряда в промежутке «остриё–плоскость» длиной $d = 3$ мм. Промежуток заполнялся воздухом, аргоном и азотом. Давление газов менялось в диапазоне от 12,5 до 400 кПа. На промежуток подавались импульсы напряжения отрицательной ($U = 25$ кВ, $\tau_{0,5} = 10$ нс, $\tau_{0,1-0,9} = 0,7$ нс) и положительной полярностей ($U = 25$ кВ, $\tau_{0,5} = 15$ нс, $\tau_{0,1-0,9} = 3$ нс). Получены изображения свечения плазмы в различные моменты времени, на которых видно, что при давлении газов до 100 кПа поперечные размеры плазменного образования (стримера) h сопоставимы с длиной промежутка d . При увеличении давления до 400 кПа h убывает. При давлении 400 кПа в некоторых импульсах наблюдается формирование нескольких стимеров с малым h . Обнаружено, что при отрицательной полярности импульсов напряжения свечение появляется на некотором (~ 100 – 200 мкм) расстоянии от поверхности острейного катода. Вероятно, это связано с тем, что лавине требуется пройти некоторое расстояние до того, как в ней образуется пороговое число возбуждённых частиц, излучение которых будет способна зарегистрировать ICCD камера.

Abstract. Dynamics of a plasma glow during a prebreakdown stage of a nanosecond discharge in «point-to-plane» gap with length of $d = 3$ mm was investigated by four-channel ICCD camera hsfс pro 12 bit. The gap was filled with air, argon, nitrogen. Pressure was ranged from 12,5 to 400 kPa. Voltage pulses of negative ($U = 25$ kV, $\tau_{0,5} = 10$ ns, $\tau_{0,1-0,9} = 0,7$ ns) and positive ($U = 25$ kV, $\tau_{0,5} = 15$ ns, $\tau_{0,1-0,9} = 3$ ns) polarities were applied across the gap. Images of the plasma glow were obtained for different instants of time. Lateral dimensions of a plasma formation (streamer) h are comparable with the gap length d at pressure up to 100 kPa. Further pressure increase leads to h decreases. Formation of several streamers with a small h are observed at pressure of 400 kPa. It was found that at the negative polarity the plasma glow appears at a certain distance (~ 100 – 200 μ m) from the pointed electrode. Likely, electron avalanche is required to pass a certain distance before it generates a certain threshold number of excited particles, the radiation of which will be able to register by the ICCD camera.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОГО ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

EXPERIMENTAL-THEORETICAL MODEL OF JET RF INDUCTION DISCHARGE OF ATMOSPHERIC PRESSURE

Гайнуллин Р.Н., Кирпичников А.П.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015, г. Казань, К. Маркса, 68, e-mail: gainullin@kstu.ru*

В работе рассмотрена экспериментально-теоретическая модель, позволяющая определять закономерности структуры квазистационарного электромагнитного поля ВЧИ разряда, горящего в индукторе конечных размеров при атмосферном давлении.

Высокая энергетика плазменных процессов даёт возможность проводить реакции, неосуществимые при обычных условиях с использованием рядовых технологий. Для управления такого рода процессами необходимо располагать достоверной информацией об основных параметрах в зоне разряда.

В работе предложен комплексный метод контактной диагностики электромагнитных и тепловых параметров плазмы высокочастотного индукционного разряда атмосферного давления, позволяющий восстановить все основные электромагнитные и тепловые характеристики разряда по конечному числу экспериментально измеренных значений амплитуды продольной компоненты магнитного поля в разряде [1].

Сочетание расчётного и экспериментального методов исследования позволяет более глубоко изучить внутреннюю структуру и свойства ВЧ индукционного разряда атмосферного давления, исследовать влияние величины расхода плазмообразующего газа на распределение его основных электромагнитных и тепловых характеристик. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и оптимизации различного рода энергетических установок, использующих принцип высокочастотного индукционного нагрева газа [2,3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайнуллин Р.Н. *Контактная диагностика струйного высокочастотного индукционного разряда атмосферного давления*. Казань: Изд-во Казанск. гос. технол. ун-та, 2009, 220 с.
2. Гайнуллин Р.Н., Кирпичников А.П. *Известия Вузов. Проблемы энергетики*. **1** (2008) 54.
3. Гайнуллин Р.Н., Кирпичников А.П. *Прикладная физика*. **5** (2008) 44.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ПОТОКОМ ГАЗА

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF VOLTAGE PULSATIONS IN A GLOW DISCHARGE WITH A GAS FLOW

Гарипов М.М., Юнусов Р.Ф.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.

А.Н.Туполева, Российская Федерация, 420111, ул.К.Маркса, 10, E-mail:

optanir@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена экспериментальному изучению пульсаций напряжения в тлеющем разряде. Продольный разряд зажигался в потоке воздуха, движущегося в цилиндрической разрядной камере (РК). Медные полые электроды располагались на расстоянии 4 см друг от друга вдоль оси РК. Контролировались давление газа $P = (4,7 - 26)$ кПа и его расход $G = (0 - 0,012)$ г/с. Сила тока разряда и напряжение изменялись соответственно в диапазонах: $I = (20-100)$ мА, $U = (1, 5 - 4,2)$ кВ. Наблюдались падающие вольтамперные характеристики. Колебания напряжения разряда регистрировались осциллографом, ВАХ разряда снималась двухкоординатным самописцем. Выявлены три участка ВАХ: в диапазоне токов $I = (100-70)$ мА наблюдался светящийся положительный столб (ПС) разряда вплоть до катода с медленным возрастанием напряжения; в диапазоне токов $I = (70-40)$ мА происходит плавный переход к разряду без видимого свечения ПС со значительным увеличением напряжения разряда. При дальнейшем уменьшении силы тока (третий участок) разряд существует почти при постоянном напряжении вплоть до его гашения. На границе второго и третьего участка ВАХ наблюдались низкочастотные и высокочастотные колебания напряжения разряда.

Abstract: The article is devoted to the experimental study of voltage pulsations in a glow discharge. The longitudinal discharge was ignited in a stream of air moving in a cylindrical discharge chamber (DC). Copper hollow electrodes were located at a distance of 4 cm from each other along the axis of the DC. The gas pressure $P = (4.7 - 26)$ kPa and its flow rate $G = (0-0.012)$ g / s were monitored. The discharge current and voltage varied accordingly in the ranges: $I = (20-100)$ mA, $U = (1, 5 - 4,2)$ kV. Falling current -voltage characteristics were observed. The oscillations of the discharge voltage were registered by an oscilloscope; the current-voltage characteristic of the discharge was recorded by a two-coordinate recorder. Three sections of the current-voltage characteristic were detected: in the current range $I = (100-70)$ mA, a luminous positive column (PC) of the discharge was observed up to the cathode with a slow increase in voltage; In the current range $I = (70-40)$ mA there is a smooth transition to the discharge without visible glow of the PC with a significant increase in the discharge voltage. With further reduction of the current intensity (the third section), the discharge exists almost at a constant voltage until its quenching. At the boundary of the second and third sections of the current-voltage characteristic, low-frequency and high-frequency oscillations of the discharge voltage were observed.

Продольный тлеющий разряд находит широкое применение [1] в науке и технологии получения нетрадиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

Yunusov R.F. Heat transfer in a longitudinal glow discharge // *Journal of Physics: Conf. Series* **789** (2017) 012069 doi:10.1088/1742-6596/789/1/012069

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN A GLOW DISCHARGE

Гарипов М.М., Юнусов Р.Ф.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.

А.Н.Туполева, Российская Федерация, 420111, ул.К.Маркса, 10, E-mail:

optanir@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена экспериментальному изучению теплообмена в тлеющем разряде. Продольный разряд зажигался в потоке воздуха, движущегося в цилиндрической разрядной камере (РК). Медные электроды располагались на расстоянии 9 см друг от друга перпендикулярно к оси РК. Контролировались давление газа $P = (2 - 9)$ кПа и его расход $G = (0 - 0,035)$ г/с. Сила тока разряда и напряжение изменялись соответственно в диапазонах: $I = (30-80)$ мА, $U = (1-2)$ кВ. Наблюдались падающие вольтамперные характеристики. Температура нейтральных частиц измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар, расположенных вдоль РК в трех сечениях. Расположение термопар позволяло измерить распределения температуры как вдоль РК, так и поперек нее. Форма разряда контролировалась фотографически и визуалью. Выявлено, что при расходе воздуха $G = 0,017$ г/с разряд теряет осевую симметрию и стягивается к стенке РК. При этом также существенно изменяется температурное поле нейтральных частиц.

Abstract: The article is devoted to the experimental study of heat transfer in a glow discharge. The longitudinal discharge was ignited in a stream of air moving in a cylindrical discharge chamber (DC). Copper electrodes were located at a distance of 9 cm from each other perpendicular to the axis of the DC. The gas pressure $P = (2 - 9)$ kPa and its flow rate $G = (0 - 0.035)$ g / s were monitored. The discharge current and voltage varied accordingly in the ranges: $I = (30-80)$ mA, $U = (1-2)$ kV. Falling current-voltage characteristics were observed. The temperature of the neutral particles was measured using chromel-alumel thermocouples located along the DC in three sections. The location of the thermocouples made it possible to measure the temperature distribution both along the DC and across it. The discharge shape was monitored photographically and visually. It was found that with an air flow rate $G = 0.017$ g / s, the discharge loses its axial symmetry and contracts to the wall of the DC. The temperature field of neutral particles also changes significantly.

Одна из возможных моделей тлеющего разряда в потоке газа представлена в работе [1], где получены распределения концентрации электронов, напряженности и температуры нейтральных частиц. Некоторые экспериментальные результаты по проверке указанной модели представлены в работе [2]. В данной статье показано, что результаты теоретических и экспериментальных исследований согласуются в диффузной области разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юнусов Р.Ф. Модель плазмы тлеющего разряда в потоке газа // *Современные научные исследования и инновации*. 2017. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/03/79866> (дата обращения 05.04.2017).
2. Yunusov R.F. Heat transfer in a longitudinal glow discharge // *Journal of Physics: Conf. Series* **789** (2017) 012069 doi:10.1088/1742-6596/789/1/012069

МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМОВ ПРОВОДИМОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ, ПЛОТНОСТИ ТОКА И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В ВЧИ-РАЗРЯДЕ

SITE OF MAXIMA OF CONDUCTIVITY, TEMPERATURES, DENSITY OF THE CURRENT AND SPECIFIC CAPACITY OF THE THERMAL EMISSION IN THE RF-DISCHARGE

А. В. Герасимов, А. П. Кирпичников, Ф. Р. Сабирова

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015 г. Казань, ул. К. Маркса 68 E-mail: faridasabirova@mail.ru*

Теоретически обоснованы экспериментальные факты, показывающие, что внутри высокочастотного индукционного для каждого из его поперечных сечений выполнено неравенство $r_1 < r_2 < r_3$, в котором $r_1 = r(\sigma_{\max})$, $r_2 = r(j_{\phi \max})$ и $r_3 = r(W_{\max})$ - радиальные координаты, соответствующие максимумам стоящих в скобках физических величин.

The experimental facts that inside high-frequency induction for each of his cross sections the inequality $r_1 < r_2 < r_3$ in which $r_1 = r(\sigma_{\max})$ is executed $r_2 = r(j_{\phi \max})$ and $r_3 = r(W_{\max})$ - the radial coordinates corresponding to maxima of physical sizes worth in brackets are theoretically proved.

Аналитически объяснены полученные авторами [1-2] экспериментальные данные, показывающие, что внутри ВЧИ-разряда радиальные координаты, соответствующие максимумам величин проводимости, плотности вихревого тока и вкладываемой в разряд мощности располагаются в порядке возрастания.

Определен закон сгущения точек r_i , соответствующих точкам максимумов величин σE_{ϕ}^{i-1} ($i=1, 2, 3$) на оси r по направлению к периферии плазмоида.

Показано, что наилучшее совпадение эмпирических данных с расчетными наблюдается для первых четырех внутренних сечений разряда вниз по потоку, что можно объяснить более точной аппроксимацией амплитуды азимутального электрического поля для этой области плазменного сгустка.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Кирпичников *ТВТ*. **346** (1996) 989.
2. А. В. Герасимов *Известия Вузов. Физика*. **7** (2004) 65.

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ И ДЛИНЫ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА НА УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ КРИВЫХ ПАШЕНА В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

INFLUENCE OF ELECTRODE MATERIAL AND THE LENGTH OF THE INTERELECTROD GAP ON THE PASCHEN CURVES UNIVERSALITY IN NOBLE GASES

С.Ф.Адамс¹, В.И.Демидов¹, А.А.Кудрявцев^{1,2}, И.П.Курляндская^{1,2},
Дж.А.Майлс¹, Б.А.Толсон¹

¹*Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia, akud53@mail.ru*

²*Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

Показано, что материал анода, так же как и материал катода и величина межэлектродного промежутка, сильно влияют на вид кривых Пашена, Это влияние связано как с зависимостью отражения электронов от поверхности анода, а также с процессами на катоде и в межэлектродном промежутке.

It is shown that the anode material is strongly affecting the appearance of the Paschen curves. This influence is connected to the influence of the electron reflection from the anode surface on the anode material as well as processes on the cathode and in interelectron gap.

Проведены измерения кривых Пашена для различных материалов анода, Использовались аноды, изготовленные из алюминия, нержавеющей стали, графита, алюминия покрытого платиной и золотом, а так же меди. При этом материалом катода всегда служила медь. Было обнаружено, что для разных материалов анода кривые Пашена отличаются друг от друга. Наибольшее отличие от других материалов было найдено для анода, изготовленного из графита. Это отличие, по-видимому, связано с большим коэффициентом поглощения электронов графитом из-за наличия пор на его поверхности. Изменение материала катода и межэлектродного расстояния так же оказывает существенное влияние на кривые Пашена. В докладе обсуждаются причины этого влияния.

DUST PARTICLE CHARGE DETERMINATION IN CONSIDERATION OF NON-LOCAL EFFECTS IN A STRATIFIED GLOW DISCHARGE

Kartasheva A. A., Golubovskii Yu. B., Karasev V. Yu.

*Saint Petersburg University, Russia, 198504, Saint Petersburg, 3 Ulyanovskaya str
alexkartasheva@gmail.com

A new theoretical method of dust particle charge determination is provided. This method is based on the calculation of the ion and electron fluxes on the dust particle surface in a spatially periodic strata field. The electron flux is calculated through the non-local electron distribution function (EDF), which is formed by inhomogeneous strata potential. The comparison between proposed theoretical method and the traditional method of using Maxwell EDF for dust particle charge calculation is done.

Dust particle charging in a low-pressure glow discharge was investigated theoretically. The numerical calculation is based on the equality of ion and electron fluxes on the dust particle surface. The theory of the motion of electrons and ions in stratified glow discharge in a vertical cylindrical discharge tube is considered.

The electron flux is derived by integrating over distribution function of electrons, which were passed through the absorption cross-section. The calculation were performed with the help of non-local electron distribution function (EDF), which is not formed by the local field, but the whole potential profile of the striation. The computations were made in the steady electric field, which is correlated with the field profile, experimentally obtained under the conditions of the P-striations formed in the discharge tube with a radius $R=1$ sm, at low pressure $p=0.2$ torr of neon. In this case the coefficients of the kinetic equation can be averaged over the radial transits due to the feasibility of the diffusion approximation [1]. EDF is compressed into narrow peaks, which move along the resonance trajectories.

The usual way to calculate the dust particle charge is to use Maxwell distribution function. The electron flux on the dust particle surface was calculated for two types of EDF. The essential differences between two fluxes, related with the absolute values, the modulation depth and the phase are shown. So, the dust particle charge, obtained using the equality of electron and ion fluxes, also depends on the type of EDF. It is shown that the potential and the charge number of dust particles calculated for two types of EDF are not equal.

REFERENCES

1. Golubovskii, Y.B., Rabadanov, K.M. & Nekuchaev, V.O. Russ. J. Phys. Chem. B (2017) 11: 106

РАЗВИТИЕ ГАЗОВЫХ ПОЛОСТЕЙ И РАЗРЯДОВ В НИХ ПРИ НАПРЯЖЕНИЯХ ВЫШЕ ПОРОГОВОГО

GAS CAVITIES AND DISCHARGE INSIDE CAVITIES EVOLUTION AT VOLTAGE ABOVE CRITICAL VALUE

Касьянов В. С.^{1,2}, Королев Ю. Д.^{1,2}, Шемякин И. А.^{1,2}, Гейман В. Г.^{1,2}, Болотов А. В.^{1,2}, В. О. Франц О. Б.^{1,2}

¹*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, 63455, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, 63455, Russia,
kasianov_vs@bk.ru*

Изучается пробой в растворе соли в воде. Используются импульсы напряжения выше 1000 В микро и миллисекундной длительности. Исследуются процессы формирования и развития газовых полостей, а так же возникновения плазмы в них. Показано сильное влияние данных процессов на величину и форму разрядного тока.

The breakdown in a solution of salt in water is studied. The pulses voltage above 1000 V of the micro and millisecond duration was applied. The processes of formation and development of gas cavities, as well as the occurrence of plasma in them, were studied. A strong effect of these processes on the magnitude and shape of the discharge current was shown.

В настоящее время разряды в электролитах находят широкое применение в медицине, биологии эхолокации и т. д. [1, 2]. В данной работе рассматриваются процессы, протекающие в трехпроцентном растворе NaCl в воде в геометрии электродов штырь - плоскость. Длительность импульса, прикладываемого к промежутку, лежит в микро и миллисекундном интервале, а амплитуда напряжения превышает пороговое (напряжение при котором в растворе возникает плазма) [3]. Приводится набор данных о процессе формирования, развития и деградации газовых полостей при различных полярностях приложенного импульса напряжения и различных концентрациях соли в растворе. Анализируется физический механизм эволюции полостей. Представлены данные (фотографии CCD камеры, поведения свечения промежутка во времени, спектральные измерения) о процессе формирования газоразрядной плазмы в полостях. Обсуждается вопрос о формах горения разряда. Сделан вывод, что эволюция полостей и плазмы в них оказывает существенное влияние на протекание тока.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-08-00652а.

ЛИТЕРАТУРА

1. L Schaper., W. G., Graham K.R. Stalder. *Plasma Sources Sci. Technology*. **20** (2011) Article Number 034003.
- 2 P. Bruggeman., C Leys. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (2009) N. 5 Article Number 053001.
3. Y.D Korolev, I.A. Shemyakin, R.V. Ivashov, V.S. Kasyanov, N.V. Landl., Y.H. Sun, T Shao., Y Gao. *Journal of Physics: Conference Series*. **552**. (2014) Article Number 012005.

ИССЛЕДОВАНИЯ РОСТА ПАРОВОЗДУШНОЙ ОБОЛОЧКИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ РАСТВОРА ГИДРОКСИДА НАТРИЯ

INVESTIGATIONS OF THE GROWTH OF THE STEAM-AIR SHELL OF A GAS DISCHARGE WITH A LIQUID ELECTROLYTIC CATHODE OF SODIUM HYDROXIDE SOLUTION

Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н.

Инженерный Институт, Казанский Федеральный Университет, Казань,
ул.Кремлевская, 18, 420008 E-mail: kashlenar@gmail.com

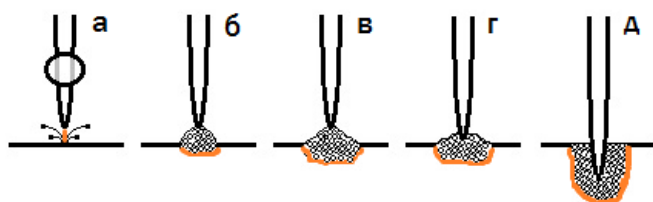
В работе описываются особенности аномального роста паровоздушной оболочки газового разряда с жидким электролитическим катодом.

The paper describes the features of the anomalous growth of the steam-air shell of a gas discharge with a liquid electrolytic cathode.

Газовые разряды с жидкими электродами широко применяются. Так при катодном процессе возможно проведение очистки, полировки и упрочнения поверхностей, анодном процессе - формирование микрорельефа поверхности с заданными параметрами.

При горении разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом образуется паровоздушная оболочка толщиной 2-3 мм. Интерес представляет исследование механизма образования паровоздушной оболочки в условиях отличных от стандартного теплового механизма, когда наблюдается пленочное кипение. Целью работы являлось изучение механизма возникновения паровоздушной оболочки вокруг металлического анода в растворе гидроксида натрия.

В экспериментах использовались медный анод и катод площадью 0,65 см² и 34 см² соответственно. Инициирование разряда проводилось с помощью источника постоянного напряжения от 20 до 300 В.



Были определены условия аномального роста паровоздушной оболочки. Разряд инициировался в момент контакта металлического анода с поверхностью электролита.

а – разбрызгивание и образование капли электролита. б – стекание капли к кончику электрода и горение разряда на границе электролит/паровоздушная оболочка. в, г, д – рост паровоздушной оболочки.

Уставлено, что для плазменно-электролитного процесса в растворах NaOH при сглаженном напряжении, полученного после двухполупериодного выпрямления и с использованием емкостного фильтра 450 мкФ, наблюдается образование паровоздушной оболочки: для 1% раствор при 97 В, 3% раствор – 93 В, 5% раствор – 81 В. «Пузырьковая» оболочка постепенно растет и заполняет все пространство между металлическими электродами. При этом решающим фактором является величина прикладываемого напряжения.

РОЛЬ АМБИПОЛЯРНОГО ПОЛЯ В ФОРМИРОВАНИИ ФРЭ И КРИТЕРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

THE ROLE OF THE AMBIPOLAR FIELD IN FORMING THE EDF AND THE CRITERIA FOR USING THE LOCAL APPROXIMATION

Е.А. Богданов¹, А.А. Кудрявцев^{1,2}, К. М. Рабаданов¹

¹*Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia, akud53@mail.ru*

²*Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

Показано что локальное приближение (ЛП) для определения ФРЭ и других характеристик электронного газа на периферии плазмы, где амбиполярное поле является доминирующим, неприменимо.

It is shown that the local approximation for determining the EDF and other characteristics of the electron gas at the periphery of the plasma, where the ambipolar field is dominant, is not applicable.

Для вычисления ФРЭ обычно используется локальное приближение (ЛП), когда в кинетическом уравнении Больцмана для изотропной части ФРЭ f_0 пренебрегается пространственной диффузией по сравнению с изменением энергии электронов в поле и за счет столкновений с атомами и молекулами газа

$$-\frac{1}{\sqrt{w}} \frac{\partial}{\partial w} \left(\sqrt{w} (eE)^2 D \frac{\partial f_0}{\partial w} \right) = St(f_0) + St^*(f_0) \quad (1)$$

где E – электрическое поле в данной точке, $D = \nu\lambda / 3$ - коэффициент диффузии электрона, $St(f_0)$ и $St^*(f_0)$ - интегралы упругих и неупругих столкновений.

При анализе условий применимости ЛП для расчета ФРЭ наиболее дискуссионным является вопрос об электрическом поле, которое явным образом входит как в исходное, так и в локальное кинетическое уравнение (1). Поскольку электрон реагирует на то полное поле, которое есть в данной точке пространства, то в исходное кинетическое уравнение, а, следовательно, и в (1), входит полное электрическое поле. В частности, это так и есть при численных симуляциях различными вычислительными кодами, когда поле находится из решения уравнения Пуассона. В противоположность этому, в [1] отмечалось, что поскольку амбиполярное поле также определяется пространственными градиентами, то при использовании ЛП для ФРЭ его также следует пренебречь в (1) (каким-то образом вычесть из полного поля).

В данной работе продолжены исследования [2]. Показано, что ЛП для определения ФРЭ и других характеристик электронного газа на периферии плазмы, где амбиполярное поле является доминирующим, неприменимо. При этом, в зависимости от энергетической зависимости сечений упругого рассеяния электронов (растущие или падающие), возникают ошибки как при пренебрежении в локальном кинетическом уравнении (1) амбиполярным полем, так и при использовании там полного поля. Поэтому достоверные результаты можно получить лишь при решении полного кинетического уравнения (в переменных энергии и координат).

ЛИТЕРАТУРА

1. U. Kortshagen, C. Busch, L. D. Tsengin. *Plasma Source Sci. Techn.* **5** (1996) 1.
2. K. D. Kapustin, A. A. Kudryavtsev, M.V. Krasilnikov. *Phys. Plasmas.* **21** (2014) 120701.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

A KINETIC MODEL OF ION-MOLECULAR PROCESSES IN HUMID AIR

Куркин С.А., Дербенев И.Н., Дятко Н.А., Филиппов А.В.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской
федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований», Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12,
fav@triniti.ru*

Создана кинетическая модель ионно-молекулярных процессов во влажном воздухе, ионизируемом внешним источником ионизации. Модель включает более 600 ионно-молекулярных процессов с участием электронов, 14 отрицательных и 39 положительных ионов. Тестирование модели проведено путем сравнения решения 54 нестационарных уравнений баланса заряженных частиц плазмы, возбуждаемой пучком быстрых электронов, и имеющихся в литературе экспериментальных данных.

A kinetic model of ion-molecular processes has been developed for a humid air plasma produced by *e*-beam. The model includes over 600 reactions with electrons, 39 positive and 14 negative ion species. The model has been tested by comparing the solution of 54 non-steady state equations for number densities of charged particles in the humid air *e*-beam plasma with the available experimental data.

В настоящее время активный интерес к исследованиям ионно-молекулярных процессов во влажном воздухе связан их важной ролью в физике атмосферы, особенно, для явлений в верхних слоях атмосферы, в системах очистки и кондиционирования воздуха, в медицинских приложениях плазмы, их влиянием на климат, на нуклеацию и рост аэрозольных частиц и т.д. Плазма, создаваемая пучком быстрых электронов, широко используется для удаления вредных соединений из воздуха. Несмотря на многочисленность работ по плазмохимии влажного воздуха, большинство из которых посвящены изучению процессов в верхних слоях атмосферы и в разрядах при достаточно низких давлениях, сегодня наблюдается недостаток данных по ионно-молекулярным процессам во влажном воздухе при атмосферном давлении. Настоящая работа посвящена созданию кинетической модели ионно-молекулярных процессов с участием заряженных частиц плазмы во влажном воздухе при его ионизации пучком быстрых электронов.

В кинетическую модель включено более 600 процессов ионизации молекул азота, кислорода и воды пучком быстрых электронов, прилипания и рекомбинации ионов, двух и трехтельных ион-ионной рекомбинации и конверсии ионов для 54 заряженных компонент плазмы. Модель учитывает ионы $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ и $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ с *n* от 1 до 12. Система нестационарных уравнений баланса для концентраций заряженных частиц плазмы решалась численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности, а система стационарных уравнений баланса – методом итераций с целью определения состава плазмы во влажном воздухе. Исследования проведены для скоростей ионизации газа от 10 до 10^{18} см³с⁻¹ и доле молекул воды в воздухе от 0 до 2%.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 16-12-10424.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ СВЧ РАЗРЯДА В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ

RESEARCH OF PRODUCTS OF MICROWAVE DISCHARGE IN LIQUID HYDROCARBONS

Лебедев Ю.А., Аверин К.А., Иванов А.О., Борисов Р. С., Гарифуллин А.Р.

Lebedev Yu.A., Averin K.A., Ivanov A.O., Borisov R.S., Garifullin A.R.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 29

lebedev@ips.ac.ru

Представлены результаты исследования твердофазных продуктов СВЧ разряда в широком наборе жидких углеводородах (метод ЯМР ^{13}C) и жидких углеводородов после создания в них СВЧ разряда (метод ГХ-МС).

The results of the study of solid state products of microwave discharge in wide spectra of liquid hydrocarbons (^{13}C -NMR method) are described as well as results of study liquid hydrocarbons after creating therein the microwave discharge (GC-MS method).

Работа продолжает цикл исследований СВЧ разрядов в жидких углеводородах [1-4]. Представлены результаты изучения твердо- и жидкофазных продуктов плазмохимических реакций в СВЧ-разряде в жидких углеводородах класса алканов, алкенов, циклоалканов, ароматических соединений. Используемая установка описана в [1].

Твердофазные продукты исследовались методом ЯМР ^{13}C на приборе марки Varian Unity AS 500. Анализ показал, что часть образцов содержит алифатическую фазу (пики в интервале 13-31 м.д.), что свидетельствует о неполном переходе жидкого углеводорода в твердые углеродные частицы. Другая часть образцов содержит один пологий пик в интервале 110-142 м.д., что свидетельствует о полном превращении жидкого исходного вещества в твердый сажевый продукт. При обработке в СВЧ плазме вязких углеводородов (масла, тяжелые продукты нефтепереработки) на конце антенны образуется объемная углеродсодержащая структура [1,4].

Жидкофазные продукты исследовались методом газовой хроматографии с масс-спектрометром на приборе Thermo DSQ II. Анализ состава *n*-гептана до и после обработки СВЧ плазмой показал, что изменений в составе углеводорода не наблюдается. При концентрировании пробы путем выпаривания обработанного углеводорода удается обнаружить ряд ароматических веществ [3,4].

ЛИТЕРАТУРА

1. К.А. Аверин, Ю. А. Лебедев, В. А. Шахатов. *Прикладная физика*, **2** (2016) 41.
2. Ю. А. Лебедев, В. С. Константинов, М. Ю. Яблоков, А. Н. Щеголихин, Н. М. Сурин, *Химия высоких энергий*, 2014, **48** (2014) 496.
3. Yu. A. Lebedev, I. L. Epstein, V. A. Shakhmatov, E. V. Yusupova, and V. S. Konstantinov, *High Temperature*, **52** (2014) 319.
4. Konstantin A. Averin, Yuri A. Lebedev, Alexander N. Shchegolikhin, Michael Yu. Yablokov. *Plasma processes and polymers*, 2017. DOI 10.1002/ppap.20160022

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СТРИМЕРА ПО ПУЗЫРЮ, ПЛАВАЮЩЕМУ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

PROPAGATION OF A NEGATIVE STREAMER OVER A BUBBLE FLOATING ON A LIQUID SURFACE

Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Медведев М.А., Петряков А.В., Трушкин Н.И.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.

medvedev@triniti.ru

Аннотация. Излагаются результаты экспериментальных исследований взаимодействия отрицательного стримера с пузырьком, плавающим на поверхности жидкости с разной проводимостью.

Abstract. The report presents the results devoted to propagation of a negative streamer along the bubble floating on a liquid having a different conductivity.

Стримерные разряды часто используют для насыщения жидкостей активными частицами, способными инициировать или ускорить необходимые биохимические процессы. Эффективность плазменной активации зависит от площади соприкосновения стримеров с жидкостью. Один из путей увеличения этой площади состоит в использовании жидкости в виде пены, состоящей из множества пузырей. По этой причине выяснение взаимодействия пузыря жидкости со стримером представляет большой научный и практический интерес. В докладе представлены результаты исследования взаимодействия отрицательного стримера с плавающим пузырьком на водопроводной воде. Пример полученных в эксперименте результатов представлен на Рис.1. Развернутая информация будет изложена в полной версии доклада.

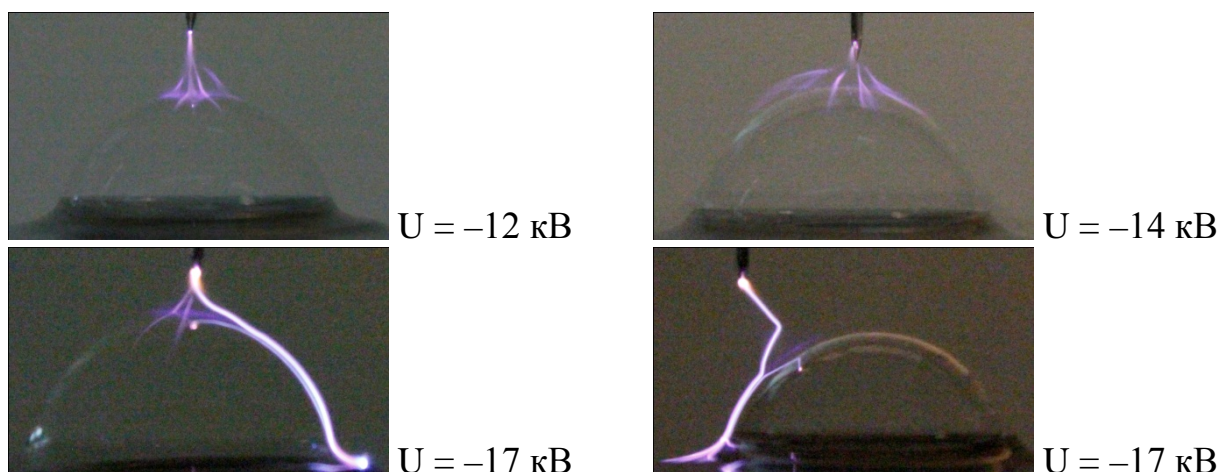


Рис. 1. Внешний вид отрицательных стримеров на пузырьке с диаметром основания 15 мм при различных напряжениях на острие. Водопроводная вода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-02-00613).

DYNAMICS OF NANOSECOND DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE DEVELOPMENT IN SYMMETRICAL AND ASYMMETRICAL DISCHARGE GAPS

Khomich V.Yu., Malashin M.V., Moshkunov S.I., Podguyko N.A., Shershunova E.A.
 Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences,
 St.-Petersburg, Russia, 191186, Dvortsovaya nab.,18
 E-mail: podguyko.nikolay@mail.ru

The difference of DBD ignition in symmetrical and asymmetrical discharge gap was studied. The numerical simulation of electric field near the bare grounded electrode is presented to explain it.

There are series of contributions on nanosecond atmospheric pressure air DBD in symmetrical discharge gap [1,2]. However, the dynamics of the discharge development in asymmetrical gaps has not been researched virtually. Therefore, a series of experiments were carried out in order to study it (fig.1). High-voltage rectangular pulses with nanosecond rise time were used as a power supply [3,4]. Various gap configurations were used: symmetrical and asymmetrical. Due to the presence of the segmented ground electrode, the spatial-temporal discharge generation was recorded [1,5]. According to the current waveforms, one can see an order of discharge ignition in every segment.

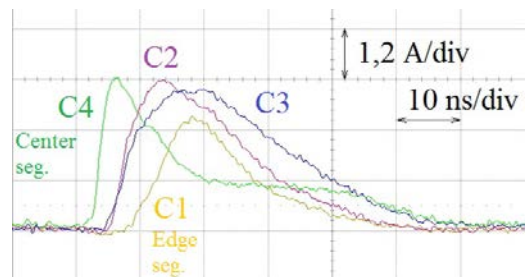


Figure 1. Current traces of the segmented electrode in 3 mm gap.

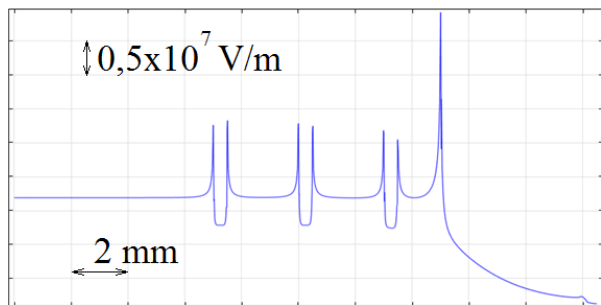


Figure 2. Electric field distribution near the segmented electrode.

Different discharge development appeared with the barrier on the ground electrode and without it. In the case of symmetric barrier discharge, the ignition started from the center of the electrode, but in the case of asymmetric one – from the edge. It can be explained by means of electrical field edge discontinuity and it is confirmed by numerical simulation (fig.2).

This research was granted by Russian

Foundation for Basic Research, grant N. 16-08-01037

1. Malashin M.V., Moshkunov S.I., Khomich V.Y., Shershunova E.A. *Plasma Physics Reports*. **43** (2017) 170.
2. Shao T., Zhang C., Yu Y., Fang Z., Yan P. *Europhys. Lett.* **97** (2012) 55005.
3. Shershunova E., Malashin M., Moshkunov S., Khomich V. *Abstract Book. 19th International Vacuum Congress*. (2013) 1242.
4. Malashin M.V., Moshkunov S.I., Khomich V.Y., Shershunova E.A. *Instruments and Experimental Techniques*. **59** (2016) 226.
5. Mangolini L., Orlov K., Kortshagen U., Heberlein J., Kogelschatz U. *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 1722.

КРУГОВОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

CIRCULAR MOTION OF THE NEUTRAL COMPONENT OF MAGNETRON DISCHARGE PLASMA

Паль А. Ф.^{1,2}, Рябинкин А. Н.^{1,2}, Серов А. О.^{1,2}, Филиппов А. В.¹

¹НИИЯФ МГУ, РФ, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Москва

²АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, РФ, 142190, ул. Пушкиновых, вл. 12, г. Москва, г.Троицк,
alex.ryabinkin@gmail.com

Экспериментально показано существование азимутального движения нейтральной компоненты плазмы магнетронного разряда постоянного тока. Для этого в разряд в аргоне вводилась небольшая добавка ксенона и изучалось её распространение вдоль плазменного кольца. Направление движения совпадало с направлением дрейфа электронов в скрещенных полях. Сравнение результатов эксперимента с результатами расчета для указанных условий дало оценку скорости около 2 м/с.

The existence of an azimuthal motion of the neutral plasma component of DC magnetron discharge is shown experimentally. For this purpose, a small addition of xenon was introduced into the discharge in argon and its propagation along the plasma ring was studied. The direction of motion coincided with the direction of the electron drift in the crossed fields. Comparison of the experimental results with the calculated ones for noted conditions gave an estimate of the velocity about 2 m/s

Целью данной работы являлось непосредственное наблюдение вращения нейтрального газа в плазме магнетронного разряда. Для этого в плазменное кольцо магнетронного разряда над плоским электродом импульсно вводилась примесь ксенона, и исследовалось её распространение в двух различных направлениях вдоль разрядного кольца. Распространение примеси регистрировалось по временному изменению интенсивности ее свечения в разных точках разряда. Разрядная область состояла из кольцевого медного катода диаметрами 180 и 220 мм, под которым располагалась магнитная система, состоявшая из двух коаксиальных рядов магнитов на кольцевом магнитопроводе. Вокруг катодного кольца находились заземлённые стенки высотой 4 см. В начале эксперимента в разрядной камере поддерживался разряд в аргоне при 300 В, 0.36 А и давлении 50 Па. Во внешней стенке находилось напускное отверстие, через которое внутрь разрядной камеры импульсно подавался ксенон (его парциальное давление после напуска составляло 0.5 % от давления в камере). Измерялась интенсивность свечения линии ксенона 462.4 нм в двух диаметрально противоположных точках разрядного кольца, находящихся на одинаковом расстоянии от напускного отверстия. Регистрируемые временные зависимости интенсивности свечения в этих точках нарастали с разной скоростью вследствие существования направленного движения нейтрального газа вдоль разрядного кольца, направление которого совпадает с дрейфом электронов в скрещенных полях $E \times B$. Была численно решена задача диффузии в потоке для условий, соответствующих экспериментальным, что позволило получить оценку скорости движения газа — 175 см/с. Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 16-12-10511.

MODELING OF THE ION AND FAST ATOM ENERGY SPECTRA IN AN ARGON TOWNSEND DISCHARGE

Savichkin D. O., Kristya V. I.

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Bazhenov-st., 2,
Kaluga, 248000, Russia, denis.savichkin@phystech.edu*

Simulation of argon ion motion in the low-current discharge is fulfilled by the Monte Carlo method, taking into account the charge exchange and elastic scattering on argon atoms. The energy spectra of ions and fast neutrals generated under ion elastic scattering are calculated and their contributions to the cathode sputtering are found.

A mixture of argon with mercury vapor, in which the density of saturated mercury vapor decreases exponentially with temperature, is used in different types of gas discharge illuminating lamps as a background gas [1,2]. When the electric current flows in the mixture, the mercury ion flow density depends significantly on temperature and at its negative values it is by several orders lower than the argon ion flow density [3,4]. Hence, sputtering of the cathode, which reduces the lamp lifetime, is a result of its surface bombardment by argon ions and fast atoms generated in ion-atomic collisions. Therefore, only argon ions and fast neutrals, which move into the parent gas, can be taken into consideration under simulation of this process at low mixture temperatures.

The effective (averaged over particle energies) coefficient of the cathode sputtering by argon ions as a function of the reduced electric field in the Townsend discharge was calculated in [5] under taking into consideration their resonant charge exchange on argon atoms, whereas the ion elastic scattering on argon atoms was neglected. In this work, motion of the argon ions in the discharge volume is simulated by the Monte Carlo method with due account of their charge exchanges and elastic scattering on argon atoms. The energy spectra of ions and fast neutrals generated in elastic collisions are calculated at different discharge conditions. The contributions of both types of particles to the cathode sputtering, as well as the flow densities of atoms sputtered by them from the cathode surface, are found.

REFERENCES

1. S. Hadrath, R. C. Garner, G. H. Lieder, J. Ehlbeck. *Journal of Physics D: Applied Physics* **40** (2007) 163–167.
2. G. Zissis, S. Kitsinelis. *Journal of Physics D: Applied Physics* **42** (2009) 173001.
3. G. G. Bondarenko, M. R. Fisher, V. I. Kristya. *Journal of Physics: Conference Series*. **406** (2012) 012031.
4. G. G. Bondarenko, M. R. Fisher, V. I. Kristya. *Technical Physics* **62** (2017) 197-203.
5. V. I. Kristya, D. O. Savichkin, M. R. Fisher. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. **10** (2016) 441-444.

КОАГУЛЯЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО ВЧ РАЗРЯДА

COAGULATION OF DUST PARTICLES IN MAGNETRON RF DISCHARGE PLASMA

Паль А. Ф.^{1,2}, Рябинкин А. Н.^{1,2}, Серов А. О.^{1,2}, Филиппов А. В.¹

¹НИИЯФ МГУ, РФ, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Москва

²АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, РФ, 142190, ул. Пушкиновых, вл. 12, г. Москва, г.Троицк,

asarov@mics.msu.su

Наблюдаемая коагуляция одноименно заряженных частиц близкого размера объяснена на основе полученных экспериментальных данных о расположении ловушек, о скоростях и размерах частиц и теоретического рассмотрения электростатического взаимодействия двух частиц в разрядной плазме с учетом неоднородности распределения поверхностного заряда и с учетом однородного внешнего электрического поля. Частицы с массой более 10^{-10} г двигаются вдоль трека распыления и колеблются в вертикальной плоскости в области электрического поля напряженностью на уровне 100 В/см. В случае достаточно больших частиц размером в несколько микрон, обладающих измеренными колебательными скоростями, электростатическое отталкивание может быть преодолено. Это может служить объяснением наблюдаемой в эксперименте коагуляции.

Observed coagulation of like charged particles is explained basing on the obtained experimental material on the plasma trap location, particles sizes and velocities, and on the theoretical study of the electrostatic interaction of two particles in discharge plasma which accounts of the non-uniformity of the surface charge distribution in presence of the uniform external electric field. The observed particles having mass above 10^{-10} g move along the ring-shaped sputtered trench and simultaneously oscillate in the region where the electric field of the order of 100 V/cm exists. The particles with size of several microns, confined in the presheath of the RF magnetron discharge, represent the kinetic energy value that is sufficient for the electrostatic barrier overcoming. This may be the cause of the observed coagulation of particles having the near sizes.

Экспериментально наблюдался рост частиц, удерживаемых в плазме магнетронного ВЧ разряда над плоским медным электродом. Частицы зарождаются в плазме из распыленного материала и растут до микронных размеров в виде отдельных компактных кристаллитов. Частицы двигаются вдоль разрядного кольца в направлении дрейфа $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ и одновременно колеблются вертикально. Наблюдается коагуляция частиц в плазме по достижении ими определенного размера. Частицы с массой более 10^{-10} г левитируют в области электрического поля напряженностью на уровне 100 В/см. Проведено теоретическое рассмотрение электростатического взаимодействия двух частиц в разрядной плазме. Наличие электрического поля указанной величины в области взаимодействия существенно снижает энергетический барьер, который должен быть преодолен для коагуляции двух одноименно заряженных сферических частиц близкого размера. Частицы с размерами в несколько микрон и более, удерживаемые в предслое, обладают кинетической энергией, достаточной для преодоления этого барьера, что может служить причиной наблюдаемой коагуляции частиц. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-12-10424.

ОБРАБОТКА КСЕНОПЕРИКАРДА ХИРУРГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМОЙ

HIGH-FREQUENCY PLASMA PROCESSING OF XENOPERICARDIUM FOR SURGICAL IMPLANTS

Султангалиева Г.И., Миронов М.М., Гребенщикова М.М.
Казанский национальный исследовательский технологический
университет, Россия, 420015, Казань, К.Маркса 68,
mironov.medinstrument@yandex.ru

Получали ксеноперкард из перикарда КРС с дублированием глутаровым альдегидом и последующей плазменной обработкой в высокочастотном емкостном разряде аргона. Проводили исследование физико-механических характеристик ксеноперикарда собственного производства и зарубежного. Установлено, что после обработки в емкостном разряде прочностные характеристики улучшились на 20-40%.

Xenopericardium was obtained from cattle pericardium with glutaraldehyde tanning and high-frequency plasma processing in a capacitive discharge of argon. A study of physical and mechanical characteristics of xenopericardium own production and manufacturing group Johnson & Johnson (USA). It is found that after processing in a capacitive discharge strength properties improved by 20-40%.

Ксеноперикард применяют в производстве клапанов сердца, вен и артерий. Это объемно-пористый фибриллярный белковый материал животного происхождения с термостойкостью 100-110 °С, и содержанием влаги более 50 %. Структура имплантируемого ксеноперикарда сшита межмолекулярными дубителями. Промышленный выпуск производят США, Израиль, Россия.

Проводили выработку лоскутов из перикарда КРС с дублированием глутаровым альдегидом и последующей плазменной обработкой в емкостном разряде аргона, используя для возбуждения частоту 13,56 МГц при давлении 26,6 Па и вкладываемой в разряд мощности 2,0 кВт. Расчетная неравномерность плазмы составляла по температуре тяжелых частиц около 400 К, по электронной температуре на уровне 10 000 К. Физико-механические характеристики ксеноперикарда собственного производства и производства концерна Джонсон и Джонсон (США) после обработки в емкостном разряде улучшились на 20-40% и приведены в таблице.

Таблица - Показатели ксеноперикарда до и после плазменной обработки

Производитель	Время обработки, мин	Прочность, МПа	Температура сваривания, °С
Джонсон и Джонсон	0	18,5-19,2	96,5-97,2
	18- 20	25,6-26,1	99,0- 100,5
Собственное производство	0	15,3-17,5	92,5- 94,6
	18- 20	18,1-19,0	97,2- 98,1

Измерение прочности проводили при относительной влажности воздуха близкой к 100%. Обработка приводит к упорядочению структуры, активации сшивающих агентов, усреднению нанопор, что определено расчетом и подтверждается электронной микроскопией структуры.

HIGH VOLTAGE AC PLASMA TORCH OPERATING ON VAPORS OF ORGANIC SUBSTANCES

Surov A. V., Popov S. D., Serba E. O., Nakonechny Gh. V., Subbotin D. I.,
Pavlov A. V., Spodobin V. A., Nikonov A. V.

*Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences,
Russia, Dvortsovaya emb.18, Saint Petersburg, 191186, alex_surov@mail.ru*

The report deals with a three-phase high-voltage plasma torch with separate supply of gases and vapors during its operation on a mixture of steam, carbon dioxide, methane and chlorobenzene vapors. Increase in the chlorobenzene flow rate leads to increase in the arc voltage drop and electric power from 100 to 140 kW.

In most cases, waste from production of chlorine-containing substances have high toxicity and thermal stability. Traditional combustion is impossible due to the formation of dioxins. There are a number of methods for processing chlorine-containing substances: catalytic reduction, fusion with alkalis, destruction by thermal air plasma [1, 2]. Plasma torch with separate feeding of plasma-forming media into the near-electrode zone and into the arc combustion zone has been developed in IEE RAS [3, 4]. The shielding gas (carbon dioxide) is supplied into the near-electrode zone, and other gases and vapors of organic and inorganic liquids may be fed into the arc zone. Operation of the plasma torch on a mixture of carbon dioxide (2.9 g/s), steam (2.9 g/s), methane (0.3 g/s) and chlorobenzene vapor (0-3.56 g/s) is discussed in the paper. Short-circuit current of the source is 55A. No load voltage is 10 kV. As can be seen from the figure, the electric arc voltage drop of plasma torch increases with increasing of C₆H₅Cl flow rate. This is due to increase in the thermal heat losses of the arc (proportion of hydrogen in the mixture increases).

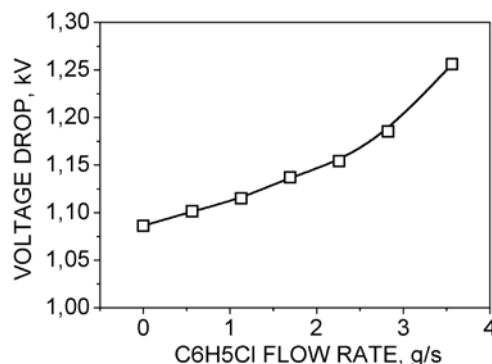


Figure. Dependence of the arc voltage drop versus chlorobenzene flow rate.
The work is partially supported by the RFBR grant 15-08-05909-a

REFERENCES

1. S. Rubio, M. Quintero, A. Rodero. *J. Hazard. Mater.* Vol.**186** (2011) 820–826.
2. K. Foeglein, P. Szabo, A. Dombi, J. Szepvoelgyi. *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** (2003) 651–664.
3. P.G. Rutberg, V.A. Kuznetsov, V.E. Popov, S.D. Popov, A.V. Surov, D.I. Subbotin, A.N. Bratsev *Applied Energy* **148** (2015) 159-168.
4. P.G. Rutberg, G.V. Nakonechny, A.V. Pavlov, S.D. Popov, E.O. Serba, A.V. Surov. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (2015) 245204.

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИСКРОВЫХ КАНАЛОВ В
ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ
ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ И МЕДНЫМ АНОДОМ**

**THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF SPARK CHANNELS IN THE
PLASMA COLUMN OF THE GAS DISCHARGE BETWEEN A WATER-
SOLUTION CATHODE AND A COPPER ANODE**

Г.Х. Тазмеев*, Б.А. Тимеркаев*, А.Х. Тазмеев**

* *Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева, Россия, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10,*

tazmeevg@mail.ru

***Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский
институт, Россия, 423810, Набережные Челны, просп. Мира, 68/19*

Экспериментально исследован газовый разряд в воздухе между воднорастворным катодом и медным анодом. Выявлены условия появления и закономерности развития искровых каналов в плазменном столбе разряда.

The gas discharge in air between water-solution cathode and a copper anode was experimentally studied. The conditions of the emergence and development patterns of spark channels in the plasma column of discharge were identified.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к газовым разрядам с жидкими электродами. Большое внимание уделяется варианту жидкофазного катода. В таком варианте, подобно тлеющему разряду, над катодом формируется объемный плазменный столб. Данная работа направлена на изучение режимов, при которых внутри плазменного столба появляются искровые каналы.

Жидким катодом служил раствор хлорида натрия в дистиллированной воде. В опытах использовались растворы с концентрацией по массе от 0.1 до 0.05 %. Водный раствор истекал из канала круглого сечения, установленного вертикально. Медный анод располагался на высоте 5 см. Массовый расход водного раствора варьировался в пределах 5-30 г/с. Электрическое питание подавалось от трехфазного двухполупериодного выпрямителя с выходным напряжением 3100 В. Пульсации напряжения сглаживались *C-L-C*-фильтром. Регулирование тока осуществлялось ступенчатым изменением балластного резистора в диапазоне от 200 до 50 Ом. В промежутках стабильного горения (без искровых каналов) разрядный ток составлял 10-15 А, а напряжение 2400-2700 В. Появление искровых каналов фиксировалось на осциллограммах как скачкообразные изменения тока. Ток нарастал до 30-35 А. При этом напряжение менялось незначительно. Оно снижалось на 200-300 В.

Процессы распространения и развития искровых каналов визуализировались скоростной видеосъемкой в режиме 10000 кадров в секунду. Искровые каналы распространялись от медного анода со скоростями 100-150 м/с. После замыкания разрядного промежутка искровые каналы расширялись. Около катода происходило их разветвление. В средней части образовались изгибы, характерные для свободной электрической дуги.

Спектральные исследования в видимой области показали, что в моменты появления искровых каналов преобладает излучение атомов водорода.

ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКОВ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ ПРОБОЯ ГАЗОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ GENERATION OF RUNAWAY ELECTRONS BEAMS DURING THE BREAKDOWN OF HIGH PRESURE GASES

Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Бакшт Е.Х.

Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия. E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований амплитудно-временных характеристик пучков убегающих электронов, а также пробивных напряжений и токов субнаносекундного разряда. Сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) зарегистрирован с помощью коллектора при давлениях азота и гелия 1.2 МПа.

The results of experimental studies of the amplitude-temporal characteristics of runaway electrons beams, as well as breakdown voltage and discharge current are presented. A collector behind the flat anode up to pressure 1.2 MPa detected the supershort avalanches electron beam (SAEB) in nitrogen and helium.

Генерация пучков убегающих электронов в газах высокого давления при использовании электродов с малым радиусом кривизны является фундаментальным физическим явлением, определяющим свойства формируемых разрядов и запаздывание пробоя. В настоящее время пучки убегающих электронов за анодом из фольги при атмосферном давлении (≈ 0.1 МПа) воздуха и других газов зарегистрированы с помощью коллектора в нескольких научных группах, см. коллективные монографии [1, 2] и ссылки в них. Однако при давлении, превышающем атмосферное в два и более раз ($p \approx 0.2$ МПа и более), только в Институте Сильноточной Электроники СО РАН был зарегистрирован пучок убегающих электронов коллектором и были измерены зависимости амплитуды тока SAEB от давления различных газов [1, 2].

Цель данной работы – исследовать параметры СЛЭП, а также характеристики субнаносекундного пробоя, при давлениях азота и гелия 0.2-1.2 МПа.

Впервые ток пучка убегающих электронов (СЛЭП) с помощью коллектора получен и измерен за анодной фольгой при давлениях азота 0.5-1.2 МПа. Показано, что длительность импульса тока пучка в этих условиях составляет ~ 90 пс. При давлении азота 1.2 МПа на оси газового диода с трубчатым катодом диаметром 6 мм за анодной AlBe фольгой на приёмной части коллектора диаметром 13 мм зарегистрировано $\approx 5 \cdot 10^6$ электронов с энергией более 70 кэВ. Установлено, что при генерации СЛЭП и межэлектродном зазоре 4 и 8 мм в газовом диоде формируется диффузный разряд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления. Ред.: В.Ф. Тарасенко. STT. Томск. (2015).
2. Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases, Volume 1: Techniques and Measurements. Ed.: Victor F. Tarasenko. Nova Science Publishers, Inc. New York. USA. (2016).

ТЕОРИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С УЧЁТОМ ТЕРМОЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ

THEORY OF THE HIGH-VOLTAGE GLOW DISCHARGE WITH CONSIDERING OF THERMAL EMISSION OF ELECTRONS

Сапронова Т.М., Ульянов К.Н.

*Всероссийский электротехнический институт имени В.И.Ленина,
Россия, 111259, г.Москва, Красноказарменная 12, kulyanov@vei.ru*

Развита теория высоковольтного тлеющего разряда с учётом вторичной электронной эмиссии и термоэмиссии. Решено уравнение Пуассона в слое объёмного заряда с учётом потока ионов, поступающих из плазмы в слой, ионизации газа, перезарядки ионов. Имеет место потенциальное и кинетическое вырывание электронов с поверхности катода. Для различных напряжений и давлений рассчитаны распределения электрических полей, концентрации электронов и ионов в слое, зависимости плотности тока от напряжения. Показано, что наличие термоэмиссии позволяет повысить максимальную мощность ускорителя электронов.

The theory of a high-voltage glow discharge with allowance for secondary electron emission and thermoemission is developed. The Poisson equation is solved in the layer of the space charge, taking into account the ion flux coming from the plasma into the layer, ionization of the gas, and charge exchange of ions. There is a potential and kinetic ejection of electrons from the surface of the cathode. The distributions of electric fields, the concentration of electrons and ions in the layer, the dependence of the current density on the voltage are calculated for different voltages and pressures. It is shown that the presence of thermionic emission makes it possible to increase the maximum power of the electron accelerator.

Высоковольтный тлеющий разряд (ВТР) – это разновидность аномального тлеющего разряда при напряжениях 5 – 150кВ [1, 2]. Электроны выходят с катода за счёт потенциального вырывания положительными ионами, а также кинетического вырывания при бомбардировке катода ионами и быстрыми атомами, которые образуются при перезарядке. К слою приложено всё напряжение, поэтому электроны ускоряются в слое и образуют практически моноэнергетический пучок. Максимальная мощность ускорителей с ВТР ограничивается предельно допустимой мощностью, которая выделяется на катоде за счёт кинетической энергии быстрых ионов и атомов. Эту мощность можно уменьшить, если использовать термокатод, с поверхности которого электроны будут выходить как за счёт γ процессов, так и за счёт термоэмиссии. В настоящей работе развита теория ВТР. Решено уравнение Пуассона в слое с учётом потока ионов, поступающих из плазмы, ионизации газа электронами, перезарядки ионов, образования потока быстрых атомов, термоэмиссии и вторичной электронной эмиссии под действием быстрых ионов и атомов. Для различных напряжений и давлений определены значения размера слоя, эффективного коэффициента вторичной электронной эмиссии $\gamma_{\text{эф}}$, рассчитаны распределения электрического поля, потенциала и объёмного заряда в слое, а также доля потока мощности, передаваемого катоду. Наличие термоэмиссии с катода позволяет регулировать тепловую нагрузку на катод и провести оптимизацию параметров электронного ускорителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. К.Н.Ульянов. *ТВТ*. 1978. **Т.16**. С. 1121.
2. К.Н.Ульянов, А.Б.Цхай. *ТВТ*.1981. **Т.19**. С. 41.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА В ПОЛОСТИ ЭЛЕКТРОДА ПЛАЗМОТРОНА НА ЕГО ЭРОЗИЮ

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE STREAM OF PLASMA-FORMING GAS IN THE PLASMATRON ELECTRODE CAVITY ON HIS EROSION

Аньшаков А.С.^{1,2}, Бутаков Е.Б.¹, Домаров П.В.^{1,2}, Урбах А.Э.¹,
Чредниченко М.В.¹

¹ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Приведены результаты исследований удельной эрозии медных трубчатых электродов дугового плазматрона для нагрева воздуха. Показана определяющая роль пространственной стабилизации дугового разряда и силы тока на величину удельной эрозии. Определены условия оптимальной эрозии электродов в зависимости от расхода плазмообразующего газа, давления в разрядной камере и диаметра электрода.

Results of researches of a specific erosion of copper tubular electrodes of an arc plasmatron for air heating are given. The defining role of spatial stabilizing of the arc discharge and current intensity on value of a specific erosion is shown. Conditions of an optimum erosion of electrodes depending on the expenditure of plasma-forming gas, pressure in the bit camera and diameter of an electrode are defined.

Предметом экспериментального исследования является внутренний полый электрод трехкамерного плазматрона с газовихревой стабилизацией дуги. Диаметр внутренней полости составлял $20 \cdot 10^{-3}$, $50 \cdot 10^{-3}$ и $60 \cdot 10^{-3}$ м. Полярность подключения к источнику электропитания была прямой (электрод – катод) или обратной (электрод – анод).

Величина удельной эрозии G , кг/Кл рассчитывалась по соотношению $\Delta m/(It)$.

Исследования удельной эрозии катода от тока дугового разряда показали, что в зависимости $G = f(I)$ установлено явление критического тока $I_{кр}$, выше которого наблюдается резкое увеличение G . Если для диаметра электрода $d = 20 \cdot 10^{-3}$ м $I_{кр} \approx 300$ А, то для $d = 50 \cdot 10^{-3}$ м $I_{кр} \approx 600$ А.

Значение $I_{кр}$ тем больше, чем выше стабилизирующий эффект вращающегося потока V_{φ} . Т.к. $V_{\varphi} \sim G/pd$, то и $I_{кр} = f(G, p, d)$

Установлены необходимые условия длительного ресурса работы катода и анода в воздушной среде. Они позволяют ещё на стадии проектирования плазматрона оценить для расчетных значений G , p , d ресурс непрерывной работы электродов в технологических испытаниях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0118 (уникальный идентификатор проекта RFMEF 160715X0118).

СИСТЕМА ИМПУЛЬСНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ РАЗРЯДОВ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ

A CAPILLARY DISCHARGE SYSTEM FOR PLASMA JET FORMATION

Кузенов В.В.^{1,2}, Фролко П.А.¹, Шумаев В.В.¹

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

²ВНИИА им. Н.Л. Духова, Россия, Москва, 127055, Суцевская ул., д. 22,
e-mail: vik_kuzenov@mail.ru

Определенный интерес для экспериментальной физики, в частности, астрофизики и физики плазмы [1-5], представляют численные исследования взаимодействия системы импульсных струй, вытекающих из группы расположенных рядом разрядов. Это так называемый капиллярный разряд с испаряющейся стенкой (КРИС) канала [6-9].

В работе представлены пространственные двумерные распределения температуры T [К], давления P [атм], которые соответствуют началу взаимодействия периферийных частей импульсных струй плазмы, истекающих из системы капиллярными разрядами. Процесс взаимодействия системы КРИС приводит к образованию вблизи оси системы области ($r \approx 0,5$ см) с повышенным, относительно окружающей среды, давлением ($v \approx 160$ раз) и плотностью ($v \approx 10$ раз). Давление в этой области запирает (на данный момент времени) истечение плазменной струи из КРИС, которая расположена на оси системы.

В последующие моменты времени в этой зоне формируется узконаправленная струя, которая имеет повышенную, по сравнению с периферийными капиллярными разрядами, осевую скорость движения факела. Приведены рисунки, показывающие, что на данной стадии развития объединенного плазменного факела тороидальной вихревой структуры не наблюдается. Также обсуждается метод формирования сверхзвуковых плазменных струй.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.5240.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov. *J. Phys. Conf. Ser.* (2017).
2. Kuzenov V.V. and Ryzhkov S.V. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **80** (2016) 598.
3. Kuzenov V.V. and Ryzhkov S.V. *Problems of Atomic Science and Technology* **4** (2013) 103.
4. Ryzhkov S.V. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics* **78** (2014) 456.
5. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. *Mathematical Models and Computer Simulations* **29** (2017).
6. Kuzenov V.V., Polozova T.N., Ryzhkov S. V. *Probl. At. Sci. Technol.* **4** (2015) 49-52.
7. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Скороход Е.П. *Труды МАИ* **84** (2015).
8. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Гаврилова А.Ю., Скороход Е.П. *Труды МАИ* **83** (2015).
9. V.V. Kuzenov, P.A. Frolko. *J. Phys. Conf. Ser.* (2017).

SIMULATION CAPACITIVE COUPLED RADIO-FREQUENCY DISCHARGE: LOCAL AND NONLOCAL APPROXIMATION

*Badriev I.B., **Zheltukhin V.S., *Chebakova V. Yu.

* *KFU, 420008, Russia, Kazan, 18 Kremlyovskaya street, vchebakova@mail.ru;*

** *KNRTU, 420015, Russia, Kazan, 68 Karl Marx street,*

E-mail: vzheltukhin@gmail.com;

Abstract. The models provided in the research paper describe a capacitive coupled radio-frequency discharge in argon between two parallel plate electrodes, one of which is grounded, and the other is connected to the radio-frequency capacitive generator. The model of a radio-frequency capacitive discharge under low pressure is simulated in non-local approximation, and under high pressure is simulated in local approximation and is sensitive to dimers and molecular ions. We provide calculation data with respect to different pressures and make comparative analysis of data provided by other authors in particular, analysis of data obtained with real experiment.

We have constructed a self-sustained mathematical model, which is described a capacitive coupled RF discharge between two plane-parallel electrodes, one of them is grounded and the other is connected to RF generator, wherein the interelectrode distance is smaller than the electrode size. In this case the electric field is close to the potential field and the discharge is uniform along the electrode. It allows us to use one-dimensional approximation. Herein we review various approaches to simulate a high-frequency capacitive discharge depending on pressure. Provided herein model of CCRF-discharge under low pressure includes time-dependent equation of balances for electron gas, metastable atoms, atomic ions, Poisson's equation for potential of electrical field, time-dependent equation of electronic energy balance, as well steady state equation of thermal conductivity of atomic-ion gas at average parameters. Rate coefficients for processes taking place in electron impact depends on the electron temperature and taking into account electron-electron collisions. Self-sustained model of the CCRF discharge at atmospheric pressure in the local approximation contains the balance equations for electrons, metastable atoms, molecular and atomic ions, the kinetic equations for argon dimer and neutral atoms, the Poisson equation for the electric field potential, as well as stationary atomic heat equation ion gas with the boundary conditions of heat transfer, calculated on the average for the period of oscillation of the field parameters. Rate coefficients for processes taking place in electron impact depends on the local value of the reduced electric field and the degree of ionization taking into account electron-electron collisions. We used an approximate method for solving nonlinear system of boundary and initial-boundary problems, which is considered in this paper. The method is based on a preliminary finite-dimensional approximation of the problem by using finite-difference schemes with a subsequent application for its implementation of the iterative process. We provide calculation data with respect to different pressures and make comparative analysis of data provided by other authors in particular, analysis of data obtained with real experiment. This work was supported by RFBR projects 16-31-00378.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ВДОЛЬ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD ON THE IONIZATION WAVE PROPAGATION ALONG PLASMA JET IN HELIUM

Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафиков А.Г.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.
airat.shafikov@gmail.com

Аннотация. Исследовано влияние стационарного внешнего электрического поля, наложенного вдоль плазменной струи в He, на распространение в ней ионизационной волны.

Abstract. The report presents the results on influence of an external electric field on velocity of the ionization wave (plasma bullets formed by DBD) propagating along the plasma jet in helium.

Оказалось, что параметры ионизационной волны (ИВ), распространяющейся вдоль плазменной струи диэлектрического барьерного разряда (ДБР), и вид струи зависят от электрического потенциала, приложенного к обрабатываемому объекту (металлическая пластина). Кратко результаты представлены на Рис.1 и Рис.2. Детальная информация будет представлена в полной версии доклада.

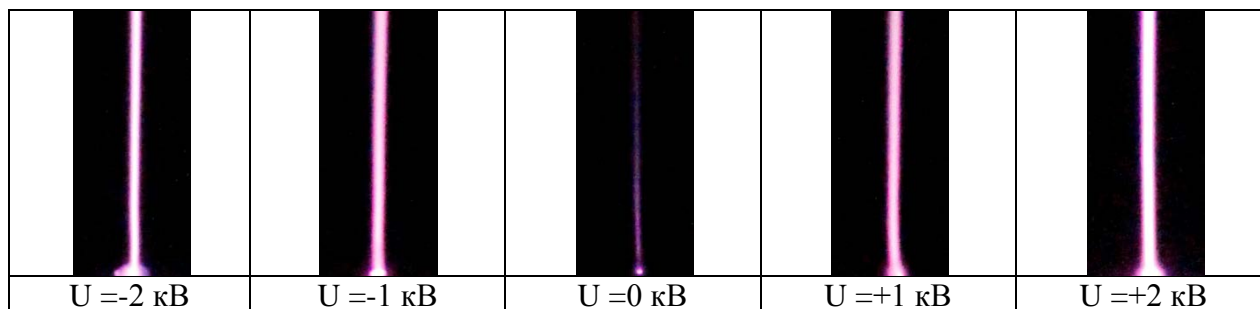


Рис.1. Вид струи ДБР в He при разных потенциалах U на медной пластине.

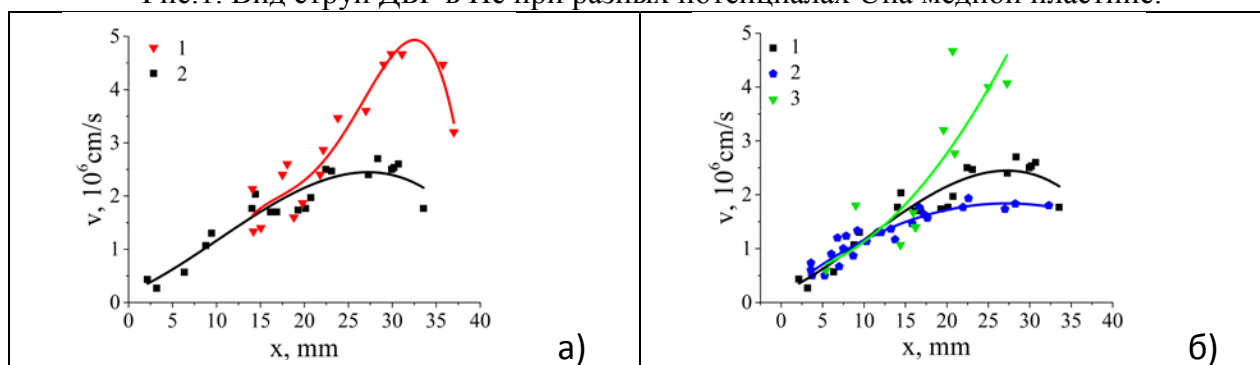


Рис.2. Изменение скорости ИВ вдоль струи: а) без пластины (1) и с пластиной при $U=0$ (2); б) при наличии пластины с $U=0$ (1), $+1$ кВ (2) и -1 кВ (3).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00234).

DIFFERENCE IN DBD DEVELOPMENT IN AIR AT NANOSECOND AND MICROSECOND VOLTAGE RISE TIME

Khomich V.Yu., Moshkunov S.I., Shershunova E.A.

*Institute for Electrophysics and Electric Power Russian Academy of Sciences,
St.-Petersburg, Russia, 191186, Dvortsovaya nab., 18*

[E-mail: esherhunova@gmail.com](mailto:eshershunova@gmail.com)

Analysis of the discharge current waveform, E/N and ionization rate ($\alpha-\eta$) showed that different modes of dielectric barrier discharge (DBD) were realized in 1-mm air gap at nanosecond (ns) and microsecond (us) voltage fall and rise time at the gap.

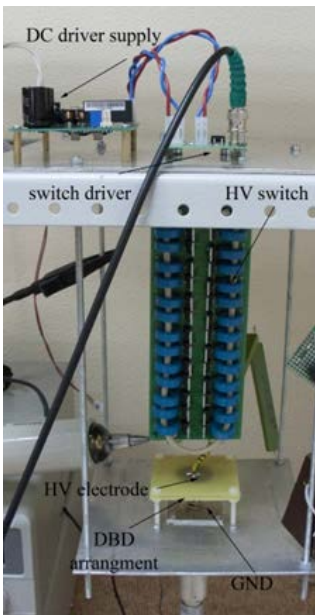


Figure 1. Solid-state DBD-power supply.

Solid-state DBD-power supply, providing us-pulses with ns-fall time (4-35 ns) and us-rise (12 us) time, with amplitude up to 20 kV and frequency up to 3 kHz, was developed (fig. 1).

The “mixed” DBD mode was realized in plane-parallel 1-mm air gap. It is seen from fig. 2 that a single discharge current of ns-duration with amplitude of tens of amperes is formed at fast voltage drop. The breakdown voltage, calculated considering the gap geometry and barrier capacitance (30 pF) was ~ 12.8 kV, $E/N \sim 480$ Td,

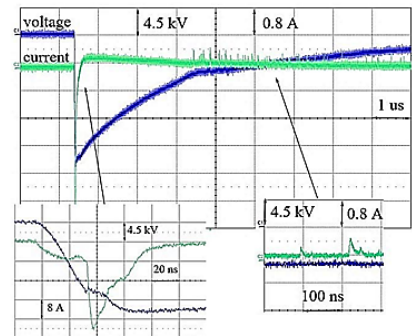


Figure 2. DBD current and voltage traces.

(or rise) voltage time many streamers develop synchronously and the DBD is rather diffuse. The opposite situation takes place at us-voltage rise (fig.2). The gap breakdown occurred at 4.7 kV/cm, – the static air breakdown voltage [2]: many random discharges of ns-duration with amplitude of tens-thousand mA were clearly seen in the current trace (fig.2), so it looked like a classic filamentary DBD in air.

This research was partially supported by RFBR; grant N. 16-08-01037.

and ionization rate ($\alpha-\eta$) estimated in Bolsig+ ~ 1450 1/cm² ($5.4 \cdot 10^{-21}$ m², as shown in fig.3). Due to Meek-Loeb criteria and the data from [1], it can be concluded that at ns-fall

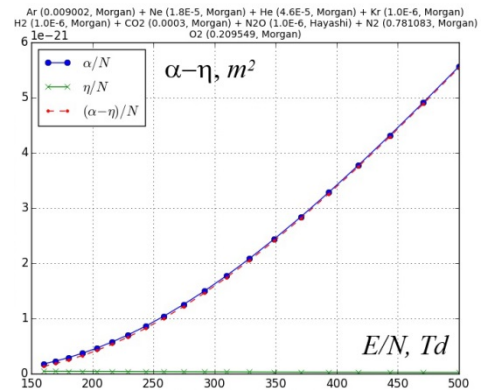


Figure 3. Ionization rate ($\alpha-\eta$) via E/N . (α – impact, η – attachment).

REFERENCES

1. Malashin M.V., Moshkunov S.I., Khomich V.Y., Shershunova E.A. *Plasma Physics Reports*. **43** (2017) 170.
2. Raizer Y. P. *Gas discharge physics*. Nauka, Moscow, 1987.

DBD-PLASMA SOURCE FOR POLIMER TREATMENT

Khomich V.Yu., Podguyko N.A., Moshkunov S.I., Shershunova E.A.
Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences,
St.-Petersburg, Russia, 191186, Dvortsovaya nab.,18
E-mail: eshershunova@gmail.com

DBD-plasma with pulse power supply was used for improving hydrophilic properties of polytetrafluoroethylene (PTFE).

DBD-plasma source with pulse power supply was designed. High-voltage pulses with 20-ns fall time and 12-us rise time, regulated amplitude 0-20 kV and frequency 1-3 kHz were formed at electrodes by the home-made pulse semiconductor generator [1]. The discharge was realized in 1-mm atmospheric air gap between two ring metal electrodes with diameter of 30 mm [2]. The upper high-voltage electrode was covered by 1-mm-barrier plate with $\epsilon = 4$. 50x50x1-mm plate of PTFE served as a sample, which was put on the lower grounded electrode during the experiment.

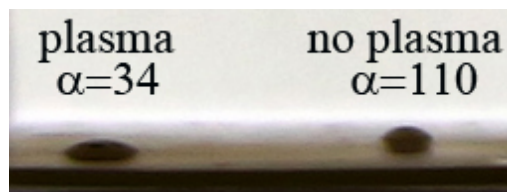


Figure 1. Photo of the water drop on the PTFE surface before and immediately after DBD-plasma treatment

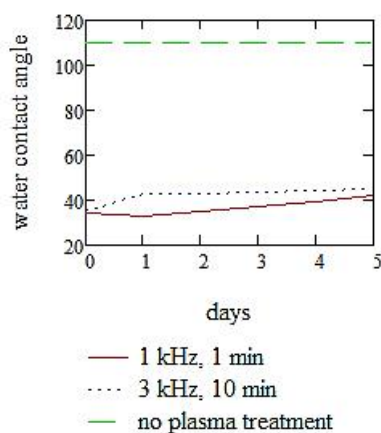


Figure 2. Water contact angle versus days after plasma treatment

Plasma treatment of PTFE-surface was conducted (fig.1). The test was carried out in two regimes: 1) voltage – 20 kV, frequency – 1 kHz, treatment time – 1 minute; 2) voltage amplitude – 20 kV, frequency – 3 kHz, treatment time – 10 minutes. It's worth to note that the water contact angle was the same for two regimes immediately after the treatment ~ 34°, but the samples ageing occurred in a different way (fig.2). The samples treated in regime 1) retained their hydrophilic properties after DBD-plasma treatment longer.

This research was partially supported by RFBR; grant N. 16-08-01037.

REFERENCES

1. V. Khomich., S. Moshkunov, E. Shershunova. *Abstract book of 4th IWPC.T.* (2017) 48.
2. Khomich, V. Y., Malashin, M. V., Moshkunov, S. I., Shershunova, E. A., Yamschikov, V. A. (2014). *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42, 3314.

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК АЗОТА НА ЭЛЕКТРОДНЫЙ СВЧ РАЗРЯД ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДОРОДЕ

INFLUENCE OF SMALL ADDITIVES OF N₂ IN THE ELECTRODE MICROWAVE DISCHARGE OF LOW PRESSURE IN HYDROGEN

Лебедев Ю. А., Татаринов А. В., Эпштейн И. Л., Титов А. Ю.

*Институт Нефтехимического Синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Россия,
Москва 119991, Ленинский пр.29, Lebedev@ips.ac.ru*

Экспериментальное и численное исследование продемонстрировало влияние малых добавок молекулярного азота на электродный СВЧ-разряд пониженного давления в водороде.

Experimental and numerical studies have demonstrated the influence of small additives of molecular nitrogen in the electrode microwave discharge of low pressure in hydrogen.

В работах [1, 2] экспериментально (методом оптической эмиссионной спектроскопии) и с помощью численного моделирования было исследовано влияние малых добавок водорода на электродный СВЧ-разряд пониженного давления в азоте. Показано, что неоднородность разряда приводит к тому, что характер влияния добавки водорода на интенсивности полос излучения азота различен в разных частях разряда. Показано, что основное влияние добавки водорода на параметры разряда связано с изменением ионного состава плазмы. Данная работа посвящена влиянию добавок молекулярного азота на разряд в водороде.

Одномерная модель в квазистатическом СВЧ поле включала уравнения баланса заряженных и нейтральных частиц и уравнение Пуассона.

При исследовании влияния добавки азота на параметры микроволнового водородного разряда в рамках одномерной модели было показано, что на профили концентраций электронов и СВЧ-поля уже при 5% добавки азота влияют изменение ФРЭЭ, изменение ионного состава плазмы и изменение транспортных свойств электронов. ФРЭЭ оказывает влияние в шаровой области разряда (вдали от электрода): увеличение подвижности электронов приводит к уменьшению размеров плазменного образования. Изменение ионного состава плазмы (основным ионом становится ион N_2H^+) влияет на структуру плазмы у поверхности электрода. Проведенные спектральные измерения подтвердили влияние малых добавок азота на свойства водородной плазмы.

Это исследование было поддержано грантом РФФИ # 15-08-00070

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Jovovic, I.L. Epstein, N. Konjevic, Y.A. Lebedev, N.M. Sisovic, A.V.
 2. Tatarinov. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. **32** (2012) 1093-1108.
- Ю.А. Лебедев, Т.Б. Мавлюдов, В.А. Шахатов, И.Л. Эпштейн. *Теплофизика высоких температур*. **48** (2010) 333-339.

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА С
ЖИДКИМ АНОДОМ
ELEKTROFIZICHESKY AND THERMAL CHARACTERISTICS OF THE CATEGORY
WITH THE LIQUID ANODE**

Мирханов Д.Н.,¹ Гайсин Ал.Ф.

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева –
КАИ, Россия

E-mail: mirhanov@list.ru

Исследован газовый разряд между струйно-капельным жидким анодом и металлическим катодом при атмосферном давлении. Представлены результаты исследований электрофизических характеристик и тепловых процессов в зоне горения разряда.

The gas discharge between the jet and drop liquid anode and the metal cathode with an atmospheric pressure is investigated. Results of researches of electrophysical characteristics and thermal processes in a zone of burning of the category are presented.

Установлено зажигание газового разряда в межэлектродном промежутке при напряжении $U = 600 - 1000\text{В}$, ток $I = 1.2 - 4.8\text{А}$, длина струи $l_c = 30\text{мм}$, давление внешней среды $p = 10^5\text{Па}$, в качестве катода была взята медная пластина диаметром $d_a = 1\text{мм}$.

Исследования колебаний тока и напряжения газового разряда производились цифровым осциллографом марки «GDS – 806 S». Установлено, что разряд между струйно-капельным анодом и медным катодом горит в виде импульсов с частотой пульсаций тока $\nu = 30 - 70\text{Гц}$. Это объясняется тем, что при подаче потенциала на электроды в зоне соприкосновения электролита и медного электрода, происходит активный процесс испарения электролита с образованием локальных парогазовой зон. Если условия в парогазовой оболочке удовлетворяет возникновению процесса ионизация, в них происходит пробой, сопровождающийся с резким возрастанием температуры и давления. Это вызывает возникновение ударных волн, которые приводят к расширению парогазовой оболочки и разрешения струи, что в свою очередь приводит к повышению сопротивления в парогазовой оболочке, в результате чего разряд гаснет, цепь размыкается, ток падает до 0. Этот процесс периодически повторяется. Термография поверхности электродов в зоне горения газового разряда производилась тепловизором марки «FLIRA 6500 SC». Обработки полученных данных осуществлялась с помощью программного обеспечения «ALTAIR v5.91.010». Исходя из термограмм поверхности в зоне горения разряда видно, что температура вдоль струйно-капельного анода варьируется $T_k \approx 46 - 69^\circ\text{C}$. Температура медного катода равна $T_a \approx 54 - 69^\circ\text{C}$. В зоне горения разряда температура достигает $T_{max} = 69^\circ\text{C}$. Установлено, что после зажигания газового разряда температура вдоль струйно-капельного анода понижается, это связано с тем, что до пробоя энерговыделению происходит за счет джоулевого теплового выделения. После пробоя энерговыделению в струю понижается на фоне уменьшения общего сопротивления и падения напряжения на струе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда (3-е изд., перераб. и доп.). Долгопрудный, 2009. -734 с.*
2. Файрушин И.И., Даутов И.Г., Кашапов Н.Ф., Шамсутдинов А.Р. *Письма в ЖТФ, Т. 42. №23. 2016. С.42-50*
3. Dautov G., Fayrushin I., Kashapov N., Dautov I. *Journal of Physics: Conference Series. 2014. T. 567. № 1. С. 012008.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПАРОГАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ АЛЮМИНИЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ И ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ЕГО ФОРМУ

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE GAS DISCHARGE BETWEEN THE ALUMINUM ELECTRODE AND THE LIQUID ELECTRODE ON ITS FORM

Габдрахманов А.Т., Исрафилов И.Х., Галиакбаров А.Т.

Набережночелнинский институт КФУ, ATGabdrakhmanov@kpfu.ru

В работе представлены результаты исследований внешних особенностей: излучения, геометрической формы, объемной структуры, структуры катодных и анодных пятен парогазового разряда между алюминиевым электродом и жидким электродом.

The paper presents the results of studies of external features: radiation, geometric shape, volumetric structure, structure of cathode and anode vapor-gas discharge spots between an aluminum electrode and a liquid electrode.

Электрические разряды между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом представляют большой практический интерес [1]. Это связано с большими возможностями использования указанных разрядов в технологических процессах: нанесение высокотехнологичных антикоррозионных и защитных покрытий, очистка и полировка металлических поверхностей [2,3], электротермическая обработка материалов. Используя различные параметры парогазового разряда можно получить различные режимы горения разряда. Каждый режим применяется в конкретной технологии. Изменение режима горения разряда можно наблюдать визуально. В данной работе рассматриваются особенности влияния параметров парогазового разряда с алюминиевым анодом и жидким катодом при атмосферном давлении на его геометрическую форму, объемную структуру, структуру катодных и анодных пятен в диапазоне межэлектродного расстояния $l=2\div 8$ мм, диаметром анода $d=1,6\div 5$ мм, ток разряда $I=30\div 1000$ мА и напряжения $U=1000\div 2000$ В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Az.T. Gabdrakhmanov, I.H. Israphilov, A.T. Galiakbarov Al.T. Gabdrakhmanov. *Preparation of metal surfaces for application of functional coating*. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 789 (2017) 012009.
2. Denisov D.G., Kashapov N.F., Kashapov R.N. *The appearance of shock waves in the plasma electrolytic processing*. Iop conference series: materials science and engineering – 2015. – №012005.
3. Габдрахманов Аз.Т., Габдрахманов Ал.Т., Галиакбаров А.Т. *Исследование характеристик парогазового разряда с алюминиевым анодом и жидким катодом*. Онлайн-электронный научно-технический журнал «Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация». №3(70) – Наб. Челны: К(П)ФУ, 2016. - С. 35-41.

Секция 2

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В

ПЛАЗМЕ

КИНЕТИКА ЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ O^- В РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ ПАРОВ ВОДЫ

THE KINETICS OF ENERGETIC O^- IONS IN DISCHARGE H_2O PLASMA

Пономарев А.А., Александров Н.Л.

*Московский физико-технический институт, Россия, Долгопрудный, Московская область,
Институтский переулок 9, nick_aleksandrov@mail.ru*

Методом Монте Карло выполнено моделирование поступательной релаксации энергичных ионов O^- , рождающихся в результате диссоциативного прилипания электронов к молекулам в плазме паров воды в сильном электрическом поле. Вычислены вероятности перезарядки и отлипания электронов от ионов O^- в зависимости от приведенного электрического поля.

Monte Carlo simulation was used to study the translational relaxation of energetic O^- ions formed by dissociative electron attachment to H_2O molecules in water vapor plasma in a strong electric field. The probabilities of charge exchange and electron detachment from O^- ions were calculated versus the reduced electric field.

Неравновесная разрядная плазма, генерируемая в парах воды и H_2O -содержащих газовых смесях, представляет интерес для многочисленных приложений низкотемпературной плазмы. Свойства такой плазмы зависят от количества и состава отрицательных ионов, которые определяются скоростями их образования, конверсии и гибели. При расчете этих скоростей в слабоионизованной плазме под действием сильного электрического поля вычисляется распределение ионов по энергиям, которое обычно предполагается находящимся в равновесии с электрическим полем.

В настоящей работе исследовался случай, когда ионы рождаются с избыточной энергией и до установления равновесия с электрическим полем успевают вступить в пороговые ионно-молекулярные реакции, эффективность которых относительно мала для «равновесных» ионов. Для этого методом Монте Карло моделировалась эволюция энергии ионов O^- , образованных при диссоциативном прилипании электронов к молекулам H_2O в сильном электрическом поле. Такие ионы рождаются в диапазоне от 0 до 1.5 эВ и могут эффективно участвовать в пороговых столкновительных процессах. При моделировании релаксации ионов в парах воды во внешнем электрическом поле учитывались упругие столкновения с молекулами, перезарядка ионов и отлипание электронов от ионов. Из расчетов следует, что до $\sim 20\%$ энергичных ионов O^- могут быстро превращаться в ионы OH^- в процессах перезарядки и до $\sim 15\%$ могут гибнуть в результате отлипания электронов.

Показано, что влияние энергичных ионов O^- на пороговые реакции не может быть описано традиционным образом. Был предложен подход для количественного описания этого эффекта, который особенно важен при малых приведенных полях (100 Тд и ниже), когда средняя энергия ионов мала, а электроны достаточно нагреты для прилипания к молекулам H_2O .

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-32-00196.

РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ Мо И Та

CALCULATIONS OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF LOW-TEMPERATURE Mo AND Ta PLASMA

Апфельбаум Е. М.

ОИВТ РАН, Россия, Москва 125412, Ижорская ул. 13 стр. 2, apfel_e@mail.ru

Термодинамические величины (давление, внутренняя энергия, и т. д.) и электронные коэффициенты переноса (электропроводность, теплопроводность и термоэдс) рассчитаны для низкотемпературной равновесной плазмы молибдена и тантала. Для расчёта термодинамики использовалась химическая модель, разработанная ранее для аналогичных расчётов для других металлов [1,2]. Этот подход, модифицированный в настоящем исследовании для молибдена и тантала, позволяет получить так же и химический (ионный) состав изучаемых веществ. Далее этот состав использовался для расчётов коэффициентов переноса в приближении времени релаксации. Была установлена область на плоскости плотность-температура, где применение используемой модели физически корректно. Проведённое далее сравнение наших результатов с имеющимися результатами измерений [3] и расчётов [4, 5] других авторов показало хорошее согласие.

The thermodynamics values (pressure, internal energy etc.) and electronic transport coefficients (electrical conductivity, thermal conductivity and thermal power) have been calculated for low-temperature equilibrium molybdenum and tantalum plasma. The chemical model, developed previously for other metals [1, 2] was used to obtain the thermodynamics. This approach, modified in present study for the cases of Mo and Ta, allows one as well to calculate the chemical (ionic) composition. Farther the latter was used to calculate the electronic transport coefficients within the relaxation time approximation. The region on density-temperature plane was established, where the application of present model is physically correct. The following comparison of our results with available experiments [3] and calculations [4, 5] of other researchers has shown good agreement.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Apfelbaum, *Phys. Plasmas*. **22** (2015) 092703.
2. Е. М. Apfelbaum, *Contr. Plasma Physics*. **56** (2016) 176.
3. A. W. DeSilva, G. B. Vunni, *Phys. Rev. E* **83** (2011) 037402.
4. M. French, Th. R. Mattsson, *Phys. Rev. B* **90** (2014) 165113.
5. L. Miljacic, S. Demers, Q.-J. Hong, A. van de Walle, *CALPHAD* **51** (2015) 133.

ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАСПАД ПЛАЗМЫ В ГОРЮЧИХ СМЕСЯХ ПРИ ИХ ВОЗБУЖДЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЯДОМ

PROCESSES CONTROLLING DECAY OF HIGH-VOLTAGE NANOSECOND DISCHARGE PLASMA IN COMBUSTIBLE MIXTURES

Анохин Е.М.¹, Попов М.А.¹, Стариковский А.Ю.², Александров Н.Л.¹

¹Московский физико-технический институт, Россия, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, e-mail: nick_aleksandrov@mail.ru

²Принстонский университет, США, Принстон, Нью-Джерси 08544, e-mail: astariko@princeton.edu

Представлены результаты экспериментального исследования распада плазмы периодического импульсного высоковольтного наносекундного разряда в смесях C₃H₈:O₂, C₂H₆:O₂, H₂:O₂ и диметиловом эфире при комнатной температуре и давлениях в диапазоне от 2 до 6 Торр.

The results of the experimental study of high-voltage nanosecond repetitively pulsed discharge afterglow in C₃H₈:O₂, C₂H₆:O₂, H₂:O₂ mixtures and dimethyl ether are presented for room temperature and pressures from 2 to 6 Torr.

Было проведено экспериментальное исследование распада плазмы в C₃H₈:O₂, C₂H₆:O₂, H₂:O₂ и диметилэфире при различных стехиометрических соотношениях. Эксперименты проводились при давлениях 2-6 Торр и температуре 300 К. С помощью двухканального СВЧ-интерферометра на рабочей частоте 94 ГГц измерялась зависимость концентрации электронов от времени в послесвечении разряда. Начальная концентрация электронов была в диапазоне $(1-3) \times 10^{12}$ см⁻³. В качестве источника плазмы использовался высоковольтный наносекундный разряд с амплитудой импульса 25 кВ и длительностью 30 нс.

Показано, что скорость рекомбинации плазмы в исследованных горючих смесях может превосходить на порядок величины скорость рекомбинации в чистых углеводородах [1] и кислороде при указанных условиях. Динамика рекомбинации плазмы в этих смесях в значительной степени зависела от количества разрядных импульсов, причем характер этой зависимости в смесях с углеводородами оказался немонотонным. Это объясняется постепенным окислением исследуемых смесей и образованием промежуточных углеводородных соединений, которые приводят к ускорению распада плазмы.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 17-02-00481.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.М. Anokhin, М.А. Popov, I.V. Kochetov, А.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov. *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016) 044006.

ПРОЦЕССЫ ПРИЛИПАНИЯ И ОТЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРЕДПОРОГОВЫХ УСЛОВИЯХ В ПЛАЗМЕ ВОЗДУХА

PROCESSES OF ELECTRON ATTACHMENT AND DETACHMENT IN NEARBREAKDOWN CONDITIONS IN AIR PLASMA

Арделян Н.В., Бычков В.Л., Космачевский К.В.

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, ГСП-2, 119991, Ленинские горы, физический факультет,
bychvl@gmail.com*

Описываются результаты теоретических исследований по ионизации сухого воздуха в разряде в постоянном электрическом поле. В подробной и укороченной кинетических моделях уделено особое внимание процессам прилипания электронов к молекулам кислорода и отлипания от молекул и атомов кислорода, которые определяют кинетику околопороговых процессов. Основные данные по константам скоростей отлипания взяты из [1,2]. Полученные результаты показывают, что необходимое наличие начальных электронов на предпробойной стадии может обеспечиваться процессом отлипания электронов от отрицательных молекулярных ионов кислорода в воздухе с константой прилипания по механизму $O_2^- + M \rightarrow e + O_2 + M$ из [2]. Представлены подробная и укороченная модели процессов с участием отрицательных ионов, которая хорошо описывает кинетику процессов в околопороговой области.

The results of theoretical studies on the ionization of dry air in a discharge in a constant electric field are described. The detailed and shortened models pay particular attention to the processes of electron attachment to oxygen molecules and detachment from molecules and oxygen atoms, which determine the kinetics of near-threshold processes. The basic data on the rate constants of detachment are taken from [1, 2]. The obtained results show that the necessary presence of initial electrons in the prebreakdown stage can be provided by the process of electron detachment from negative molecular oxygen ions in air with a sticking constant according to the mechanism $O_2^- + M \rightarrow e + O_2 + M$ from [2]. The detailed and shortened models of processes involving negative ions describe well processes kinetics in near threshold area.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Kh. Mnatsakanyan, G.V. Naidis. *Khimiya Plasmy*. Ed. B.M. Smirnov. **14** (1987) 227.
2. A.A.Ponomarev, N.L. Aleksandrov. *Plasma Sources Sci.Technol.* **24** (2015) 03501.

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ПЛОТНОСТИ НА РЕКОМБИНАЦИЮ ИОНОВ В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ

THE EFFECTS OF ION DENSITY ON THE ION RECOMBINATION IN DENSE GASES AND LIQUIDS

Ланкин А.В.

ОИВТ РАН, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2,
Alex198508@yandex.ru

Представлены результаты для скорости рекомбинации ионов в плотных газах и жидкостях, где она протекает в диффузионном режиме. Уточнены границы области протекания рекомбинации по диффузионному механизму в газах. Изучена зависимость константы скорости рекомбинации ионов в газах от плотности фонового газа и концентрации ионов. Показана существенная зависимость кинетики рекомбинации от кулоновского параметра неидеальности в газах. Представлен способ вычисления константы скорости рекомбинации с учётом эффектов неидеальности при различных значениях концентрации фонового газа.

The ion recombination rate in dense gases and liquids where it occurs in the diffusion mode is studied. The boundary of the recombination by the diffusion mechanism of gases is verified. The dependence of the ion recombination constants in gases on the density of background gas and ion concentration is obtained. Strong dependence of the kinetics of recombination from Coulomb nonideality parameter in gases is showed. The way of calculating the constant recombination rate taking into account the effects of coulomb nonideality for different values of gas number density is obtained.

В работе рассмотрен процесс рекомбинации ионов в плотных газах и жидкостях при различных вариантах выбора свойств среды и самого иона. Установлена зависимость константы скорости рекомбинации в газе от концентрации фонового газа при её отсутствие в жидкостях. Получены условия для положения областей с различными режимами кинетики рекомбинации. Произведено исследование зависимости константы скорости рекомбинации в плотных газах от параметра кулоновской неидеальности. Установлено, что вопреки имеющим место в литературе представлениям об отсутствии зависимости скорости рекомбинации в диффузионном режиме от параметра кулоновской неидеальности [1] в действительности такая зависимость сохраняется. Данная зависимость может быть интерполирована в диапазоне всех значений параметра неидеальности экспоненциально спадающей кривой. Крутизна уменьшения константы скорости рекомбинации с ростом параметра неидеальности уменьшается с увеличением концентрации фонового газа. При этом при рекомбинации ионов в жидкостях подобной зависимости константы скорости рекомбинации от ионной плотности не обнаруживается. Кроме того изучена зависимость константы скорости рекомбинации от соотношения масс рекомбинирующих ионов, а также нейтральных молекул и ионов.

Работа выполнена при поддержке по гранту Президента РФ № МК-9285.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.K.Bates. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **15** (1982) L119.

ОСОБЕННОСТИ ТРОЙНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЕ

FEATURES OF TRIPLE RECOMBINATION IN ULTRACOOLD PLASMA

Воробьев В. С.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул. 13 стр. 2, Москва 125412, Россия, ² Национальный Университет Науки и Технологий "МИСИС", Ленинский проспект 4, Москва 119049, Россия

E-mail: vrby@mail.ru

Аннотация. Рассматривается трехчастичная столкновительная рекомбинация ($e - e - ion$) в ультрахолодной плазме [1, 2], когда температура мала, а параметр неидеальности между заряженными частицами может превышать единицу.

Abstract: Three-particle collisional recombination ($e-e-ion$) in an ultracold plasma is considered when the temperature is small, and the coupling parameter between charged particles can exceed unity.

Для этих условий рассчитана средняя энергия свободных электронов и найден коэффициент рекомбинации. Он $\sim T^{-9/2}$ при малых значениях параметра неидеальности, а при больших – обратно пропорционален плазменной частоте. Полученные результаты сравниваются с различными теоретическими моделями и численными моделированиями процесса рекомбинации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bobrov A. A., Bronin S. Ya., Zelener B. B., Zelener B. V., Manykin E. A., and Khikhlukha D. R., *JETP*. **112** (2011) 527.
2. Bobrov A., Zelener B. B., Zelener B. V., and Khikhlukha D. R., *High Temperature*. **51** (2013) 615.

ДИССОЦИАЦИЯ O₂ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ В ПЛАЗМЕ

DISSOCIATION OF O₂ BY ELECTRON IMPACT IN PLASMA

J.P.Booth¹, O.Guaitella¹, A.Chatterjee¹, Д.В.Лопачев², С.М.Зырянов²,
Т.В.Рахимова², Д.Г.Волошин²

¹ *Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS, Ecole Polytechnique, France*

² *НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобелева, МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия*

d.lopaev@gmail.com

Константа скорости диссоциации O₂ была измерена в широком диапазоне E/N в тлеющем разряде постоянного тока. Поле E определялось зондовым методом, а плотность газа N – из измерений газовой температуры по спектру излучения Р-ветви полосы O₂(b¹Σ_g⁺) → O₂(X³Σ_g⁻). Плотность атомов O(³P) измерялась методом TALIF, а отношение O(³P)/N, кроме этого, определялось методом актинометрии по атомам Ar. Время разрешенная актинометрия в модулированном разряде использовалась для определения скорости гибели атомов O(³P). Из данных измерений была получена константа скорости диссоциации O₂ как функция E/N. Анализ полученных данных позволил детально рассмотреть механизмы диссоциации и возбуждения высоких электронных состояний O₂ и сформировать новый самосогласованный набор сечений для молекулы O₂.

DC glow discharges in pure O₂ in a Pyrex tube were studied to measure dissociation rate constant over a wide range of E/N. E was found from probe measurements while gas density N - from the measurements of the gas temperature from the O₂(b¹Σ_g⁺) → O₂(X³Σ_g⁻) emission spectrum. O(³P) atom density was measured by TALIF while O(³P)/N ratio was also determined by Ar actinometry. Time-resolved actinometry on partially-modulated discharges was used to measure the loss rate of O atoms. From these measurements the O₂ dissociation rate constant was determined as a function of E/N. The obtained data allowed analyzing both dissociation and excitation mechanisms of the high electronic states of O₂ as well as forming a new self-consistent cross section set for O₂ molecule.

Сечение диссоциации молекул O₂ электронным ударом (σ_{dis}) является предметом активных дебатов. Так имеющиеся экспериментальные данные по σ_{dis} вблизи порога предсказывают величину скорости диссоциации много ниже той, что наблюдается. В то же время, нереалистично большое σ_{dis} используется во многих самосогласованных наборах сечений для O₂, чтобы обеспечить соответствие наблюдаемым транспортным коэффициентам и спектрам неупругих потерь.

Чтобы прояснить это несоответствие и была сделана данная работа. Для этого константа скорости диссоциации O₂ была измерена как функция E/N в плазме тлеющего разряда постоянного тока в чистом кислороде. Анализ полученных данных позволил согласовать механизмы диссоциации и возбуждения высоких электронных состояний O₂ и сформировать новый самосогласованный набор сечений для молекулы O₂.

Данная работа сделана в рамках международного проекта KaPPA International Associated Laboratory (LIA) (the LABEX Plas@par project), а также при поддержке фонда РФФИ проект №16-52-16024.

PHOTOIONIZATION OF HYDROGEN MOLECULAR ION BY ULTRASHORT PHOTO-PULSE

Arkhipov D.N., Astashkevich S.A., Mityureva A.A., Smirnov V.V.
Faculty of Physics, St. Petersburg State University, Russia, 198504,
E-mail: valery_smirnov@mail.ru

The probabilities of photoionization of hydrogen molecular ion by ultrashort laser field were evaluated on base of earlier developed trajectory method.

The process of photoionization of hydrogen molecular ion in ultrashort laser field was considered. The process may be of interest, for example, in astrophysical plasma. The trajectory-based method for evaluating transition probabilities developed in our works [1, 2] has been used. The method is nonperturbative and takes into account all orders of multiphoton and recollision processes. The photoionization probabilities were calculated in a wide range of field frequencies and intensities. This is unique capabilities compared to the other methods.

We consider a plane-wave photo-pulse with linear polarization and a Gaussian modulation. The result in a weak field is usually represented in a form of cross section. Gained hydrogen molecular ion photoionization cross section averaged over molecular orientation for equilibrium internuclear distance is shown in Fig. 1.

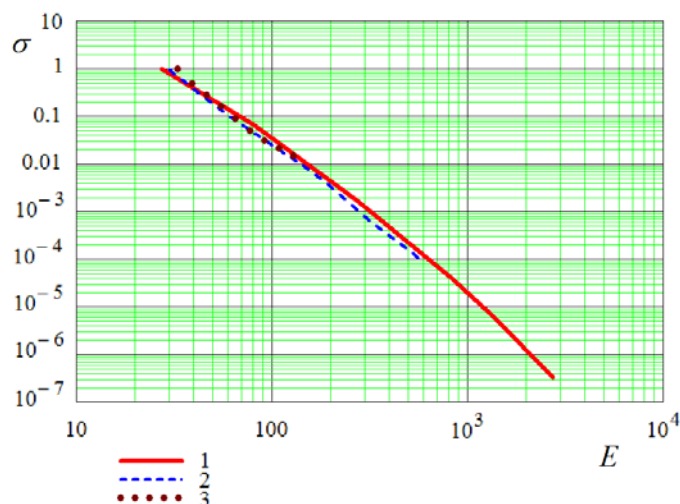


Figure 1. H_2^+ photoionization cross section σ (Mb) dependence on photon energy E (eV). Line 1 – our result, line 2 – [3], line 3 – [4]. The calculations are presented for the photon-pulse duration of $\tau \sim 1.2$ fs.

There are several works with calculations of ionization cross section for a stationary radiation with agreement of results. Our calculations are in good agreement with the data obtained by other methods. For example, in Fig. 1 our results are compared with the data of [3, 4].

REFERENCES

1. A.B. Bichkov, A.S. Kozhina, V.V. Smirnov. *Phys. Lett. A.* **380** (2016) 1263.
2. A.B. Bichkov, V.V. Smirnov. *Europ. Phys. J. D.* **69** (2015) 190.
3. J.A. Richards, F.P. Larkins. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **19** (1986) 1945.
- J. Colgan, M.S. Pindzola, F. Robicheaux. *Phys. Rev. A.* **68** (2003) 063413.

Секция 3
ДИАГНОСТИКА И
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

MODELLING OF IONNITRIDING IN HIGH-DENSITY GLOW DISCHARGE PLASMA

Хусаинов Ю.Г., Рамазанов К.Н., Муртазин Д.А., Золотов И.В.

ФГБОУ ВО «УГАТУ», Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса 12, 450008, uldash990@mail.ru

Предложена компьютерная модель, позволяющая прогнозировать распределение температурного поля и глубину диффузионного слоя при ионном азотировании в плазме тлеющего разряда повышенной плотности для деталей любой конфигурации и размеров. Проведено зондовое исследование плазмы тлеющего разряда повышенной плотности и получены распределения плотностей заряженных частиц. Исследовано влияние плазмы повышенной плотности при ионном азотировании на распределение температурного поля детали зубчатое колесо. Изучено влияние плазмы повышенной плотности при ионном азотировании на глубину упрочненного слоя для образца из стали 38ХМЮА.

A computer model is proposed that predicts the distribution of the temperature field and on nitriding in a high-density glow discharge plasma for part so many configuration and size. A problem a surements of a high-density glow is charge plasma was carried out, and distributions of charged particle densities were obtained. The influence of high-density plasma on the temperature distribution field during ion nitriding of the "cogwheel" part was investigated. The influence of high-density plasma during ion nitriding on the depth of the hardened layer for a sample of 38KhMYuA steel is studied.

Известно [1], что проведение процесса ионного азотирования в плазме тлеющего разряда повышенной плотности при проявлении эффекта полого катода (ЭПК) позволяет проводить интенсификацию процесса диффузионного насыщения азота вглубь материала. Проведение компьютерного моделирования плазмы тлеющего разряда повышенной плотности, тепловых и диффузионных процессов при ионном азотировании является актуальной задачей, поскольку в настоящее время расчет технологических режимов ионного азотирования весьма затруднен ввиду отсутствия полного описания в научной литературе физических процессов, протекающих в разряде с полым катодом, а также из-за неравномерного распределения температуры в детали в течение всего процесса упрочнения [2]. В данной работе предложена компьютерная модель, позволяющая прогнозировать распределение температурного поля и определять концентрацию насыщающего элемента по глубине диффузионного слоя при ионном азотировании в плазме тлеющего разряда повышенной плотности на примере детали зубчатое колесо из стали 38ХМЮА. Ионное азотирование проводили при $T=550^{\circ}\text{C}$, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=8$ ч. Результаты моделирования плазмы тлеющего разряда повышенной плотности позволили получить распределения плотностей заряженных частиц межкатодном пространстве, которые показали хорошую сходимость с результатами зондовых измерений. Установлено, что ЭПК позволяет повысить концентрацию ионов насыщающего элемента вблизи поверхности детали в 2-2,5 раза по сравнению с тлеющим разрядом без ЭПК.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов. *МиТОМ*. 7 (2007.) С. 25–29.
2. В.В. Будилов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, И.В. Золотов *Вестник УГАТУ* 2. (2015.) 3-8.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

MODELLING OF PLASMA OF GLOW DISCHARGE WITH HOLLOW CATHODE

¹Хусаинов Ю.Г., ¹Рамазанов К.Н., ¹Агзамов Р.Д., ¹Муртазин Д.А., ²Бекасов В.С.

¹ФГБОУ ВО «УГАТУ», Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса 12, 450008

²ФГБОУ ВО «СПбГУ», Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Университетская наб. д. 7, 199034

Предложена компьютерная модель плазмы тлеющего разряда с полым катодом. Получены распределения параметров плазмы тлеющего разряда с полым катодом по его сечению при различных напряжениях разряда от 350 до 600 В. Построены вольтамперные характеристики разрядов с полым катодом и с плоским катодом. Установлено, что ток разряда с полым катодом, образованным с помощью сетчатого экрана, в 2-2,5 раза выше по сравнению с током разряда с плоским катодом. Установлено, что в катодной полости, образованной с помощью сетчатого экрана, формируется область с плазмой повышенной плотности с максимумом концентрации ионов в центре полости, что в 1,5-2 раза выше по сравнению с концентрацией ионов у катодной поверхности в традиционном тлеющем разряде при том же давлении и напряжении разряда.

A computer model of plasma of a glow discharge with a hollow cathode is proposed. The distribution of the glow discharge with a hollow cathode plasma parameters by its cross-section at different discharge voltages from 350 to 600 V are received. Volt-ampere characteristics of discharges with a hollow cathode and a flat cathode are built. It is established that the discharge current with a hollow cathode formed by a lattice screen is 2-2.5 times higher in comparison with the discharge current with a flat cathode. It is established that in the cathode cavity formed by a lattice screen, a region with a plasma of increased density with a maximum concentration of ions in the center of the cavity is formed, which is 1.5-2 times higher than the concentration of ions near the cathode surface in a traditional glow discharge at the same pressure and discharge voltage

Известно [1], что для интенсификации процесса ионного азотирования зачастую обработку проводят в плазме тлеющего разряда с полым катодом. В настоящее время расчет технологических режимов ионного азотирования и геометрических параметров катодной полости при обработке затруднен ввиду отсутствия полного описания в научной литературе физических процессов, протекающих в разряде с полым катодом. В связи с этим исследование плазмы тлеющего разряда с полым катодом является важной задачей, решение которой позволит совершенствовать существующие и разрабатывать новые технологии, а также назначать и контролировать технологические параметры обработки. С целью определения оптимальных режимов предварительной ионной очистки и процесса азотирования, а также изучения физических процессов, протекающих в катодной полости, в данной работе было проведено компьютерное моделирование тлеющего разряда с полым катодом при различных напряжениях разряда от 350 до 600 В. Установлено, что ток разряда с полым катодом, образованным с помощью сетчатого экрана, в 2-2,5 раза выше по сравнению с током разряда с плоским катодом. Установлено, что в катодной полости, образованной с помощью сетчатого экрана, формируется область с плазмой повышенной плотности с максимумом концентрации ионов в центре полости, что в 1,5-2 раза выше по сравнению с концентрацией ионов у катодной поверхности в традиционном тлеющем разряде при том же давлении и напряжении разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. N. Ramazanov, F. Sigener, D. Loffhagen, V. V. Budilov, I. V. Zolotov. *ISDEIV 2014*. (2014) 317-320.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА
В ИМПУЛЬСНОМ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОЛЫМ КАТОДОМ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА
A STUDY OF ION CURRENT DENSITY DISTRIBUTION IN PULSED NON-
SELF-SUSTAINED LOW PRESSURE GLOW DISCHARGE WITH
HOLLOW CATHODE OF LARGE VOLUME**

Денисов В.В., Островерхов Е.В., Лопатин И.В., Ковальский С.С., Коваль Н.Н.,
Щанин П.М.

*ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, г.
Томск, пр. Академический 2/3, E-mail: volodyadenisov@yandex.ru*

Несамостоятельный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом позволяет получать концентрацию плазмы величиной 10^{18} м^{-3} с высокой равномерностью распределения в объеме камеры более 0.2 м^3 [1]. В данной работе проводится исследование влияния таких параметров импульсного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого ($\approx 0.2 \text{ м}^3$) объема, как рабочее давление, напряжение горения разряда и амплитуда тока разряда, на форму азимутальных распределений плотности ионного тока и радиальных распределений параметров плазмы (концентрация плазмы, температура электронов, потенциал плазмы). Измерения радиальных распределений параметров плазмы осуществлялись в квазистационарном режиме одиночным цилиндрическим зондом Ленгмюра при изменении рабочего давления в диапазоне (0.4 – 1) Па, при напряжениях горения разряда от 130 до 235 В и амплитудах тока тлеющего разряда от 60 до 125 А. Полученные результаты важны с точки зрения использования плазмы такого разряда для модификации поверхности материалов и изделий.

The low-pressure non-self-sustained glow discharge with the hollow cathode allows to reach a plasma density of up to 10^{18} м^{-3} with a high homogeneity of plasma density in vacuum volume more than 0.2 м^3 [1]. The influence of such parameters of pulsed non-self-sustained low-pressure glow discharge with the large ($\approx 0.2 \text{ м}^3$) volume hollow cathode as the operating pressure, the discharge voltage and the amplitude of the discharge current on the shape of the azimuthal distributions of the ion current density and radial distributions of plasma parameters (plasma density, electron temperature, plasma potential) in this work was investigated. Measurements of the radial distributions of plasma parameters was carried out in a quasi-stationary mode by a single cylindrical Langmuir probe. The operating pressure was change in the range of (0.4 - 1) Pa, the discharge voltage was change from 130 to 235 V and the amplitudes of the glow discharge current were change from 60 to 125 A. The results are important in terms of the use of plasma of such discharge for surface modification of materials and products.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Х. Ахмадеев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, С.С. Ковальский, И.В. Лопатин, П.М. Щанин, В.В. Яковлев. *Физика плазмы*. **43** 1 (2017) 63 – 70

ШИРИНА ЛИНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ, ИСПУЩЕННОГО У КАТОДА В ПЕРЕНАПРЯЖЕННОМ И КОНТРАГИРОВАННОМ РАЗРЯДЕ В H₂ И D₂

WIDTH OF THE SPECTRAL LINES EMITTED FROM CATHODE AREA IN THE OVERVOLTAGE AND CONSTRICTED DISCHARGE IN H₂ AND D₂

Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафиков А.Г.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.
karalnik_vb@triniti.ru

Измерены ширина и форма спектральных линий серии Бальмера, испускаемых из катодной области разряда в H₂ и D₂ в перенапряженном и контрагированном режимах.

Experimental data on width of the spectral lines emitted from the cathode region in the overvoltage and constricted discharge in narrow gap in H₂ and D₂ are presented in this report.

Измерены ширина и форма спектральных линий серии Бальмера, испускаемых из катодной области разряда в H₂ и D₂ в коротком межэлектродном промежутке в сильно перенапряженном режиме, используемом для генерации пучка электронов, и в низковольтном режиме с сильноточными катодными пятнами, поддерживающими искру. Уширение линий примерно одинаково в обоих режимах, но определяется различными эффектами. В высоковольтном режиме уширение линий является доплеровским, обусловленным появлением быстрых молекул за счет перезарядки ионов. В низковольтном режиме уширение является штарковским, обусловленным высокой плотностью плазмы в сильноточных катодных пятнах. Примеры измеренных спектральных линий для D₂ при P=2 Торр приведены на Рис.1. Подробная информация будет изложена в полной версии доклада.

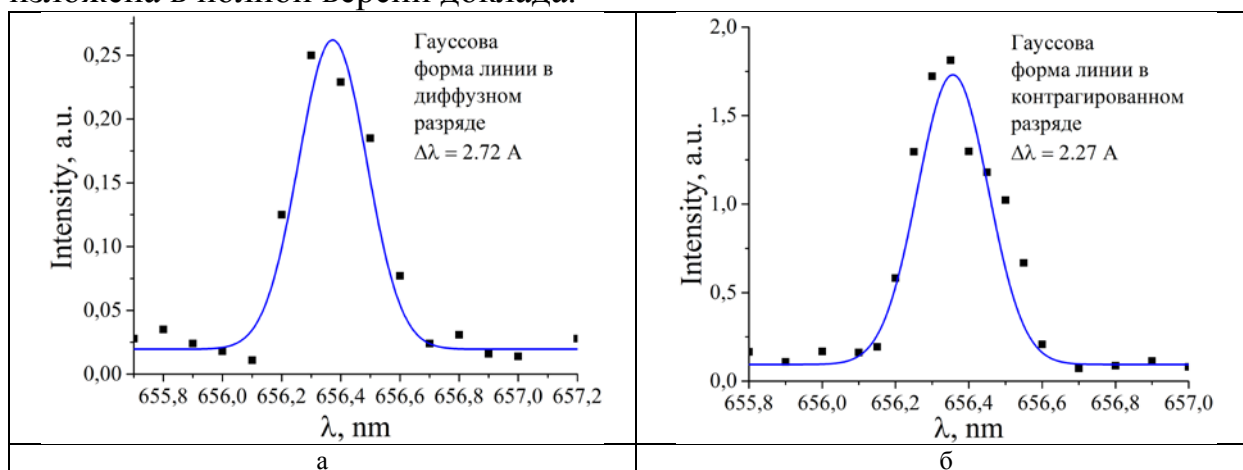


Рис. 1. Форма спектральных линий D_α в диффузном (а) и контрагированном разряде (б).

Работа выполнена при полной поддержке РФФ (грант № 16-12-10458).

ДИНАМИКА КОНТРАКЦИИ ШИРОКОАПЕРТУРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИИ В H_2 И D_2 ПРИ МАЛЫХ ДАВЛЕНИЯХ

THE CONSTRICTION DYNAMICS OF A LARGE APERTURE HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM OF MODERATE ENERGY PROPAGATING IN H_2 AND D_2 AT LOW PRESSURE

Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Медведев М.А., Петряков А.В., Трушкин Н.И.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.
karalnik_vb@triniti.ru

Представлена информация о контракции импульсного сильноточного пучка электронов с энергий до 25 кэВ, распространяющегося в H_2 и D_2 при малых давлениях.

The report presents the experimental data on constriction of the high current and moderate energy (up to 25 keV) electron beam propagating through H_2 and D_2 at low pressures.

Краткая информация по динамике контракции электронного пучка, сформированного сильно перенапряженным разрядом в D_2 , представлена ниже на Рис. 1 и 2. Подробная информация будет изложена в полной версии доклада.

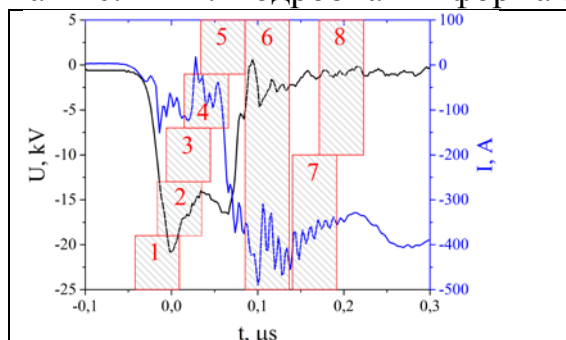


Рис.1. Осциллограммы напряжения и тока сильно перенапряженного разряда в трехэлектродной системе в D_2 при $P=2$ Торр. Прямоугольники с цифрами показывают положение во времени восьми снимков электронного пучка, представленных на Рис.2.

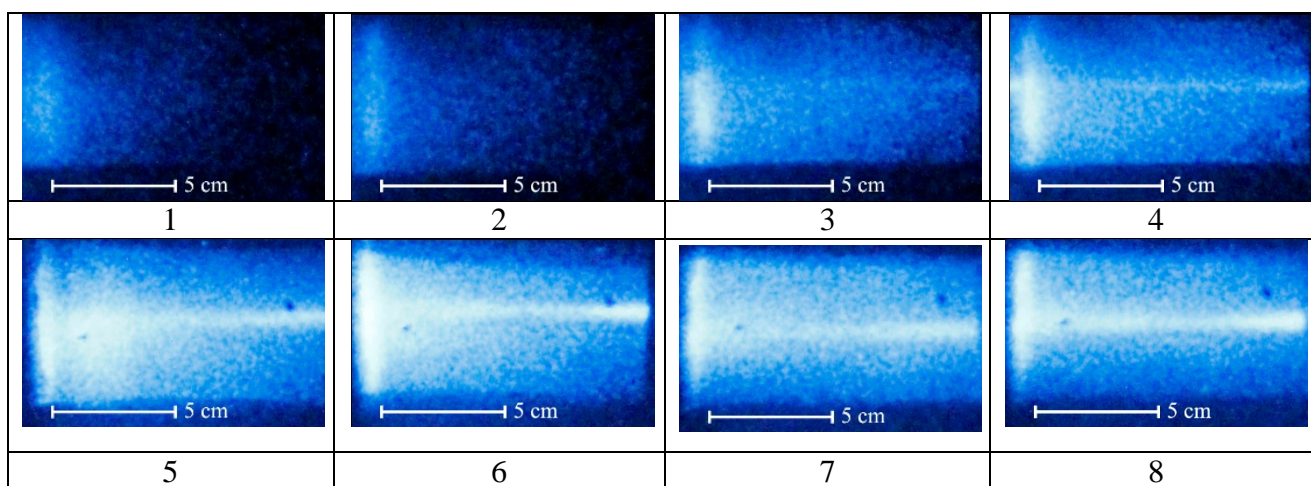


Рис.2. Развитие во времени контракции электронного пучка. Тэксп = 50 нс.

Работа выполнена при полной поддержке РФФ (грант № 16-12-10458).

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМОЙ ФОРВАКУУМНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ БЕЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

EMISSION SPECTRA AND PARAMETERS OF THE BEAM PLASMA FORMED BY A FOREVACUUM PLASMA SOURCE OF A RIBBON BEAM IN ZERO-FIELD TRANSPORTATION SYSTEM

М.И. Ломаев^{1,3}, А.С. Климов², Е.М. Окс^{1,2}, А.П. Андрейчик²

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия,*

³*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, Lomaev@loi.hcei.tsc.ru*

Проведены исследования эмиссионных спектров и параметров пучковой плазмы, формируемой форвакуумным плазменным источником ленточного электронного пучка в условиях его транспортировки без сопровождающего магнитного поля. Определены условия зажигания в области транспортировки пучка пучково-плазменного разряда, позволяющего формировать плазменное образование типа "плазменного листа" с концентрацией $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и температурой электронов 1–2.5 eV.

The emission spectra and parameters of the beam plasma formed by a forevacuum plasma source of a ribbon electron beam in the conditions of its transportation without an accompanying magnetic field have been studied. The ignition conditions in the beam transportation region of the beam-plasma discharge producing a plasma formation of the plasma sheet type with a plasma concentration of $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$ and an electron temperature of 1–2.5 eV have been determined.

Использование ленточного электронного пучка позволяет создавать пучковую плазму типа "плазменного листа" с площадью в сотни квадратных сантиметров, представляющую интерес с точки зрения ее использования в различных практических приложениях [1]. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что даже в отсутствие транспортирующего магнитного поля в области транспортировки ленточного пучка возможно зажигание плазменно-пучкового разряда, формируемого форвакуумным плазменным источником электронов. Концентрация и температура электронов в плазме разряда составляют $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и 1–2.5 eV соответственно. При этом наблюдается качественное изменение эмиссионного спектра плазмы разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Ф. Ивановский, Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНО- ДУГОВОГО РАЗРЯДА MODELING OF INTERMETALLIC COATINGS DEPOSITION PROCESS FROM VACUUM-ARC PLASMA

Варданян Э.Л., Рамазанов К.Н., Нагимов Р.Ш.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, Уфа, ул.
К.Маркса 12 к8. rustembokushisan@gmail.com

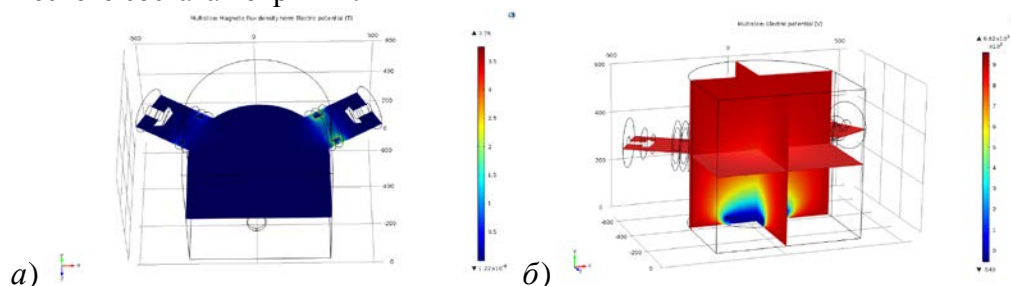
Аннотация. Исследованы физико-химические процессы протекающие в процессе осаждения интерметаллидных покрытий из плазмы вакуумно-дугового разряда. Смоделировано электростатическое поле, создаваемое в вакуумной камере подачей отрицательного потенциала смещения на обрабатываемую деталь. электромагнитных полей на ионные потоки металлов. Разработана математическая модель процесса вакуумного ионно-плазменного осаждения на основе интерметаллида системы Ti—Al с учетом влияния электростатических и электромагнитных полей на ионные потоки металлов.

Annotation. The physico-chemical processes taking place in the process of precipitation of intermetallic coatings from the vacuum-arc discharge plasma are studied. An electrostatic field created in a vacuum chamber by applying a negative bias potential to the workpiece is modeled. Electromagnetic fields on the ion fluxes of metals. A mathematical model of the process of vacuum ion-plasma deposition based on the intermetallic compound of the Ti-Al system is developed taking into account the influence of electrostatic and electromagnetic fields on ionic metal fluxes.

Покрyтия на основе интерметаллидов систем Ti-Al могут быть использованы в качестве защитных покрытий в химической промышленности, авиакосмической технике, автомобилестроении и т.д.[1]. В частности, покрытия с содержанием фаз TiAl₃+TiAl обладают хорошей коррозионной стойкостью при температурах 600-1100 °С, и могут быть применены для защиты лопаток компрессора. Для прогнозирования фазового состава и обеспечения необходимых условий при осаждении интерметаллидных покрытий целесообразно производить математическое моделирование процесса [2].

В данной работе представлены результаты разработки модели процесса осаждения интерметаллидных покрытий из плазмы вакуумно-дугового разряда на установках ННВ-6,6- И1 в среде COMSOL Multiphysics. Смоделировано электростатическое и электромагнитные поля в вакуумной камере. При помощи модуля Particle Tracing (Трассировка частиц) описаны потоки ионов металлов в вакуумной камере под действием электрических и электромагнитных полей.

В ходе расчетов было получено пространственное распределение электростатических и электромагнитных полей в вакуумной камере. Также, получено распределение химических элементов осаждаемых материалов на поверхности обрабатываемой детали для определения стехиометрического состава покрытия.



Распределение а) электромагнитных полей; б) электростатического поля.

Литература

- [1] Budilov V V, Vardanyan E L 2016 Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques Vol. 10 No 4 pp 728–731
- [2] Будилов В.В., Р.М. Киреев, И.И. Ягафаров Оценка точности деталей ГТД при ионно-плазменном нанесении покрытий Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. №2. – с.65-68

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

NUMERICAL MODELING OF ARC DISCHARGE AT LOW PRESSURES

Бекасов В.С., Варданян Э.Л., Кудрявцев А.А., Нагимов Р.Ш., Рамазанов К.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет,

Россия, Уфа, ул. К.Маркса 12 к8.

rustembokushisan@gmail.com

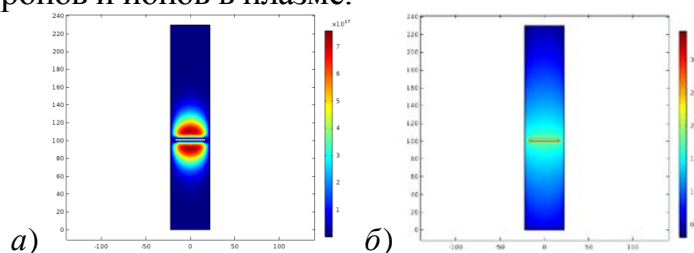
Аннотация. Разработана компьютерная модель процесса горения дугового разряда при низких давлениях порядка 3 торр. Получены распределения параметров плазмы дугового разряда низкого давления по его сечению при напряжении 30 В. Построен график распределения концентрации электронов и ионов. Построена вольт-амперная характеристика дугового разряда.

Annotation. A computer model of the arc discharge combustion process at low pressures of the order of 3 Torr is proposed. Distributions of plasma parameters of a low-pressure arc discharge arc over its cross section at a voltage of 30 V. A graph of the distribution of the concentration of electrons and ions is constructed. The volt-ampere characteristic of the arc discharge is constructed.

Изучение газовых разрядов актуально с точки зрения многочисленных применений [1]. В частности, дуговой разряд имеет большое значение в современном машиностроении. Методы численного моделирования играют важную роль при описании низкотемпературной плазмы и явлений переноса в газах, так как сложность и разнообразие происходящих в них процессов не позволяют получить их всестороннего описания обычными экспериментальными и теоретическими методами [2].

В данной работе представлены результаты двумерного моделирования параметров дугового разряда при низких давлениях с помощью расширенной газодинамической модели в среде COMSOL Multiphysics для нахождения концентрации электронов, распределения температуры электронов и потенциала. Для моделирования плазмохимических реакций были взяты энергетические распределения ионизации аргона. Расчеты были проведены для частиц Ar , Ar^+ , Ar^* .

В ходе расчетов было получено пространственное распределение некоторых параметров разряда, а именно - концентрации заряженных частиц, электрического потенциала и температуры электронов. Также, была получена характеристика распределения электронов и ионов в плазме.



Распределение а) концентрации электронов; б) температуры электронов

Литература

1. М.В. Чернышева, В.П. Марек, А.С. Чирцов, Д.А. Швагер. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. №3 (91)
2. С.И. Елисеев, В.И. Демидов, А.С. Чирцова, В.И. Колобов, А.А. Кудрявцев, Е.А. Богданов. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. №5 (93)

DYNAMICS OF SUBNANOSECOND BREAKDOWN OF HIGH-PRESSURE GASES

N.Yu. Babaeva and G.V. Naidis

Joint Institute for High Temperatures Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
nybabaeva@gmail.com, gnaidis@mail.ru

Recent results on computational study of subnanosecond discharge formation are presented. Their comparison with available experimental data is given. The effects of various factors governing the discharge characteristics are discussed.

Pulsed discharges in high-pressure gases are of considerable interest as sources of non-equilibrium plasma for various technological applications: pollution control, pumping of laser media, plasma assisted combustion, etc. Discharge development typically proceeds via the stage of formation near stressed electrodes and propagation inside the gap of ionization waves – streamers. The growth of front steepness supplies conditions when streamer formation occurs at strong overvoltages, resulting in generation of wide plasma channels, with radii of several millimeters [1-3]. Such plasma structures, similar to glow discharges, are of interest to applications due to quasi-uniformity of plasma parameters in relatively large gas volumes. The specific features of subnanosecond ionization waves are extremely high propagation velocities and large currents. Very high electric fields at the stressed electrodes and in the ionization wave fronts often lead to generation of runaway electrons and x-rays.

In this talk, results of numerical simulations of the development of subnanosecond discharges are discussed. Calculated spatial-temporal profiles of plasma parameters during streamer propagation are presented. A comparison of numerical data with results of experimental study is given. The efficiency of subnanosecond discharges for production of reactive species is evaluated. The effects of variation of applied voltage pulse parameters (voltage rise time, polarity, etc.) on discharge characteristics are considered. Possible role of runaway electron beams and x-rays in the process of discharge formation is discussed.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under Grant 17-52-16002.

REFERENCES

1. D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** (2015) 3808
2. P. Tardiveau, L. Magne, E. Marode, K. Ouaras, P. Jeanney, B. Bournonville. *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016) 054005
3. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis. *Phys. Plasmas* **23** (2016) 083527

SIMULATION OF PREBREAKDOWN PROCESSES IN DIELECTRIC LIQUIDS

G.V. Naidis

Joint Institute for High Temperatures Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
gnaidis@mail.ru

Results on simulation of streamer dynamics in dielectric liquids are discussed. The model describing the streamer dynamics accounts phase transition - formation of expanding gaseous channels behind streamer heads, due to Joule heating and vaporization of the liquid.

Numerous experimental studies of prebreakdown processes in dielectric liquids have shown that the character of these processes varies substantially depending on the liquid nature, on the discharge gap length and configuration, on hydrostatic pressure, on the duration, polarity and amplitude of applied voltage pulses, etc. [1,2]. While at application of very short (subnanosecond) voltage pulses formation of ionization waves – streamers and their propagation leading to breakdown occurs due to ionization processes in liquid state, at longer pulses the discharge development usually includes the stages of formation of bubbles and propagation of gaseous filaments. Formation, inside liquids, of low-density regions (bubbles or micropores) at application of voltage pulses can be caused by the electrostriction effects or by heating of the liquid (due to Joule energy input) and its vaporisation. The first mechanism can be effective in liquids with high dielectric constants, such as water. In hydrocarbon liquids, with low dielectric constants, the second mechanism is expected to be dominating.

In this talk, a model of streamers in liquids, based on approach developed in [3,4], is presented. It accounts both electron impact ionization in liquid phase, occurring in the streamer front region, and formation of a gaseous channel behind the streamer front. The dynamics of plasma inside gaseous channels during streamer propagation is analyzed. Results of numerical simulation of streamer dynamics in hydrocarbon liquids are compared with available experimental data.

The work was supported by the Russian Science Foundation under Grant 14-12-01295.

REFERENCES

1. V.Ya. Ushakov, V.F. Klimkin, S.M. Korobeynikov. *Impulse Breakdown of Liquids*. Springer, Berlin, 2007
2. O. Lesaint. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** (2016) 144001
3. G. V. Naidis. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (2015) 195203
4. G. V. Naidis. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** (2016) 235208

**MODELLING AND CHARACTERIZATION OF ELEMENTARY
MICROWAVE PLASMA SOURCES AT MEDIUM PRESSURE (1 TO 50
TORR) FOR HIGH RATE DEPOSITION.**

Ortega A.M.¹, Bes A.¹, Bechu S.¹, Lacoste A.²

¹*LPSC*

²*University Grenoble-Alpes*

The 2D and 3D distribution of a set of elementary plasma sources enables its use in large area deposition and etching processes. The use of such sources at medium pressure requires both an impedance matching between the plasma and the source and a uniform plasma distribution. In this work the modelling techniques are employed to study and design plasma sources for medium pressure. Experimental characterization of different source geometries are used to validate the models.

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ ВОЛНЫ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ВДОЛЬ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ
СТРУИ, С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИКА И МЕТАЛЛА**

**INTERACTION OF THE IONIZATION WAVE PROPAGATING ALONG
HELIUM PLASMA JET WITH A DIELECTRIC AND METAL SURFACE**

Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Медведев М.А., Петряков А.В., Трушкин Н.И.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.
shurik_na@bk.ru

Аннотация. В докладе представлены результаты по скорости распространения ионизационной волны по плазменной струе гелия и по ее взаимодействию с препятствиями.

Abstract. This report presents the results on the velocity of the ionization wave propagating along helium plasma jet and its interaction with the surface of dielectric and metal substrate.

По плазменной струе, выходящей из цилиндрического барьерного разряда в потоке He, распространяется ионизационная волна, которая поддерживает и подсвечивает неравновесную плазму в струе. Скорость распространения этой волны и характер ее взаимодействия с препятствием зависят от проводимости материала препятствия. Рис.1 и Рис.2 кратко демонстрируют указанную зависимость. Подробные результаты будут изложены в полной версии доклада.

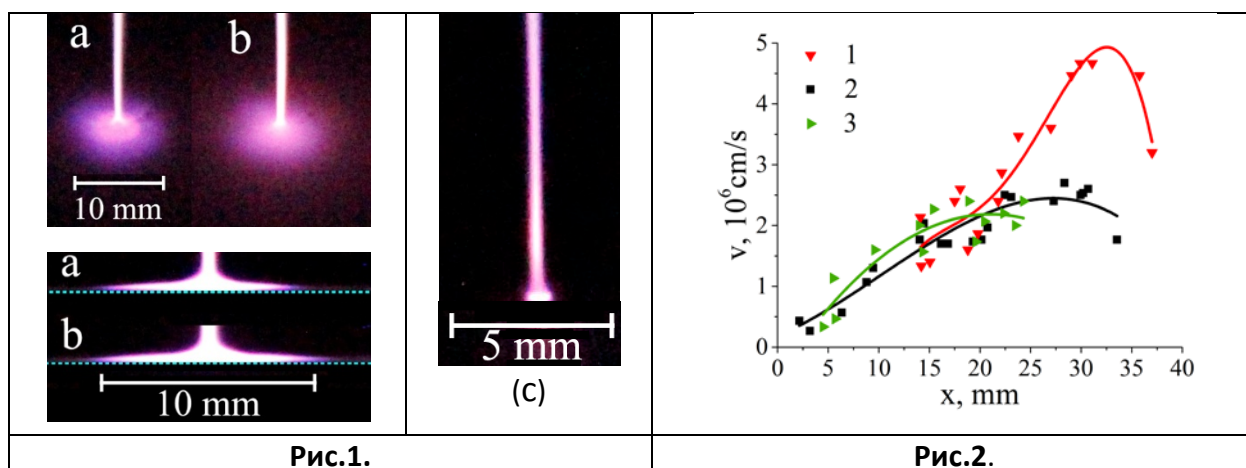


Рис.1.

Рис.2.

Рис.1. Вид плазменной струи и плазменного пятна на керамической пластине с незаземленной (а) и заземленной (b) металлизацией на ее обратной стороне и на металлической пластине (с). Вверху: вид (а) и (b) под 45° к поверхности; внизу и справа: вид (а), (b) и (с) вдоль поверхности. Амплитуда напряжения 3.0 кВ. Мощность разряда 3.4 Вт (а), 4.8 Вт (b) и 3.7 Вт (с).

Рис.2. Скорость ионизационной волны вдоль свободной плазменной струи (1) и вдоль струи, падающей на металл (2) и диэлектрик (3).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00234).

ФОРМА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПРИ ЕЕ СТОЛКНОВЕНИИ С НЕПОДВИЖНОЙ И ДВИЖУЩЕЙСЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

THE SHAPE OF PLASMA JET UNDER STRIKING INTO STATIC AND MOVING THE DIELECTRIC AND METALLIC SUBSTRATE

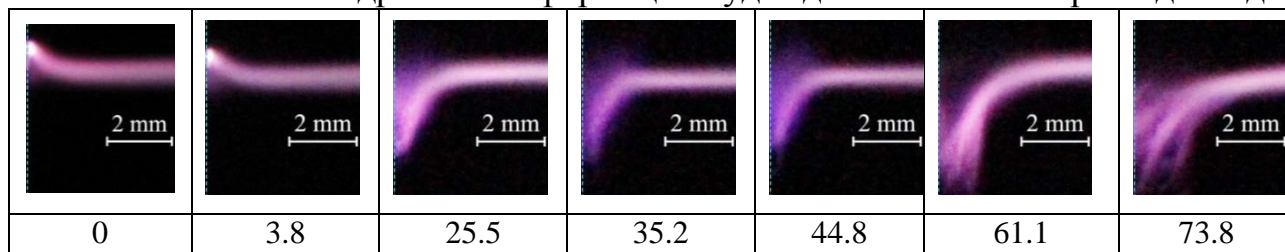
Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафиков А.Г.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12.
<shurik_na@bk.ru>

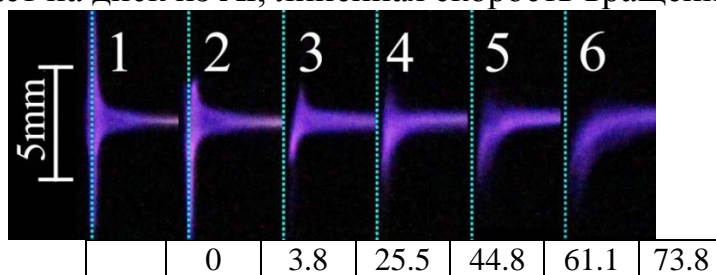
Аннотация. Показано, что изменение формы плазменной струи, падающей на быстро движущуюся поверхность диэлектрика/металла, обусловлено увлечением газа поверхностью.

Abstract. It is proved that the change of the shape of plasma jet striking into a moving dielectric and metal substrate happens due to dragging of gas by the fast moving surface.

Поверхность, быстро движущаяся в неподвижном воздухе, вовлекает в движение пристеночный слой газа, который может оказывать существенное влияние на форму плазменной струи при ее взаимодействии с движущейся поверхностью. Данный вопрос исследован на примере взаимодействия плазменной струи с вращающимся диском из алюминия и оргстекла. Изменение формы струи плазмы, созданной барьерным разрядом в гелии, показано на Рис.1. Подробная информация будет дана в полной версии доклада.



а) Струя падает на диск из Al; линейная скорость вращения направлена вниз.



б) Плазменная струя направлена на вращающийся диск из оргстекла;

Рис.1. Вид (сбоку) плазменной струи в месте падения на вращающийся диск. Скорость струи 28 м/с; мощность разряда 3.6 Вт; время экспозиция 0.75 мс; числа под каждым фото - линейная скорость диска в м/с в месте падения струи. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00234).

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПЛАЗМЫ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВЕЙКА ЗА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

Г.И. Сухинин, М.В. Сальников, А.В. Федосеев, А.М. Ростом.

СО РАН, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 1, 630090, sukhinin@itp.nsc.ru

Абстракт: В данной работе методами самосогласованного численного моделирования рассмотрено влияние внешнего электрического поля на систему «пылевая частица - ионное облако» для различных параметров пылевой частицы и средних длин свободного пробега ионов для процесса резонансной ион - нейтральной перезарядки.

Параметры вокруг пылевой плазмы, как во внешнем поле, так и в потоке плазмы с заданной скоростью традиционно моделируются двумя основными численными методами LR (Linear Response)[1] и PIC (“particle – in – cell”)[2]. Однако, в большинстве работ, использующих эти методы, влиянием размера на заряд пылевой частицы обычно пренебрегают, считая либо частицу точечной, либо заряд постоянным [3]. В данной работе продемонстрирован новый самосогласованный метод определения параметров плазмы итеративным образом с использованием разложения уравнения Пуассона по полиномам Лежандра. Заряд на пылевой частице рассчитывался из потоков ионов и электронов на её поверхность. Во внешнем поле за пылевой частицей образовывается положительный потенциальный пик. Показано, что сначала, с увеличением внешнего поля его максимум растёт линейно, а затем выходит на «режим насыщения». Максимумы данного пика в «режиме насыщения» почти пропорциональны радиусу пылевой частицы.

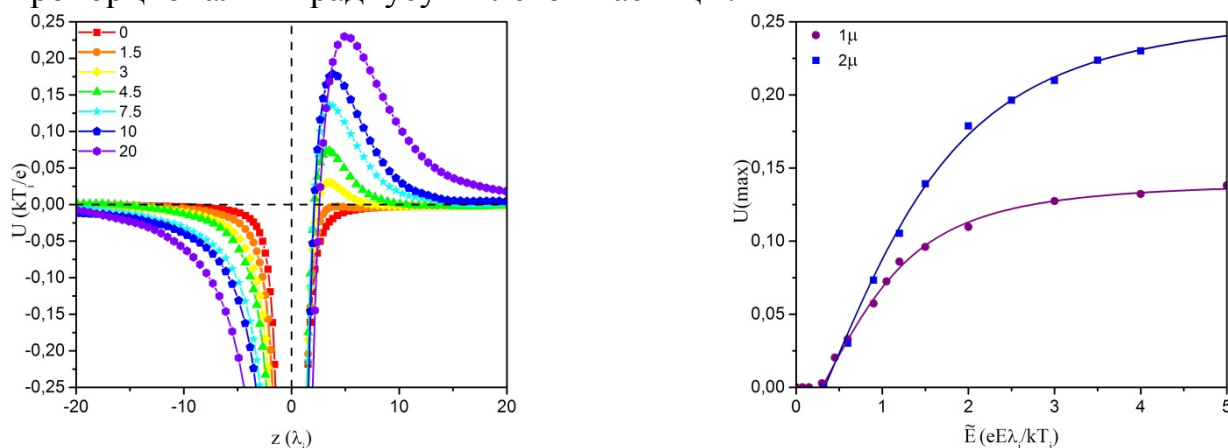


Рис 1. (слева) Пространственное распределение потенциала вблизи пылевой частицы для разных внешних полей. (справа) Максимумы потенциального пика от внешнего поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. L. Dewar and D. Leykam, Plasma Physics and Controlled Fusion **54**, 014002 (2012).
2. I. H. Hutchinson and C. Haakonsen, Physics of Plasmas **20**, 083701 (2013)
3. P. Ludwig, W. J. Miloch, H. Khlert, and M. Bonitz, New Journal of Physics **14**, 053016 (2012).

ВЛИЯНИЕ СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

EFFECT CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS OF A GLOW DISCHARGE

Вафин Р.К.¹, Ягафаров И.И.¹, Хусаинов Ю.Г.¹, Песин А.М.², Пустовойтов Д. О.²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет,
450000, Россия, Уфа, ул. Карла Маркса, 12, vafinrk@mail.ru

²Магнитогорский Государственный Технический университет им. Г. И.
Носова, 455023, Россия, Магнитогорск, проспект Ленина, 38,
pustovoitov_den@mail.ru

Аннотация. Исследован новый способ обработки в плазме тлеющего разряда в скрещенных электрических и магнитных полях, позволяющий интенсифицировать процесс диффузионного насыщения поверхности азотом. Получены вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в скрещенных электрических и магнитных полях. Изучено влияние ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях на твердость и структурно-фазовый состав инструментальных сталей Р6М5 и Х12.

Abstract: A new method of processing in a glow discharge plasma in crossed electric and magnetic fields is investigated. This method makes it possible to intensify the process of diffusion saturation of the surface with nitrogen. Volt-ampere characteristics of a glow discharge in crossed electric and magnetic fields are obtained. The effect of ion nitriding in crossed electric and magnetic fields on the hardness and structural-phase composition of tool steels Р6М5 and Х12 is studied.

Визуальная картина свечения тлеющего разряда в скрещенных электрических и магнитных полях соответствует общепринятому определению [1] и характеризуется ярковыраженным свечением тороидальной формы, расположенным вблизи катода, при этом дрейфовая область остается практически темной. С уменьшением давления вольт-амперные характеристики (ВАХ) сдвигаются в область больших рабочих напряжений, за счет уменьшения концентрации заряженных частиц. Увеличение времени пребывания электронов в плазме тлеющего разряда при размещении катода в магнитном поле, способствует смещению ВАХ вверх. Анализ результатов измерения микротвердости поверхности образцов из стали Р6М5 и Х12 показал, что ионное азотирование в скрещенных электрических и магнитных полях приводит к увеличению поверхностной микротвердости от 3300 до 21000 МПа для стали Х12 и от 4150 до 19500 МПа для Р6М5.

При азотировании в плазме тлеющего разряда с наложением магнитного поля стали Р6М5 в течение 4 ч. формируется упрочненный слой толщиной 200 мкм. Известно [2], что толщина упрочненного слоя после традиционного ионного азотирования в течение 40 мин составляет 10-12 мкм. Увеличение толщины упрочненного слоя характеризует кинетическую эффективность процесса ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин А.Г., Язов Г.К., Карасев Б.Е., Ю.С.Елисеев, В.В.Крымов *Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей* / М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.
2. Белый А.В., Кукареко В.А. Структурное состояние и износостойкость модифицированных ионами азота хромистых сталей *Физика металлов и металловедение*, Т. 104, № 6, (2007) с. 641-649

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ION NITRIDING IN GLOW DISCHARGE PLASMA

Вафин Р.К.¹, Швеёва Т. В.², Асылбаев А.В.¹, Мухаметов Р.И.¹, Николаев А.А.¹

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000, Россия, Уфа, ул. Карла Маркса, 12, vafinrk@mail.ru

²Набережночелнинский институт Казанского федерального университета, 423812, г. Набережные Челны, д. 68/19 chelny@kpfu.ru

Аннотация. Исследованы вольтамперные характеристики тлеющего разряда в скрещенных электрических и магнитных полях полученные в среде Ar и смеси N_2 75% + Ar 20% + C_2H_2 5% при давлениях 5 Па и 100 Па.

Abstract: Volt-ampere characteristics of a glow discharge in crossed electric and magnetic fields were obtained in Ar 100% and N_2 75% + Ar 20% + C_2H_2 5% mixture at pressures of 5 Pa and 100 Pa.

Одной из основных характеристик тлеющего разряда в скрещенных электрических и магнитных полях является ВАХ. Существенное влияние на нее оказывают рабочее давление и индукция магнитного поля [1,2]. На рис. 1 представлены ВАХ разряда, полученные при различных давлениях Ar в камере. С уменьшением давления ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений, за счет уменьшения концентрации заряженных частиц. Увеличение времени пребывания электронов в плазме тлеющего разряда при размещении катода в магнитном поле, способствует смещению ВАХ вверх (рис. 1). ВАХ разряда в скрещенных электрических и магнитных полях в отличие от традиционной схемы имеет более крутой подъем, что указывает на эффективность процессов ионизации.

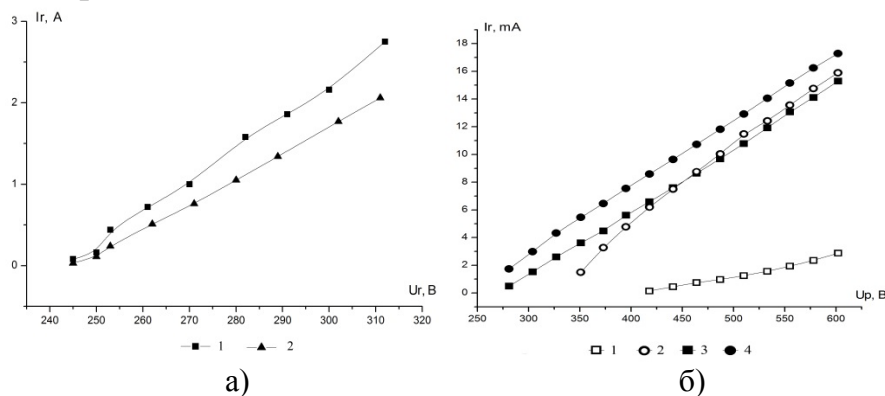


Рис. 1. ВАХ тлеющего разряда при различных давлениях смесь N_2 75% + Ar 20% + C_2H_2 5% : а) - 100 Па (1 - в магнитном поле; 2 - без магнитного поля); б) - 5 Па (1 - без магнитного поля; 2 - с магнитным полем) и 15 Па (3 - без магнитного поля; 4 - с магнитным полем)

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев А. А., Сочуглов Н. С., Оскомов К. В., Работкин С. В. Исследование характеристик плазмы несбалансированной магнетронной распылительной системы *Физика плазмы* Т. 35 № 5 (2009) с. 443-452
2. Будилов В.В., и др. Использование разряда с полым катодом для обработки поверхности конструкционных материалов *Физика и химия обработки материалов*. №2 (2001) с. 31-35

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСКУЛЯРНОЙ ЭМИССИИ ИЗ ПЕННИНГОВСКИХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

THE DEFINITION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE CORPUSCULAR EMISSION FROM A PENNING ION SOURCES

Садилкин А.Г., Прохорович Д.Е.

*ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Россия, г. Москва 127055 Суцеская ул., д.22
E-mail: vnii4@vnii.ru*

Аннотация: В данной работе представлены результаты регистрации функций распределения ионов, эмитированных из плазменных источников (ПИ) пеннинговского типа, по направленным скоростям (по соответствующим компонентам энергий).

Abstract: In this paper presents the results of the registration of the distribution functions of the ions emitted from plasma sources penning type, in the direction of the velocity (for the respective components of the energy).

В основе примененного способа измерений лежит метод задерживающего потенциала [1], адаптированный к использованию в отпаянных малогабаритных линейных ускорителях (задерживающее поле создают конструкционные элементы ионно-оптической системы ускорителя), составной частью которых и является ПИ пеннинговского типа [2].

Исследованиям в данной работе были подвергнуты различные конструкции пеннинговских ПИ. В качестве рабочего газа в ПИ использовалась смесь тяжелых изотопов водорода – дейтерия и трития при давлении $\sim 10^{-4} - 10^{-2}$ Тор. Напряжение горения разряда составляло 1 – 3 кВ, при этом ток разряда достигал величины $\sim 0,5$ мА [3].

Получена информация о величине направленных (вдоль оси разряда) скоростей частиц в плазменном потоке из ПИ, их средней энергии и степени моноэнергетичности в зависимости от давления рабочего газа в системе, напряжения горения разряда в ПИ и конструкции его электродной системы. Результаты, полученные в ходе эксперимента, явились исходными данными для проектирования ионно-оптических систем на базе ПИ пеннинговского типа.

Подход, реализованный в данной работе, позволяет проводить измерения в том числе при использовании радиоактивных газов в качестве рабочих без нанесения вреда окружающей среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме // М., Атомиздат, 1969.
2. Кирьянов Г.И. Генераторы быстрых нейтронов // Энергоатомиздат, 1990.
3. Садилкин А.Г., Прохорович Д.Е. и др. Комплексный подход в изучении динамики корпускулярного пучка в ионно-оптической системе нейтронной трубки // Успехи прикладной физики. – 2014. - том 2, № 3. - С. 267 – 272.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В ПЛАЗМЕ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

INTERACTION OF SPHERICAL CHARGED DUST PARTICLES IN PLASMA AT STRONG SCREENING REGIME

Филиппов А.В., Дербенев И.Н., Паутов А.А., Родин М.М.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской
федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований», Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12,
fav@triniti.ru*

Изучено взаимодействие заряженных диэлектрических макрочастиц сферической формы в равновесной плазме или электролите в режиме сильного экранирования в случае, когда при изменении межчастичного расстояния остаются постоянными заряды макрочастиц и в случае, когда остаются постоянными потенциалы поверхности макрочастиц.

The electrostatic interaction between charged dielectric macroparticles of spherical shapes at strong screening in an equilibrium plasma or electrolyte is studied. A case of constant charges and a case of constant surface potentials are considered.

В работах [1,2] было рассмотрено взаимодействие двух заряженных диэлектрических макрочастиц в равновесной плазме с учетом эффектов экранирования. Для случая, когда при изменении расстояния между макрочастицами остаются постоянными заряды макрочастиц, в работе [1] было предложено использовать более точные расчеты взаимодействия в однородном диэлектрике с использованием бисферической системы координат [3], с последующим введением поправки, учитывающий эффекты экранирования на больших расстояниях между макрочастицами. Такая процедура позволила посчитать силу взаимодействия макрочастиц с высокой точностью в режимах слабого и умеренного экранирования. В электролитах или в пылевой термической плазме макрочастицы находятся в термодинамическом равновесии, поэтому в процессе сближения макрочастиц остаются постоянными (и равными в однородном электролите) электростатические потенциалы их поверхностей. В этом случае использование расчетов [3] оказалось возможным только в случае слабого экранирования. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия макрочастиц в режиме сильного экранирования при постоянных зарядах и исследованию взаимодействия при постоянных потенциалах поверхности.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 16-12-10424.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Филиппов, И.Н. Дербенев. ЖЭТФ **150** (2016) 1262.
2. I.N. Derbenev, A.V. Filippov, A.J. Stace, E. Besley. J. Chem. Phys. **145** (2016) 084103.
3. А.В. Филиппов. ЖЭТФ **136** (2009) 601; A.V. Filippov. Contr. Plasma Phys. **49** (2009) 433; В.Р. Муниров, А.В. Филиппов, ЖЭТФ **144** (2013) 931.

ДИАГНОСТИКА 3D СТРУКТУРЫ ТОКОВ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ХВОСТОВОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

DIAGNOSTICS OF THE 3D STRUCTURE OF CURRENTS IN CURRENT SHEETS AND MODELLING PROCESSES IN THE TAIL REGION OF THE EARTH'S MAGNETOSPHERE

Франк А.Г.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия 119991, Москва,
ул. Вавилова д. 38, annfrank@fpl.gpi.ru*

В работе определена структура продольных и поперечных токов в токовых слоях, формируемых в магнитных конфигурациях с X линией.

In this work we have determined the structure of both the longitudinal and transverse currents in the current sheets formed in magnetic configurations with an X line.

Традиционно считается, что токовый слой представляет собой тонкий «ленточный ток», служащий границей раздела магнитных полей противоположных направлений [1]. Однако реальные токовые слои – это динамические объекты с интенсивными течениями плазмы, быстрыми изменениями магнитных полей, возбуждением электрических полей и токов, направления которых могут отличаться от направления основного тока в слое. В процессе развития токового слоя возможны изменения продольной компоненты магнитного поля, как в результате усиления этой компоненты в слое, так и за счет эффекта Холла [2]. При этом в плазме должны возбуждаться токи в поперечной плоскости по отношению к основному току. В работе проведен детальный анализ структуры продольных и поперечных токов в токовых слоях, которые формировались в магнитных конфигурациях с особой линией X типа. Эксперименты проводились на установке ТС-3D (ИОФ РАН), магнитная структура исследовалась с помощью системы зондов, затем рассчитывались распределения плотности тока [3]. Установлено, что наряду с основным (продольным) током возникают поперечные токи; получены соотношения между этими токами в зависимости от конфигурации исходного магнитного поля. Рассчитаны углы отклонений суммарных токов от направления продольного тока и определена структура суммарных токов в различных условиях. Из сопоставления результатов лабораторных экспериментов с данными спутниковых наблюдений в хвостовой области магнитосферы Земли [4] следует, что поперечные токи должны вносить заметный вклад в динамику магнитосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.I. Syrovatskii. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **19** (1981) 163.
2. А.Г. Франк. *УФН* **180** (2010) 982.
3. А.Г. Франк, С.Н. Сатунин. *Физика плазмы* **33** (2011) 889.
4. А.Г. Франк, А.В. Артемьев, Л.М. Зеленый. *ЖЭТФ* **150** (2016) 807.

КИНЕТИКА ЗАСЕЛЕНИЯ ТРИПЛЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЫ ВОДОРОДА В ЭЦР РАЗРЯДЕ

THE KINETICS OF HYDROGEN TRIPLET STATES Population in ECR DISCHARGE

Шахатов В.А., Лебедев Ю.А., *Lacoste A., *Bechu S.

ИНХС РАН, Россия, Москва, Ленинский пр. 29, e-mail: shakhatov@ips.ac.ru,
lebedev@ips.ac.ru

*LPSC, Universite Joseph Fourier Grenoble 1, CNRS/IN2P3, Grenoble INP, 53,
Avenue des Martyrs, 38026 Grenoble, France, e-mail: bechu@ips.in2p3.fr,
ana.lacoste@ujf-grenoble.france

The applicability of plasma diagnostics of ECR-discharges by emission of triplet electron-excited states of hydrogen molecules was analyzed on the base of the level-to-level semi-empirical collisional-radiative model. One of the main results is that often used emission of $d^3\Pi_u$ -state can not be applied for diagnostic of these discharges in the frame of simple coronal model.

На основе уровневой столкновительно-излучательной модели исследована возможность использования излучения триплетных состояний водорода в ЭЦР-разряде для диагностики плазмы.

Уровневая столкновительно-излучательная модель плазмы использована для анализа применимости спектральных методов диагностики ЭЦР-разрядов по излучению триплетных состояний молекулы водорода ($N^3\Lambda_\sigma = a^3\Sigma_g^+, c^3\Pi_u, d^3\Pi_u, e^3\Sigma_u^+, f^3\Sigma_u^+, g^3\Sigma_g^+, h^3\Sigma_g^+, i^3\Pi_g, k^3\Pi_u$ и $r^3\Pi_g$). В расчетах использовались экспериментальные двухтемпературные ФРЭЭ с группами «холодных» (T_e^c, n_e^c) и «горячих» (T_e^h, n_e^h) электронов. Исходными параметрами в модели являлись температура газа 400-600 К, давление газа $(0.25-0.96)\times 10^{-2}$ Тор, концентрации электронов $n_e^c = (0.13-2.3)\times 10^{10}$ см⁻³, $n_e^h = (0.3-0.8)\times 10^{10}$ см⁻³ и температуры электронов $T_e^c = 0.6-2.0$ эВ, $T_e^h = 2.0-6.0$ эВ при процентном содержании атомарного водорода 4.0%. Показано, что механизм заселения триплетных состояний зависит от времени пребывания газа в разряде. Время релаксации заселенностей состояний $N^3\Lambda_\sigma$ изменяется от 10^{-6} до 0.2 с. Концентрации $H_2(N^3\Lambda_\sigma)$ принимают значения $1.7\times 10^4-8.2\times 10^7$ см⁻³. Распределение заселенностей состояний $N^3\Lambda_\sigma$ отличается от больцмановского. Показано, что вторичные процессы дают наибольший вклад в рождение и гибель состояний $a^3\Sigma_g^+, c^3\Pi_u, d^3\Pi_u, e^3\Sigma_u^+, g^3\Sigma_g^+, h^3\Sigma_g^+, i^3\Pi_g$ и $r^3\Pi_g$. Состояние $d^3\Pi_u$ нельзя использовать для диагностики разряда. Наименьший вклад вторичные процессы дают в образование и гибель состояний $f^3\Sigma_u^+$ и $k^3\Pi_u$. Дипольные переходы $f^3\Sigma_u^+ \rightarrow a^3\Sigma_g^+, g^3\Sigma_g^+$ и $k^3\Pi_u \rightarrow a^3\Sigma_g^+$ могут применяться для диагностики плазмы. Процессы с участием $H_2(X^1\Sigma_g^+, v=1-4)$ могут давать вклад в кинетику возбуждения триплетных состояний $c^3\Pi_u, d^3\Pi_u, e^3\Sigma_u^+, h^3\Sigma_g^+, i^3\Pi_g$ и $r^3\Pi_g$ при колебательных температурах основного состояния ~ 3000 К.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №15-08-00070.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ВЧ-ПЛАЗМЫ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

A MATHEMATICAL MODEL OF RF PLASMA FLOW AT LOW PRESSURES

А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, ул. Кремлевская, 18, Казань, shemakhin@gmail.com
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, ул. К.Маркса, 68, Казань, vzheltukhin@gmail.com*

Для исследования процессов в вакуумной камере ВЧ-плазменной установки создана гибридная математическая модель, включающая кинетическое уравнение Больцмана для несущего газа и уравнения неразрывности для частиц плазмы, электронной температуры и электромагнитного поля.

A hybrid mathematical model is developed to study the processes in the vacuum chamber of the RF plasma equipment. The model includes Boltzmann's kinetic equation for the carrier gas and the continuity equations for plasma particles, electron temperature, and the electromagnetic field.

Плазма ВЧ индукционных разрядов пониженного давления (5–150 Па) применяется для модификации различных материалов: диэлектрических, проводящих, полупроводниковых [1]. Плазма, образованная данным видом разряда, характеризуется следующими параметрами: степень ионизации 10^{-7} – 10^{-5} , концентрация электронов $n_e=10^{15}$ – 10^{19} м⁻³, электронная температура $T_e=1$ –4 эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке $T_a=(3-4) \cdot 10^3$ К, в струе $T_a=(3.2-10) \cdot 10^2$ К.

Для исследования процессов в вакуумной камере ВЧ-плазменной установки создана математическая модель на основе кинетической модели для несущего газа и уравнений неразрывности для электронов, метастабильных атомов и электромагнитного поля.

Для реализации модели разработан гибридный численный метод, который включает в себя модифицированный метод Г.Бёрда для несущего газа [2,3] и метод конечных объемов для заряженной компоненты, метастабильных атомов и электромагнитного поля. Метод реализован с помощью библиотек пакета OpenFOAM [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-31-60081.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин И.Ш. и др. *Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления*. - Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007.- 356 с.
 2. Берд Г.А. *Молекулярная газовая динамика*. М.:Мир, 1981.
 3. Zheltukhin, V. S., and A. Yu Shemakhin. *Mathematical Models and Computer Simulations* **6** (2014) 1 101.
- OpenFOAM : Open Source Software for CFD. <https://openfoam.org/>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКАМЕРНОЙ ФОТОПЛАЗМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

USING TWO-CHAMBER PHOTOPLASMA FOR CREATING PHOTOVOLTAIC CONVERTER

Асташкевич С.А., Богданов Е.А., Кирсанов Г.В., Кудрявцев А.А.
Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 198504
E-mail: akud53@mail.ru

В качестве фотоэлектрического преобразователя предложено использовать двухкамерную фотоплазму и проведен 2D-расчет ее параметров.

It was proposed to use a two-chamber photoplasma as a photoelectric converter and a 2D simulation of its parameters was carried out.

Фотоплазменные преобразователи солнечной энергии в электрическую [1] могут иметь преимущества по сравнению с общераспространенными полупроводниковыми солнечными батареями. Для получения максимальных значений фото-ЭДС и мощности таких преобразователей, создаваемых с использованием фотоплазмы, возбуждаемой солнечным светом, требуется создание сильно неоднородной плазмы. Такая плазма с существенными пространственными градиентами концентрации и температуры электронов может быть создана в двухкамерной ячейке [2,3]. В результате 2D симуляции в диффузном режиме ухода заряженных частиц для конической геометрии камер аналогичной [1] (см. рис.) с параметрами $L_1=10^{-3}$ (м), $R_1/L_1=1/2$, $L_2/L_1=6$ для смеси Na и Ar ($p_{Na}=0.01$ торр, $p_{Ar}/p_{Na}=100$) и максимальной скорости ионизации в первой камере 8.3×10^{-11} (м³/с) были рассчитаны параметры плазмы и получено значение ЭДС: $U_{12}=0.93$ В.

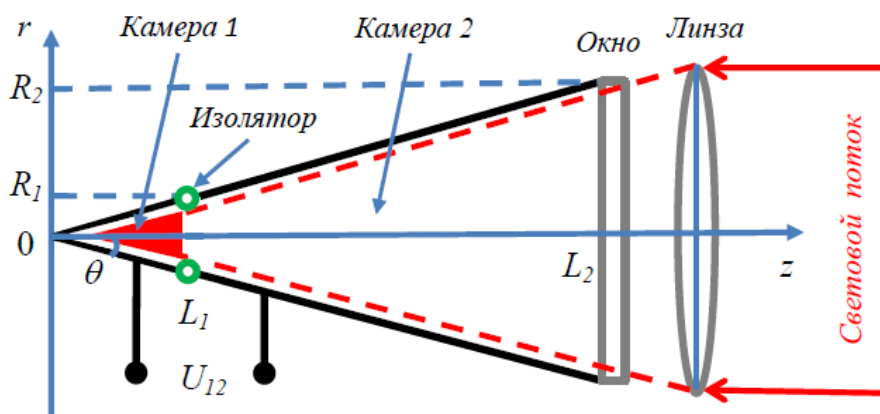


Рис. Поперечное сечение двухкамерной фотоплазменной ячейки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ 0.37.218.2016.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.J. Dunning, A.J. Palmer. *J. Appl. Phys.* **52** (1981) 7086,
2. A.A. Kudryavtsev, K.Yu. Serditov. *Phys. Plasmas.* **19** (2012) 073504.
3. E.A. Bogdanov, A.A. Kudryavtsev, Z.S. Ochikova, A.S. Chirtsov. *Tech. Phys.* **60** (2015) 1570.

АКТИНОМЕТРИЯ АТОМОВ O, N И F

ACTINOMETRY OF O, N AND F ATOMS

Волынец А. В.^{1,2,*}, Лопаев Д. В.¹, Зотович А.И.^{1,2}, Зырянов С.М.^{1,2}, Рахимов А.Т.¹

¹ НИИЯФ МГУ, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

² МГУ, физический факультет, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

* *devorum89@gmail.com*

Была исследована применимость актинометрии для измерения абсолютной концентрации атомов O, N и F в разрядах низкого давления (< 1 Торр). Для этого концентрации указанных атомов, образованных в плазме индукционного разряда, были измерены методом актинометрии и масс-спектрометрии (APMS). Сравнение результатов позволило проверить и калибровать актинометрические сечения возбуждения, а также оценить погрешность актинометрии, вызванную неточностями в форме ФРЭЭ (измеренной или рассчитанной теоретически).

Applicability of actinometry for measuring of absolute concentrations of O, N and F atoms in the low-pressure (< 1 Torr) discharge was studied. For this purpose, concentrations of mentioned atoms produced in downstream ICP plasma were measured by means of the actinometry and appearance potential mass-spectrometry (APMS). Comparison of the results allowed to verify and calibrate actinometrical excitation cross-sections as well as to estimate diagnostic's error induced by inaccuracies in (measured or calculated) EEDF.

Актинометрия это оптическая неинвазивная диагностика, позволяющая измерять концентрации атомов и молекул в различных разрядах. С помощью этой диагностики можно изучать распределение концентраций частиц по пространству, а также следить за временной динамикой концентраций частиц. Однако, точность актинометрии зависит от той точности, с которой известны необходимые спектроскопические данные, т.н. «актинометрические сечения возбуждения» и функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в плазме. В данной работе изучалась применимость актинометрии для измерения концентраций атомов O, N и F в разрядах низкого давления (< 1 Торр). Для этого концентрации указанных атомов, образованных в плазме индукционного разряда, были измерены методом актинометрии и масс-спектрометрии (APMS). Сравнение результатов обоих методов показало хорошее согласие в пределах экспериментальной ошибки для случая атомов O. Актинометрические сечения возбуждения для состояний $O(3p^3P)$ и $O(3p^5P)$ хорошо известны и протестированы во многих работах, что позволило оценить погрешность актинометрии, вызванную неточностями в форме ФРЭЭ. Все известные актинометрические сечения для состояний $N(3p^4P^o)$, $F(3p^2P^o)$ and $F(3p^4D^o)$ являются теоретическими, поэтому их точность нуждается в экспериментальной проверке. Полагая форму сечений правильной, в данной работе была проведена их калибровка путем сравнения результатов актинометрии с результатами масс-спектрометрии. Полный текст статьи доступен по ссылке ниже [1].

Работа выполнена при поддержке российского научного фонда (РНФ) грант № 16-12-10361.

1. D. V. Lopaev et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **50** (2017) 075202.

MODELING OF GLOW DISCHARGE IN A GAS FLOW

Галеев И.Г., Асадуллин Т.Я.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ, Россия, 420111, К.Маркса, 10
galeev.physics@kstu-kai.ru*

Аннотация. Плазма положительного столба разряда в потоке электроотрицательного газа описана двумерной интегро-дифференциальной системой уравнений, записанной в приближении "узкого канала». Проведено моделирование разрядных характеристик при различных граничных условиях на входе в разрядную зону и полных токах разряда.

Abstract. Discharge plasma of positive column in electronegative gas flow have been described by two-dimensional integro-differential system of equations, written in the approximation of "narrow channel». The simulation of discharge characteristics was conducted under various boundary conditions at the inlet of the discharge area, and with various full discharge currents.

В работах [1-3] предложены аналитические модели, а в [4] - численная модель плазмы положительного столба (ПС) тлеющего разряда в потоке электроположительного газа. В данной работе рассмотрена модель ПС для случая потока электроотрицательного газа. Для нее разработан эффективный алгоритм расчета электрических характеристик разряда в плоском канале малой ширины.

При моделировании плазмы электроположительного газа учет диффузии заряженных частиц обычно осуществляется введением коэффициента амбиполярной диффузии, зависящим от коэффициентов диффузии, подвижностей электронов и положительных ионов. В случае плазмы разряда в электроотрицательном газе этого сделать не удастся, концентрация отрицательных ионов может достигать значительной величины (например, в воздухе), что усложняет характер диффузии заряженных частиц к стенкам разрядной камеры, становится также заметным вклад отрицательных ионов в проводимость плазмы.

Плазма ПС разряда описана двумерной интегро-дифференциальной системой уравнений, записанной в приближении "узкого канала", включающей уравнения неразрывности для электронов и отрицательных ионов, закона Ома в дифференциальной и интегральной формах, условия квазинейтральности. Она дополнена также уравнениями неразрывности массы газа, Навье-Стокса и сохранения полной энергии.

В результате численного моделирования получены двумерные распределения электрических характеристик в разрядной зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Г. Галеев, Т.Я. Асадуллин, З.Х. Исрафилов Б.А., Тимеркаев. *Известия Вузов. "Физика"* **38 №10** (1995) 37.
2. И.Г. Галеев, Б.А.Тимеркаев. *ИФЖ* **51** (1986) 487.
3. И.Г. Галеев, Б.А.Тимеркаев. *Вестник КГТУ* **№ 2** (2000) 59.
4. И.Г. Галеев, Б.А.Тимеркаев. *ТВТ* **25** (1987) 857.

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

ELECTRIC ARC FORMATION ABOVE LIQUID METAL SURFACE

П.Г. Деревянкин^{1,2}, И.А. Пенкин^{1,2}, А.З. Сайфутдинова^{1,2},
И.Б. Клементьева³, М.Э. Пинчук^{1,2}, А.Г. Лекс¹

1 -Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук
(ИЭЭ РАН)

Россия, 191186, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, Россия

2 -Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
(СПбПУ)

Россия, 195251, Политехническая ул., д.29, Санкт-Петербург

3 -Объединенный институт высоких температур РАН
(ОИВТ РАН)

Россия, 125412, Ижорская ул., д.13, стр.2, Москва

E-mail: rc@iperas.nw.ru

В работе представлено описание установки, на которой исследуется формирование разряда над жидкометаллической поверхностью с током в цепи до нескольких килоампер. Приводятся некоторые предварительные экспериментальные результаты диагностики формирования разряда.

In the paper a description of the installation, on which the formation of the discharge over the liquid metal surface with current up to several kiloamps are exploring, is given. Some preliminary experimental results of diagnostics of the discharge formation is presented.

Мощный электрический разряд над жидкометаллической поверхностью возникает во многих технологических процессах. В этой связи изучение особенностей зажигания электрических разрядов важно, особенно применительно к системам с импульсным режимом токоподвода.

В докладе описывается экспериментальный стенд для исследования условий зажигания разряда в сильноточной системе с жидкометаллической ванной и погруженным в нее стержневым электродом. При пропускании тока большой величины поверхность жидкого металла деформируется под действием магнитных сил и происходит разрыв ее контакта со стержневым электродом с зажиганием в промежутке дуги [1,2]. Осуществляется диагностика дуговых процессов комплексом высокоскоростной диагностики, включающей в себя высокоскоростную фотосъемку, времяразрешенную спектроскопию. Ток в цепи можно изменять в диапазоне от 0.1 до 4 кА.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Б. Клементьева, М.Э. Пинчук, И.О. Тепляков. Журнал Технической Физики **86** (2016) n1 с.148-151.
2. I B Klementyeva1 and M E Pinchuk //Journal of Physics: Conference Series **774** (2016) 012188 doi:10.1088/1742-6596/774/1/012188

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ МИНИАТЮРНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА

VELOCITY MEASUREMENTS OF THE PLASMA JET FROM MINIATURE MAGNETO-PLASMA COMPRESSOR

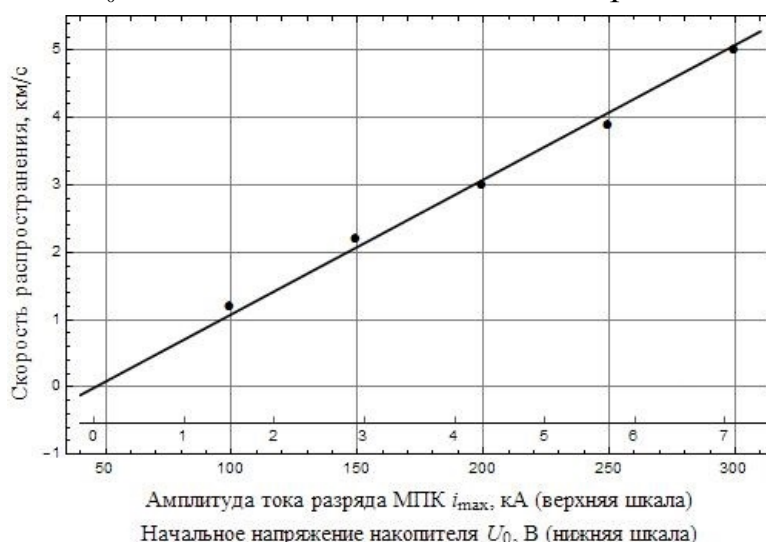
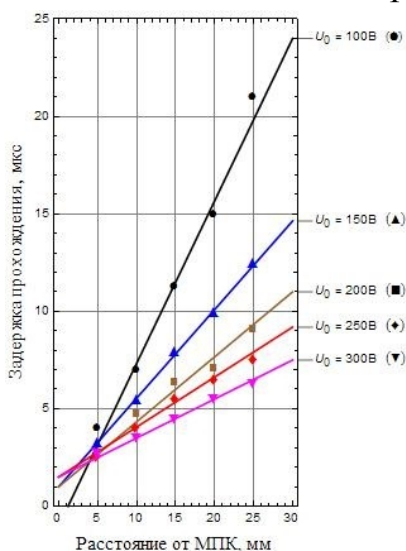
Дешко К.И. (Deshko K.), kir.deshko@gmail.com

МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1с2

Приведены результаты измерений средней скорости истечения плазменной струи, получаемой при помощи миниатюрного МПК – плазматрона с низковольтной системой питания. Показано, что скорость практически не меняется на расстоянии 5-25 мм от торца плазматрона; при увеличении амплитуды тока разряда возрастает прямо пропорционально. Измеренная скорость составила ~ 5 км/с при амплитуде тока 7 кА.

Results of the plasma jet average speed measurements are obtained using miniature magneto-plasma compressor (MPC) with low-voltage power supply system as a plasma source. It is shown that the speed remains virtually unchanged at a distance of 5-25 mm from MPC edge and increases in direct proportion to the discharge current amplitude. The measured speed value was about 5 km/s at a current amplitude of 7 kA.

В [1] описан миниатюрный магнитоплазменный компрессор (МПК) с низковольтной системой питания. В настоящей работе измерялась средняя скорость плазменной струи, создаваемой таким плазматроном в воздухе при давлении 50 Торр. Использовался метод СВЧ – зондирования ($f = 16$ ГГц), основанный на эффекте отсечки. Зонд (двухпроводная линия) устанавливался на расстоянии 5...25 мм от среза плазматрона. Измерялась задержка прохождения плазмы от МПК до зонда. Амплитуда тока разряда МПК задавалась начальным напряжением U_0 на накопительном конденсаторе.



ЛИТЕРАТУРА

1. К.И. Дешко, В.А. Черников. // *Вестник Моск. ун-та, серия 3*, 2017-1.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

A MATHEMATICAL MODEL OF LOW ENERGY ION TREATMENT OF POLYETHYLENE

В.С. Желтухин, И.А. Бородаев, А.А. Шахыров

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, ул. К.Маркса, 68, Казань, vzheltukhin@gmail.com

Для изучения низкоэнергетичной (до 100 эВ) ионной обработки полиэтилена разработана молекулярно-динамическая модель.

Molecular dynamics simulations were used to study low energy (up to 100 eV) ion treatment of polyethylene surface.

Воздействие плазмы высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного (1,33-133 Па) давления является эффективным методом гидрофилизации поверхности полиэтилена [1]. Поверхность материала модифицируется за счет воздействия потока низкоэнергетичных (30-100 эВ) ионов с плотности ионного тока 0,3-1,5 А/м². Для детального исследования механизма модификации поверхности полиэтилена в ВЧ-плазме пониженного давления создана математическая модель на основе метода молекулярной динамики [2].

Модель реализована с помощью пакета LAMMPS [3]. Использована модель объединенного атома, в которой звено -CH₂- рассматривается как одна частица. Межатомное силовое поле в полиэтилене моделировалось, используя потенциал Дрейдинга [4-6]. Взаимодействие атомов аргона с макромолекулами полиэтилена моделировалось с помощью потенциала Леннард-Джонса [7, 8]. Такая механистическая модель далека от идеала, но она достаточно адекватно описывает движения молекулярных структур, если достаточно точно вычислены силовые константы и шаг интегрирования не слишком велик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-41-02672.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kudinov, V.V., Korneeva, N.V., and Abdullin, I.Sh. *18th Intern. Conf. on Composite Materials, ICCM-18*, Jeju Island, S. Korea August 21-26, 2011.
2. Rapaport, D. C. *The Art of Molecular Dynamics Simulation*. Cambridge University Press, 2004.
3. LAMMPS Molecular Dynamics Simulator. – URL: <http://lammmps.sandia.gov/>
4. Jorgensen, W. L., Madura, J. D., and Swenson, C. J. *J. Am. Chem. Soc.* **106** (1984) 813.
5. Mayo, S.L., Olafson, B.D., and W.A. Goddard III *J. Phys. Chem.* **94** (1990), 8897.
6. Martin, M.G. and Siepmann, J.I. *J. Phys. Chem. B* **102** (1998) 2569
7. Sumpter, B. G., Noid, D. W., and Wunderlich, B. *Macromolecules* **25** (1992) 7247.
8. Rozas, R. and Kraska, T. *J. Phys. Chem. C*, **111** 43 (2007) 15784

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С ТРИКОТАЖЕМ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН

THE INTERACTION OF LOW-TEMPERATURE PLASMA WITH KNITS OF NATURAL CELLULOSE FIBERS

Азанова А.А., Бородаев И.А., Желтухин В.С., Шахыров А.А.,

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, д.68., vzheltukhin@gmail.com*

Рассмотрено влияние неравновесной низкотемпературной плазмы на трикотажное полотно на основе природных целлюлозных волокон. Плазменное воздействие приводит к повышению гидрофильности материала и может заменить жидкостные процессы подготовки трикотажа к крашению.

The influence of nonequilibrium low-temperature plasma on knitted fabrics from natural cellulose fibers is examined. Plasma exposure leads to increase the hydrophilicity of the material, and can replace liquid preparation processes to knitwear dyeing.

Одним из перспективных направлений практического применения ВЧ плазмы пониженного давления (13.3-133 Па) [1] является отделка текстильных материалов, в частности, трикотажа. Для облегчения вязания и уменьшения обрывов на нити наносится парафин, который в дальнейшем удаляется путем отваривания. Плазменная обработка предлагается авторами, как альтернатива традиционным жидкостным процессам подготовки трикотажа к крашению.

Выявлено, что плазменное воздействие в аргоне, воздухе и кислороде не затрагивает объемную структуру природного целлюлозного волокна и ограничено его тонким поверхностным слоем. В результате бомбардировки поверхности волокна низкоэнергетичными ионами происходит обрыв углеводородных цепей парафина и воскообразных веществ наружного слоя волокна, образование радикалов, испарение низкомолекулярных фракций парафина, что приводит к увеличению гидрофильности материала. На основе метода Монте-Карло проведено моделирование процесса ионной бомбардировки парафинового слоя.

В отличие от традиционных процессов отваривания и отбеливания трикотажа, плазменное воздействие является более щадящим методом обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-41-02672.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. // Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения. - Казань: Изд-во Казан.технол. ун-та, 2000.

АНОМАЛЬНАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ РАДИОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ANOMALOUS KINETIC TEMPERATURE OF THE DUST PARTICLES IN COMPLEX PLASMA OF THE RF DISCHARGE UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS, EXPERIMENT AND SIMULATION

Жуховицкий Д.И., Наумкин В.Н., Хуснулгатин А.И., Молотков В.И.,
Липаев А.М.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, dmr@ihed.ras.ru*

С использованием установки РК-3 Plus на борту Международной космической станции исследована кинетическая энергия частиц, составляющих пылевой кристалл. Кинетическая температура частиц оказывается почти на два порядка выше температуры их материала. В результате численного моделирования получена среднеквадратичная амплитуда их колебаний близкая к определенной в эксперименте.

The average kinetic energy of particles in the dust crystal is investigated using the РК-3 Plus laboratory onboard the International Space Station. The particle kinetic temperature proves to be almost two orders of magnitude higher than the temperature of their material. Simulation of the particle oscillations leads to the rms oscillation amplitude close to that determined in the experiment.

Исследуется средняя кинетическая энергия пылевых частиц в сильно неидеальной комплексной плазме, полученной на установке РК-3 Plus на борту Международной космической станции. Для определения координат частиц в трехмерном пылевом облаке используется метод оптической диагностики с оригинальным алгоритмом обработки полученных в ходе эксперимента видеозаписей. В типичных условиях эксперимента подсистема частиц представляет собой пылевой кристалл, в котором частицы колеблются вблизи центров ячеек Вигнера–Зейтца. Эти колебания не зависят от координаты и направления. Кинетическая температура частиц оказывается аномально высокой, превышая температуру вещества частиц почти на два порядка. Численное моделирование аномального нагрева частиц производится в предположении о том, что источником случайной силы, действующей на частицы, являются флуктуации их заряда. Результаты моделирования показывают, что типичное отклонение частиц от центра должно превосходить 10% радиуса ячейки Вигнера–Зейтца, что находится в согласии с данными эксперимента. Параметр неидеальности пылевого кристалла, рассчитанный по кинетической температуре, оказывается близким к 100. С учетом результатов численного моделирования однокомпонентной плазмы это указывает на то, что система находится недалеко от бифуркации фазового перехода кристалл–жидкость. Этот вывод подтверждается тем, что наблюдаемый в эксперименте пылевой кристалл плавится при малом изменении параметров плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №14-12-01235.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

FORMATION OF HIGH-INTENSITY ION BEAMS WITH BALLISTIC FOCUSING

Коваль Т.В., Кулигин С.М., Рябчиков А.И., Чан Ми Ким Ан

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия 634050 Томск, пр. Ленина 30, tvkoval@mail.ru*

In the work, experimentally and theoretically with the use of numerical simulation, the features of plasma-immersion pulse-periodic formation, transportation and focusing of a high-intensity titanium ion beam with an ion current density above 1 mA/cm^2 and pulsed power density up to 2.6 kW/cm^2 are studied.

Методы модификации поверхностных свойств на основе высокоинтенсивной имплантации ионов низкой энергии играют важную роль в развитии перспективных технологий улучшения физико – химических и эксплуатационных свойств материалов и покрытий.

В работе экспериментально и теоретически с применением численного моделирования исследуются особенности плазменно-иммерсионного импульсно периодического формирования, транспортировки и фокусировки ионных пучков высокой интенсивности с плотностью ионного тока выше 1 mA/cm^2 и импульсной плотностью мощности до 2.6 кВт/см^2 .

Выявлена важная особенность, связанная с существенным влиянием длительности импульса напряжения смещения от 2 до 8 мкс на условия формирования и транспортировки высокоинтенсивного пучка ионов титана.

Исследована возможность изменения стабильности высокоинтенсивного пучка ионов титана с помощью дополнительного дискового электрода, установленного непосредственно на сетке.

Показано, что эффективность фокусировки и транспортировки ионных пучков высокой интенсивности в значительной мере зависит от условий нейтрализации их пространственного заряда в пространстве дрейфа, при фиксированной частоте, от амплитудно – частотных характеристик отрицательного потенциала смещения, давления остаточного газа.

Работа поддержана грантом РФФ № 17-19-01169

ЛИТЕРАТУРА

1. Ryabchikov A.I., Petrov A.V., Stepanov I.B., Shulepov I.A., Tolmachjeva V.G. *J. Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 783
2. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. *Известия Томского политехнического университета.* **316** 4 (2010) 85

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЗАРЯДА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ВЛАСОВА С УЧЕТОМ СТОЛКНОВЕНИЙ И СТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ

STUDY OF DUST PARTICLE CHARGE SCREENING ON BASIS OF VLASOV EQUATIONS TAKING INTO ACCOUNT COLLISIONS AND SINKS OF ELECTRONS AND IONS

Ломовицкий П.В., Филиппов А.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, fav@triniti.ru

Рассмотрено экранирование заряда пылевых частиц в плазме на основе кинетических уравнений Власова с учетом столкновений и стоков электронов и ионов и уравнения Пуассона для самосогласованного электрического поля. Показано, как происходит переход от асимптотики r^{-2} к кулоновской асимптотике r^{-1} распределения потенциала по мере роста частоты столкновений.

Screening of a dust particle charge in plasma is considered on the basis of the Vlasov kinetic equations for electrons and ions taking into account their collisions and sinks and the Poisson equation for the self-consistent electric field. It is shown how the r^{-2} asymptote of the potential distribution is transformed into the Coulomb-like asymptote r^{-1} in the growth of the collision frequency.

В работе [1] была развита кинетическая теория экранирования заряда пылевых частиц на основе уравнений Власова и уравнения Пуассона для самосогласованного электрического поля. Столкновения электронов и ионов с нейтральными атомами учитывались на основе модели Бхатнагара-Гросса-Крука (БГК) [2]. Также учитывался гибель электронов и ионов вследствие ухода на пылевые частицы путем введения дельта-стоков в уравнения баланса числа электронов и ионов. Полученные выражения для распределения потенциала оказались достаточно сложными. Они были проанализированы только в режимах слабых и сильных столкновений, а в общем случае требуют привлечения численных методов.

В настоящей работе проведены исследования экранирования заряда пылевой частицы на основе работы [1] в режиме умеренных столкновений. В результате исследований показано, как происходит переход от асимптотики r^{-2} в режиме редких столкновений к кулоновской асимптотике r^{-1} распределения потенциала по мере роста частоты столкновений.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 16-12-10424.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Филиппов, А.Г. Загородний, А.Ф. Паль, А.Н. Старостин, А.И. Момот. Письма в ЖЭТФ **86** (2007) 873.
2. P.L. Bhatnagar, P.E. Gross, M. Krook. Phys. Rev. **54** (1954) 511.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПОСТОЯННЫХ ПОТЕНЦИАЛАХ ПОВЕРХНОСТИ

INTERACTION OF SPHERICAL CHARGED DUST PARTICLES WITH CONSTANT SURFACE POTENTIALS

Паутов А.А., Филиппов А.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, fav@triniti.ru

Развита методика расчета силы взаимодействия двух заряженных макрочастиц сферической формы в равновесной плазме или электролите при постоянных потенциалах поверхности путем перерасчета зарядов макрочастиц с использованием скорректированных вакуумных емкостных коэффициентов и перерасчета вакуумной силы с учетом экранирования.

A technique to calculate the electrostatic interaction force between charged dust particles of spherical shapes for a case of constant surface potentials is developed. The technique is based on the recalculation of charges of dust particles using corrected vacuum capacitive coefficients and the recalculation of the vacuum force with considering the screening effects.

В работах [1,2] была создана методика расчета силы взаимодействия двух заряженных диэлектрических макрочастиц в равновесной плазме с учетом эффектов экранирования. При малых расстояниях между центрами макрочастиц требуется учет большого числа членов разложения по мультипольным моментам и данная методика встречается с серьезными численными трудностями, связанными с решением плохо обусловленной системы уравнений. В вакууме использование бисферической системы координат позволяет получить решение, которое свободно от указанного недостатка [3]. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия макрочастиц при постоянных зарядах с целью развития методики расчета силы взаимодействия, которая свободна от упомянутых выше недостатков и обладает приемлемой точностью в режиме сильного экранирования, когда радиусы макрочастиц много больше радиуса экранирования.

Развитая методика расчета включает перерасчет зарядов макрочастиц с использованием скорректированных вакуумных емкостных коэффициентов и перерасчет вакуумной силы с учетом эффектов экранирования.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 16-12-10424.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Филиппов, И.Н. Дербенев. ЖЭТФ **150** (2016) 1262.
2. I.N. Derbenev, A.V. Filippov, A.J. Stace, E. Besley. J. Chem. Phys. **145** (2016) 084103.
3. А.В. Филиппов. ЖЭТФ **136** (2009) 601; A.V. Filippov. Contr. Plasma Phys. **49** (2009) 433; В.Р. Муниров, А.В. Филиппов, ЖЭТФ **144** (2013) 931.

ТОЧНЫЕ И ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЕМКОСТНЫХ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ СФЕРИЧЕСКИХ МАКРОЧАСТИЦ

ACCURATE AND APPROXIMATE METHODS TO CALCULATE THE CAPACITIVE AND POTENTIAL COEFFICIENTS OF A SYSTEM OF TWO MACROPARTICLES

Родин М.М., Филиппов А.В.

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12,
fav@triniti.ru*

Рассмотрены точные и приближенные методы расчета емкостных и потенциальных коэффициентов системы, состоящей из двух сферических макрочастиц. Предложена методика их расчета, обладающая с достаточной для физических и технологических приложений точностью.

Accurate and approximate methods to calculate capacitive and potential coefficients of a system consisting of two macroparticles are considered. A technique of their calculation with sufficient accuracy for physical and technological applications is proposed.

Потенциал взаимодействия играет важную роль в процессах коагуляции и агломерации микро и наночастиц. Знание емкостных коэффициентов позволяет рассчитать этот потенциал в вакууме или в однородном диэлектрике. Поэтому целью настоящей работы является поиск простых методов расчета этих величин, которые позволили бы рассчитать силу и потенциал взаимодействия макрочастиц с достаточной для физических и технологических приложений точностью.

Емкостные коэффициенты определялись на основе решения задачи методом разложения по полиномам Лежандра в сферической и бисферической [1,2] системах координат, а также на основе асимптотических выражений для малых межчастичных расстояний [3] и аналитического решения на больших. Показано, что наиболее точные данные дает решение с использованием бисферической системы координат, а использование асимптотических выражений для емкостных коэффициентов на малых межчастичных расстояниях и аналитического решения на больших позволяет определить силу и потенциал взаимодействия макрочастиц с достаточной для физических и технологических приложений точностью.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 16-12-10424.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Филиппов. ЖЭТФ **136** (2009) 601.
2. A.V. Filippov. Contr. Plasma Phys. **49** (2009) 433.
3. В.Р. Муниров, А.В. Филиппов, ЖЭТФ **144** (2013) 931.

АНАЛИЗ ПРИМЕСЕЙ ПО СПЕКТРАМ ПЕННИНГОВСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА

ANALYSIS OF IMPURITIES IN THE SPECTRUM OF PENNING ELECTRONS IN NEGATIVE GLOW PLASMA WITH WALL ELECTRODE

Сайфутдинов А.И.¹, Кудрявцев А.А.¹, Сысоев С.С.¹, Трофимов И.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет
Russia, 199034 Universitetskaya emb, 7/9, St. Petersburg

E-mail: as.uav@bk.ru

In the experimental studies of impurities registration in buffer helium by Penning electron spectra in negative glow plasma short glow by wall electrode at pressures from 10 to 150 Torr.

В работе [1] был запатентован ионизационный детектор для анализа газов методом плазменной электронной спектроскопии (PLES), позволяющий работать при высоких давлениях газа. Он основан на измерениях электронных спектров реакций пеннинговской ионизации атомов и молекул примеси А метастабильными атомами буферного газа В*, в качестве которого целесообразно выбрать гелий, способный ионизовать любую примесь



здесь энергия появления быстрых электронов в реакциях (1) есть $E_p = E_m - E_i$ ($E_m = 19.8$ эВ, E_i – энергии возбуждения метастабилей гелия и ионизации примеси, соответственно). Для реализации метода [1,2] необходимо чтобы ФРЭ быстрых электронов $f(r, \varepsilon)$ была нелокальной, а температура медленной группы электронов была низка, что в стационарных условиях реализуется в плазме отрицательного свечения. В этом случае $f(r, \varepsilon)$ представляет собой узкие пики, соответствующие энергиям E_p их появления в реакциях (1) [1,2]. При высоких давлениях вводить в плазменный объем классический зонд для измерения ФРЭ не представляется технически возможным. Эту трудность в [1,2] было предложено преодолеть путем использования стеночного зонда для регистрации ФРЭ быстрых электронов. В представленной работе проведены экспериментальные исследования по регистрации примесей в буферном гелии по спектрам пеннинговских электронов в плазме отрицательного свечения короткого тлеющего разряда с помощью стеночного электрода при давлениях от 10 до 150 Торр. Показано, что по второй производной тока пеннинговских электронов, образующихся в результате реакции пеннинговской ионизации в плазме отрицательного свечения на стеночный электрод можно определить тип примеси и ее концентрацию. Работа поддержана РФФИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kudryavtsev A.A., Tsyganov A.B. US Patent 7.309.992. December 18. 2007.
2. A.Kudryavtsev, P. Pramatarov, M. Stefanova, N. Khromov. Journal of Instrumentation. Volume 7, P07002, 2012.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ГАЗОВОМ АНАЛИЗАТОРЕ ХРОМАТО-ПЛЭС

SIMULATION OF PLASMA PARAMETERS IN THE GAS ANALYZER OF CHROMATO-PLES

Сайфутдинов А.И.¹, Кудрявцев А.А.¹, Сысоев С.С.², Трофимов И.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет
Russia, 199034 Universitetskaya emb, 7/9, St. Petersburg

E-mail: as.uav@bk.ru

В работе проведены численные эксперименты по определению основных параметров плазмы PLES-детекторов для микроплазменных детекторов для миниатюрных газоналитических систем Хромато-ПЛЭС

The main plasma parameters of PLES detector for the developed gas chromatographic system Chromato-PLES are determined.

Задача, связанная с миниатюризацией газохроматографических приборов и в то же время с расширением их аналитических возможностей, является одной из центральных в современной науке и технике об идентификации газовых смесей. В работах [1-4] были предложены микроплазменные детекторы, позволяющие анализировать состав газовых смесей методом ПЛЭС при атмосферном давлении в режиме реального времени. Для дальнейшего развития ранее предложенного метода, достижения его универсальности и создания компактного газоаналитического прибора Хромато-ПЛЭС предполагается использовать микрохроматографическую систему для предварительного разделения газовой смеси.

В представленной работе проведены численные эксперименты, основанные на решении уравнений гибридной модели, описывающей газоразрядную плазму в микроплазменном детекторе PLES, дополненной системой уравнений Навье-Стокса для описания течения буферного газа в системе «хроматографическая колонка – детектор». Получены все основные параметры микроплазменных детекторов для различных геометрических размеров детекторов.

Работа поддержана РФФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kudryavtsev A.A., Tsyganov A.B. US Patent 7.309.992. December 18. 2007.
2. A.Kudryavtsev, P. Pramatarov, M. Stefanova, N. Khromov. Journal of Instrumentation. Volume 7, P07002, 2012
A. Kudryavtsev, M.S. Stefanova, and P. M. Pramatarov Use of nonlocal helium microplasma for gas impurities detection by the collisional electron spectroscopy method Physics of Plasmas (2015 г.)
3. Сайфутдинов А.И., Капустин К.Д., Кудрявцев А.А. Письма в ЖТФ, Т. 40, вып. 21, с. 29, 2014

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛАБОИОНИЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

ANOMALOUS NONLINEAR EFFECTS IN A WEAKLY IONIZED GAS EXPOSED TO A STRONG SHOCK WAVE

Тряскин Я. В.¹, Павлов В. А.¹

¹Физический факультет, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, Ульяновская 1,
Петродворец, 198504, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: jaroslav.triaskin@spbu.ru

Изучены закономерности воздействия сильной стационарной ударной волны на плазменную компоненту слабоионизированного неизотермического газа. Для плазменной компоненты использована ионно-звуковая идеализация. В узком диапазоне скорости ударной волны реализуется аномальная релаксация плазменных осцилляций позади фронта. Это проявляется в амбиполярном полном увлечении плазменных компонент ударной волной. Интересным эффектом является возможность проявления сильного нелинейного резонансного возмущения в области перед фронтом.

The patterns of exposure of the charged components to a strong shock wave in weakly ionized non-isothermal gas have been studied. The assumption of the ion sound is used for the plasma component. In a narrow range of shock wave speeds, the anomalous relaxation of plasma oscillations occurs behind the front. Essentially, it appears in the total ambipolar entrainment of charged components by a shock wave.

На основе аналитического исследования [1] и численных оценок [2] было показано, что перед фронтом ударной волны возможно формирование плазменного солитона. Имеется немонотонная резонансная зависимость амплитуды солитона от скорости ударной волны. Максимальные возмущения достигаются при значениях скорости ударной волны $c \approx (1.6 \div 2)u_s$, (u_s - скорость ионного звука). В такой ситуации формируется единственный максимально плотный локальный сгусток заряженных частиц, где газ уже не является слабо ионизированным. При некотором значении скорости c реализуется ещё один эффект - аномальная резонансная релаксация плазменных осцилляций позади фронта. Имеются экспериментальные подтверждения описанных эффектов [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. V.A. Pavlov. *Plasma Phys. Rep.* 22, **167** (1996).
2. V.A. Pavlov. Ya.V. Tryaskin. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **56**, No. 3, pp. 361–368, (2015).
3. V.A. Pavlov, Yu.L. Serov, *3rd Weakly Ionized Gases Workshop*, AIAA-99-4852, Norfolk, USA, 1999.

**РАСЧЕТ СОСТАВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ,
СОДЕРЖАЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ И
ЛЕГКОИОНИЗИРУЮЩИЕСЯ ПРИМЕСНЫЕ АТОМЫ**

**CALCULATION OF THE COMPOSITION OF A THERMAL DUSTY
PLASMA CONTAINING METALLIC PARTICLES AND LIGHTLY
IONIZING IMPURITY ATOMS**

И.И. Файрушин

Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russia, fairushin_ilmaz@mail.ru

Проведен расчет состава термической плазмы, содержащей атомы легкоионизирующей примеси щелочного металла и металлические частицы микронных размеров. Показано, что степень ионизации окружающего газа оказывает влияние на величину заряда пылевых частиц.

The composition of a thermal plasma containing atoms of an easily ionizing impurity of an alkali metal and metal particles of micron sizes is calculated. It is shown that the degree of ionization of the surrounding gas affects the magnitude of the charge of the dust particles.

Термическая плазма, содержащая частицы конденсированного вещества микронных размеров широко распространена как в природе, так и в технологических процессах [1, 2]. Такая плазма образуется, например, при газотермическом нанесение функциональных покрытий с помощью генераторов струй дуговой плазмы [3].

В данной работе рассмотрена термическая плазма инертного газа с примесью легкоионизирующегося элемента, в которую вводят металлические частицы микронных размеров. Попадая в горячий газ, металлическая частица нагревается до температуры окружающей плазмы и эмитирует электроны. Вся система в целом переходит в состояние статистического равновесия. С учетом условия равновесия и уравнения Саха можно рассчитать концентрации электронов и ионов в термической пылевой плазме, а также значение заряда пылевых частиц [4].

Для термической плазмы, содержащей металлические частицы, расчеты показали, что с повышением температуры частицы, находясь в окружении атомов газа с низким потенциалом ионизации ϕ_i , испускают электроны меньше, чем в окружении атомов газа с более высоким значением ϕ_i . С уменьшением размера частиц и сохранением их массовой доли этот эффект становится более выраженным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы: Учебное пособие. М.: Физматлит, 2004.
2. Фортов В.Е., Филинов В.С., Нефедов А.П. и др. // ЖЭТФ. 1997. В. 111. С. 889.
3. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. – К.: Наук. думка, 1984.
4. И.И. Файрушин, И.Г. Даутов, Н.Ф. Кашапов, А.Р. Шамсутдинов // Письма в ЖТФ. 2016. Том 42, вып. 23, С. 42.

Секция 4
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С
ВЕЩЕСТВОМ

АКТИВАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

ACTIVATION OF DIELECTRIC SURFACES BY COLD PLASMA FOR OPTICAL CONTACT HARDENING

Азарова В.В.¹, Акишев Ю.С.², Голяева А.Ю.¹, Грушин М.Е.¹, Краснов В.И.¹,
Петряков А.В.², Сухов Е.В.¹, Трушкин Н.И.²

1. АО НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха, Москва, Россия

2. АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия.

azarovav@hotbox.ru

Аннотация: В работе представлен метод упрочнения оптического контакта диэлектрических поверхностей с использованием плазменной активации. Показана возможность сборки резонаторов кольцевых лазеров с использованием данного метода, в том числе из деталей, изготовленных из разнородных материалов.

Abstract: This paper presents a method for optical contact hardening of dielectric surfaces by plasma activation. The possibility to fabricate resonators of ring lasers including made of dissimilar materials by this method is shown.

Одним из важнейших эксплуатационных параметров лазерных приборов является срок их сохраняемости, то есть неизменность состава газовой смеси в течение всего срока их эксплуатации и хранения. Натекание в лазер таких примесей как кислород, водород и углеводороды существенно ограничивает срок его службы. Механически прочное и вакуумно-плотное соединение оптических деталей ЛГ является одной из серьезных технологических проблем при изготовлении. Оптические детали лазеров изготавливаются из материалов с малым коэффициентом термического расширения, среди которых находятся ситалл, зеродур и клиакерам. В настоящее время общепринятым методом соединения оптических деталей является технология оптического контакта (ОК)¹⁻³. После механической полировки на контактирующих поверхностях остаются различные пленки толщиной в несколько атомных слоев, которые ослабляют межмолекулярное взаимодействие двух поверхностей и, тем самым, ухудшают качество их оптического контакта. Как показала практика, традиционная «мокрая» химическая чистка полированных поверхностей не устраняет полностью эти пленки, в связи с чем была поставлена задача поиска новых методов обработки оптических поверхностей перед их посадкой на оптический контакт. В данной работе представлен новый метод упрочнения оптического контакта диэлектрических поверхностей лазерного гироскопа с использованием плазменной активации. Метод заключается в обработке оптических поверхностей струей холодной плазмы, формируемой газоразрядным источником плазмы на основе высокочастотного барьерного разряда в потоке аргона при атмосферном давлении.

1. И.В.Обреимов, Е.С.Трехов, «ЖЭТФ», т.32, в.2, с.185, (1957).

2. Б.В.Дерягин, Н.Л.Кротова, В.П.Смилга, *Адгезия твердых тел*, (1977).

3. В.М. Золотарев и др. «ФТТ», т.20, №1, с.177, (1978).

САМОФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССАХ РАСПЫЛЕНИЯ И ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

SELF-FORMATION OF NANOSTRUCTURES ON THE SILICON SURFACE IN THE PROCESSES OF SPUERING AND CO-DEPOSITION OF METALS IN RF INDUCTIVE PLASMA

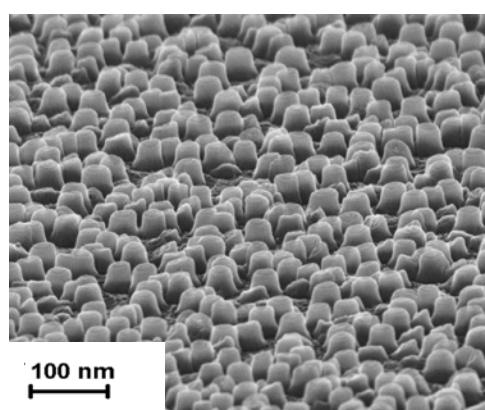
Амиров И.И., Изюмов М.О., Мазалецкий Л.А.

Ярославский Филиал Физико-технологического института РАН, Россия, г. Ярославль, ул. Университетская, д.21.
ildamirov@yandex.ru

Представлены результаты исследования самоформирования наноструктур на поверхности Si в процессах распыления пленки Co и переосаждения атомов Ti, распыляемых с поверхности Ti подложки в плотной аргоновой плазме ВЧ индукционного разряда.

The results of the self-formation of columnar nanostructures on the Si surface in the processes of Co film sputtering and co-deposition of titanium atoms sputtered from the Ti substrate surface in dense argon plasma of RF-inductive discharge are presented.

Процессы формирования наноструктур на поверхности материалов с целью придания ей нужных функциональных свойств широко используется в нанотехнологии. Самоформирование наноструктур происходит на поверхности материала при ионной бомбардировке в одновременно протекающих процессах ионного распыления и переосаждения атомов металлов [1]. В данной работе показано, что самоформирование наноструктур Co, Ti происходит на поверхности Si при ионно-плазменном распылении пленки Co и переосаждении атомов Ti, распыляемых с поверхности титановой пластины при низкоэнергетической ионной бомбардировке.



Эксперименты проводили в реакторе плотной плазмы ВЧИ разряда в Ar, подробно описанном в [2]. Было обнаружено, что в зависимости от времени обработки на поверхности образуются наноструктуры разной формы и состава, в том числе наностолчатые структуры (рис.1). Обсуждается механизм их образования.

Рис. 1 Вид массива наностолчатых Ti структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. K Zhang, O Vobes and H Hofsäss. *Nanotechnology* **25** (2014) 085301.
2. И.И. Амиров, М. О. Изюмов, В. В. Наумов. *Поверхность*. **8** (2016) 82.

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ КОНСЕРВАЦИИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИЗ КОЖИ

APPLICATION OF LOW TEMPERATURE NON-EQUILIBRIUM PLASMA TREATMENT FOR DEVELOPING CONSERVATION TECHNIQUES ARCHAEOLOGICAL SITES LEATHER

Богатова Л.Ф., Кулевцов Г.Н.

Казанский Национальный Исследовательский Технологический, Россия, 420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, Казань, ул.К.Маркса, 68, linafeliksova@mail.ru

Аннотация: Исследование влияния ННТП обработки на физико-механические и гигиенические свойства археологических объектов из кожевенных материалов перед процессом консервации.

Abstract: Investigation of the effect of treatment on the NLP physical, mechanical and hygienic properties of archaeological objects from leather materials before the preservation process.

Археологические объекты из кожи, самые трудоемкие объекты в реставрационной деятельности. Один из важнейших недостатков консервации с помощью полиэтилен гликоля – недолговечность результата, химическая устойчивость и механическая прочность достигается на неопределенный срок, со временем объект снова придется восстанавливать [1]. В связи с этим, была предпринята попытка усовершенствовать данную методику с помощью ННТП обработки [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Синицына Н.П. и др. *Реставрация и консервация археологического текстиля и кожи, разработка методики Некрополь русских великих княгинь и цариц в Вознесенском монастыре Московского Кремля* Т.1: История усыпальницы и методика исследования М., 2009. - С.213-221.
2. Л. Ф. Богатова и др. «Разработка технологии консервации археологических объектов из кожевенных материалов с применением ННТП обработки», Научные труды SWorld, выпуск 2 (39), Том 4, - Иваново. – научный мир, 2015 – 97 с.

ВЧ ИНДУКЦИОННЫЙ РАЗРЯД В ПРОЦЕССАХ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

RF INDUCTIVE DISCHARGE IN PROCESS OF MODIFICATION OF THE DIELECTRIC SURFACE

Голяева А.Ю.¹, Товстопят А.В.¹, Галеев В.А.¹, Гафаров И.Г.², Шарифулин Ф.С.²

¹АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Россия, Москва, ул. Введенского, д. 3, кор.1.
e-mail:kaitana2005@gmail.com

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,
г. Казань, ул. К. Маркса, 68. e-mail:sharifullin80@mail.ru

Представлена информация о результатах исследования обработки поверхности диэлектриков в ВЧ индукционном разряде на частоте 13,56 МГц при давлениях 13,3 – 66,5 Па.

Provides information about the results of the study of dielectrics surfaces processing in RF induction discharge at a frequency of 13,56 MHz at pressures 13,3-66,5 Pa.

Целью работы являлись исследования снижения шероховатости и очистка поверхности диэлектрических образцов из кварца и ситалла в струе высокочастотной индукционной плазмы на частоте 13.56 МГц, создаваемой кварцевым ВЧ плазмотроном. В работе исследовалась также возможность одновременной работы двух плазмотронов, подсоединенных к одному вакуумному блоку (рис. 1). Мощность, подводимая к плазмотронам, изменялась от 200 до 3000 Вт. Образцы размещались в под колпачном устройстве вакуумного блока, давление в котором изменялось от 13,3 Па до 66,5 Па. Расход плазмообразующего газа Ar регулировался в диапазоне 0,02 – 0,1 г/с. Варьировалось время обработки и расстояние от среза плазмотронов до образца. Обработка образцов проводилась при их расположении параллельно, перпендикулярно и под углом 45° к струе плазмы.

Степень очистки определялась по изменению угла смачиваемости (рис. 2). Изменение шероховатости проводилось на интерферометре Zygo NV 6200.



Рисунок 1 Одновременная работа ВЧИ плазмотронов



Рисунок 2 Изменение угла смачиваемости после обработке

STOCHASTIC MODELS OF THE PHASE TRANSITIONS FIRST KIND AT NON EQUILIBRIUM TAGE IN THE MODIFICATION OF SURFACE PROPERTIES

Zmievsckaya G.I.

M.V.Keldysh Institute of applied mathematics, RAS, Moscow, 125047, Miusskysya sq.4, Russia

zmig@mail.ru

The work presents computer experiments studies interaction of ions Xe^{++} gas with $\sim 5-10$ keV energy with crystal lattice of thin layers "SiC/metal" substrate and SiC vapors condensation near surface. The both processes are considered as initial stage of phase transition at initial stage. Properties of substrate are altered due to porosity and stresses formation into thin layers substrate. The sizes distribution of sedimented SiC charged droplets with accounting of melt dispergation SiC due to Rayleigh instability is discussed.

Non-equilibrium stage of phase transitions in plasma-like medium (or nucleation of lattice defects as well as droplets of condensation near surface) in nanomaterials as well as their computer modeling are discussed. The solving the kinetic (Kolmogorov- Fokker-Planck and Smolukhovskii) equations in partial derivatives using Ito-Stratonovich stochastic differential equations solution which are equivalent to Kolmogorov equations is presented. Here are concretized: Stochastic kinetic description of the surface properties modification due to phase transition first kind at non equilibrium (fluctuation) stage which is related with the models of creation microdefects, their the Gibbs free energy as well as with the Brownian motion in the potentials of indirect long-range interaction between gaseous bubbles into lattice. These models predict stress from gas bubbles penetration and the alteration substrate properties[2]. Also we are carried out the computer simulation of silicon carbide (SiC) vapors condensation in a plasma discharge and the formation of thin film islands on a Si(100) substrate. Earlier the dusty plasma dynamics [3] had been studied in 3D3V kinetic plasma code[4], here is presented processes of charged particles nano sizes condensation (such as «from vapors to melt droplets») under cooling process.

Acknowledgements

Author is grateful to T.A. Averina for base of mathematical aspects of model. This work is partially supported by grants RFBR 15-01-05052 and by the Department of Mathematics of the RAS №3(3.6).

References

1. G.I. Zmievsckaya & A.L. Bondareva. *Plasma Phys.Rep.* **37** (2011) P.87-95.
2. G.I. Zmievsckaya et al. *JPhys.D:Appl.Phys.* **40** (2007) P.4842-4849.
3. V.D. Levchenko et al. *EPS Conf. CFPP St.Peterburg, Russia* (2003) ESA 27A p.O-1.6B.
4. Yu.S. Sigov. Computer simulation: The link between past and future of plasma physics. Compos. V,D.Levchenko and G.I.Zmievsckaya. IAPC «Nauka» RAS, Moscov, 2001, 288 p.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СОСТАВА ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

THE EFFECT OF THE ELECTROSTATIC FIELD AND THE COMPOSITION OF A DUSTY PLASMA ON THE BURNING RATE

Зырянов И.А., Решетников С.М.

Вятский государственный университет, РФ, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: b185@mail.ru

Приводятся результаты экспериментального исследования электрических свойств плазмы пламени и скорости горения полиметилметакрилата в электрическом поле.

The results of an experimental study of the electrical properties of the flame plasma and the burning rate of polymethylmethacrylate in an electric field are presented.

В работе экспериментально исследовано влияния дисперсных примесей на скорость горения полиметилметакрилата (ПММА) в электрическом поле и вольтамперные характеристики плазмы пламени. Исследования проведены на модельном гибридном ракетном двигателе описанном в [1]. Внешний топливный блок изготовлен из ПММА, внутренний имел разный состав: ПММА (PM), полиэтилен (PE), 60%полиэтилен+40%примеси (PM-PES40), 40%полиэтилен+60%примеси (PM-PES60). В качестве примеси использовался оксид железа.

На рис.1,а представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) пламени в двигателе при различных составах центрального блока. Введение дисперсных добавок увеличивает проводимость пламени.

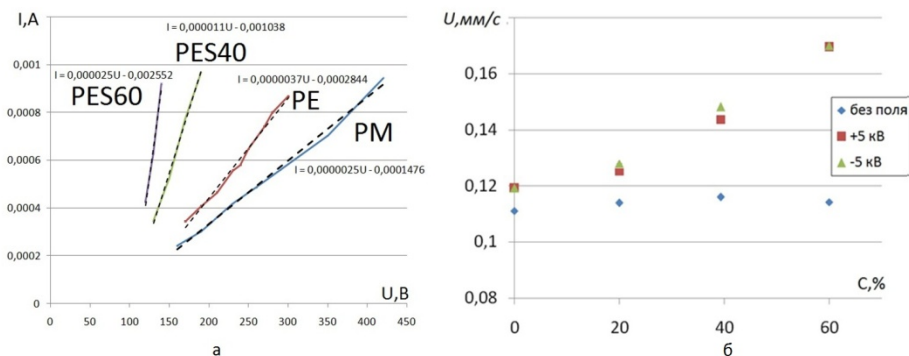


Рис.1. ВАХ пламени и скорость горения.

Изменение линейной скорости горения ПММА при воздействии электрического поля в зависимости от концентрации дисперсной примеси (С) представлены на рис.1,б (в легенде указана полярность центрального электрода и напряжение в кВ). Введение дисперсных примесей в зону горения существенно увеличивает эффект влияния поля на скорость горения.

Литература.

1. Reshetnikov, S.M., Zyryanov, I.A., Budin, A.G., Pozolotin, A.P., *J. Phys.: Conf. Ser.* **789** 012042

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОМ РАЗРЯДЕ

PRODUCTION OF METALLIC POWDERS IN A PLASMA-ELECTROLYTIC DISCHARGE

Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф.

Казанский федеральный университет, Россия, Казань, ул. Кремлевская, д. 18, E-mail: kashramil.88@mail.ru

Аддитивные технологии, работающие на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков, являются наиболее перспективными методами создания уникальных объектов. В работе исследуется возможность плазменно-электролитного получения металлических порошков, пригодных для СЛС-технологии.

Additive technologies that work on the basis of selective laser melting of metal powders are the most promising methods for creating unique objects. The possibility of plasma-electrolyte production of metal powders suitable for SLM-technologies is investigated in this work.

В установках селективного лазерного сплавления используются порошковые материалы, которые должны иметь определенный дисперсионный состав, частицы должны быть сферическими. На данный момент известны две технологии получения металлических порошков, используемых при СЛС – плазменная, газовая и водяная атомизации. Недостатком данных технологических производств является высокий разброс размеров частиц от 1 мкм до 200 мкм, что требует дополнительной очистки и разделения, трудность перехода установки на производство другого вида материала, высокая энергозатратность процесса, трудность контроля и извлечения частиц нанометрового диапазона, использование дорогостоящего оборудования. Одним из возможных решений может являться использование газового разряда с жидкими электродами, данный метод прост и не требует дорогостоящего оборудования.

Для проверки данного утверждения была разработана экспериментальная установка, работающая при напряжениях от 0 до 1000 В и токах от 0 до 5 А. В работе распыляли анода, изготовленный из стали марки 45 и установленный над поверхностью электролитического катода. В качестве катода использовались растворы хлорида натрия и серной кислоты. При горении разряда между электролитом и стальным анодом, происходило диспергирование последнего. Получаемый порошок в основной своей части попадал в электролит и быстро охлаждался. Анализ дисперсного состава показал разброс размера частиц от 30 до 200 мкм. Изменяя вкладываемую мощность в разряд было определено, что при напряжениях 400 В и токах 2 А наблюдается образование порошка дисперсностью до 60 мкм, что является оптимальным для селективного лазерного сплавления.

В результате проведенных исследований установлено, что получаемые порошки сталей по дисперсному составу и наличию сферической геометрии у частиц пригодны для селективного лазерного сплавления. Однако необходимо проводить дальнейшие исследования для устранения окисления частиц порошка, а именно подбирать электролитические катоды и изменять атмосферу в камере.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНСЕРВАЦИИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ШЕЛКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ННТП ОБРАБОТКИ

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CONSERVATION OF ARCHAEOLOGICAL SILK WITH APPLICATION OF NSTP PROCESSING

Федотова Ю. В.¹, Кулевцов Г.Н.¹.

¹*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, г. Казань, 420015, ул. Карла Маркса, 68.*

E-mail: yulia.fedotova86@yandex.ru

Аннотация: В данной работе представлено исследование влияния параметров ННТП обработки на капиллярность, смачиваемость и физико-механические свойства объектов из натуральных волокнистых материалов перед процессом консервации. Разработана методика консервации археологических объектов из натуральных волокнистых материалов с применением ННТП обработки.

Abstract: In this paper, a study is made of the influence of the parameters of the NSTP processing on the capillarity, wettability, and physical and mechanical properties of objects from natural fibrous materials before the process of conservation. The technique of preservation of archaeological objects from natural fibrous materials with application of NSTP processing is developed.

Разработанная методика консервации археологического шёлка включает в себя : механическую очистку, ННТП обработку в гидрофильном режиме ($p = 26,6$ Па, $G = 0,04$ г\с, $Wp = 3$ кВт, $I = 0,4$ А, $\tau = 180$, плазмообразующая смесь газа аргон и воздух в соотношении 50:50), консервация водным раствором ПЭГ – 400 с концентрацией 3% .

Разработанная методика позволила адаптировать высокие показатели по впитываемости консервирующего агента. Воздействие плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления позволяет существенно изменять состояние поверхностей тканей из натурального шёлка. Модификация плазмой ВЧЕ разряда пониженного давления [1], позволит увеличить сродство поверхности данных материалов с водным раствором. Установлено, что плазменная обработка ВЧЕ разряда пониженного давления не приводит к ухудшению физико – механических характеристик обработанного натурального шёлка [2]. В зависимости от мощности относительное удлинение колеблется в пределах $8,46 \pm 0,18$ %, предел прочности $8,46 \pm 0,88$ мПа, в зависимости от времени обработки относительное удлинение колеблется в пределах $8,46 \pm 0,19$ %, предел прочности $8,46 \pm 0,92$ мПа. С помощью микроскопического исследования, была найдена 3% концентрация консервирующего агента ПЭГ-400, что позволяет снизить концентрацию по стандартной методике.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Абдуллин И.Ш., Шаехов М.Ф.. *Вестник Казан.технол. ун-та.* 2002. № 1. С. 75-78.
2. Федотова Ю.В., Кулевцов Г.Н., Абдуллин И.Ш. *Вестник Казан.технол. ун-та.* 2015. Т. 18. № 21. С. 101-102.

ЭФФЕКТЫ ВЧИ-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СТЕКЛА

EFFECTS RFI-PLASMA MODIFICATION OF DISPERSE SYSTEMS ON THE BASIS OF MINERAL GLASS

Вознесенский Э.Ф., Мифтахов И.С., Нагмутдинова А.И., Трофимов А.В.

ФГБОУ ВО «КНИТУ», РФ, г.Казань, ул.Карла Маркса д.68 fortmayn@mail.ru

Рассмотрена возможность ВЧИ плазменной модификации стеклянных микрошариков, применяемых в качестве наполнителя в сигнальной дорожной разметке и технических текстильных материалах.

The possibility RFI plasma modification of the glass microspheres used as filler in the signal road markings and technical textile materials.

В качестве объектов исследования использовались микростеклошарики (МСШ) дисперсностью 50-100 мкм, соответствующие ГОСТ Р 51256. Рассмотрена возможность сглаживания поверхности микрошариков под воздействием обработки в разряде низкотемпературной, неравновесной плазмы с плазмообразующим газом Ar.

Технические параметры обработки: плазмообразующий газ – аргон; расход газа $G_{Ar}=0,04$ г/с; энергия ионов 30 эВ, плотность электронного тока 25 А/м²; давление в рабочей камере $P=40-90$ Па. МСШ инжестрировались в разряд и с потоком плазмообразующего газа проходили через ядро разряда. За срезом плазмотрона обработанные частицы улавливались фильтром-ловушкой. Плазменная обработка проводилась на экспериментальной ВЧИ-плазменной установке, описанной в источнике [1].

Контроль влияния ВЧИ плазменной модификации осуществлялся при помощи сканирующего зондового микроскопа N-Tegra Therma производства NT-MDT. Наблюдается существенное снижение шероховатости Z_{max} на 55,45%, R_z на 54,57%, R_a на 43,37%, R_{MS} на 48,4 %.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения плазмы ВЧИ разряда пониженного давления для модификации дисперсных стеклянных материалов с целью управления микрорельефом, очистки и активации поверхности для получения функциональных композиционных материалов широкого профиля с улучшенными эксплуатационными и потребительскими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Ш. Абдуллин, В.С.Желтухин, Н.Ф. Кашапов. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2000. – 348 с.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДУГИ ПРИ НАГРЕВЕ ГРАФИТА ФИКСИРОВАННЫМ ТОКОМ

ARC IGNITION AT HEATING OF GRAPHITE BY FIXED CURRENT

Полищук В.П., Самойлов И.С., Амиров Р.Х., Киселев В.И.
ОИВТ РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2 polistchook@mail.ru

Описано разрушение графитового образца после длительного нагрева проходящим током. Приведены результаты, подтверждающие образование жидкой фазы графита в дуговом разряде при температуре около 3,3 кК.

The destruction of graphite samples after prolonged heating by electric current was described. The evidences of liquid film formation on the electrode surfaces at temperature of 3.3 kK were presented.

Приведены результаты исследования начальной стадии дугового разряда на графитовых электродах. Дуговой разряд возникал в результате локального саморазрушения части графитового стержня, нагревавшегося электрическим током и выдерживавшегося свыше 10 минут при температуре около 3 кК в атмосфере аргона при давлении 10-90 кПа [1]. Использовались круглые стержни спектрального графита, диаметр исследуемого участка которых на длине 20 мм был уменьшен проточкой с 6 до 3 мм. Ток нагрева (120-190 А) устанавливался так, чтобы начальная температура в центре проточки составляла 2,7-2,9 кК. За время выдержки образца (10-100 минут) при неизменном токе регистрировался монотонный рост температуры образца и напряжения на нем. При достижении в области проточки температуры 3,2-3,3 кК наблюдался скачок напряжения на образце с $\cong 12$ В до $\cong 35$ В длительностью около 5 мс, после чего напряжение устанавливалось на уровне 25 В. Из анализа данных синхронных измерений - осциллограмм напряжения, термограмм образца и видеофильмов его разрушения, снятых со скоростью 25-1200 кадров/с, следует, что возникновению дуги предшествовало резкое, примерно на порядок, снижение электропроводности материала образца. Это может объясняться появлением жидкого углерода. Предположение об образовании жидкой фазы подтверждается особенностями геометрии электродов во время горения дуги [1], а также их гладкой поверхностью, которая наблюдалась после длительного, более 10 с, воздействия дуги. После кратковременного горения дуги ($\cong 1$ с) поверхность электродов практически не изменялась, но на ней наблюдались каплеобразные фрагменты размером 0,1-0,3 мм.

Представленные результаты подтверждают выводы работы [1] об образовании на поверхности графитовых электродов при температуре около 3,3 кК пленки расплава толщиной порядка 0,1 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.Х. Амиров, В.И. Киселев, В.Я. Менделеев, В.П. Полищук, И.С. Самойлов, С.Н. Сковородько. *Теплофизика высоких температур* **54** (2016) 680.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ДОБАВОК НА ПЛАЗМОЛИЗ ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

EFFECT OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE ADDITIVES ON THE PLASMA PYROLYSIS OF HEAVY HYDROCARBONS

Софроницкий А.О.^{1,2}, Садигов К.Г.², Ларионов В.М.²

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Россия, г. Казань, 420111, ул. Карла Маркса, 10. artempic8@mail.ru*

²*Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань, 420008, ул. Кремлевская, 18.*

В этой работе показана возможность инициирования внутрипластового горения при помощи электрического разряда при введении электропроводящих добавок в углеводородное сырье. Было обнаружено, что при плазмолизе углеводородов ароматического ряда больше всего образуется сажа. Разложение углеводородов разрядом, при наличии электропроводящих добавок и прекурсоров катализаторов приводило к образованию углеродных и металлических наночастиц.

It's shown that the electric discharge initiation of in-situ combustion can be executed by entering conductive additives to hydrocarbon raw materials. It is observed, that the most of all the soot is formed from aromatic hydrocarbons during the plasma pyrolysis. Cracking of hydrocarbons by electric discharge, with conducting additives and precursors of catalysts, leads to formation of carbon and metal nanoparticles.

Известны несколько способов инициирования внутрипластового горения: нагрев с помощью электронагревателей, нагрев газовой горелкой и химическое инициирование. В данной работе предлагается новый способ инициирования горения с помощью электрического разряда в среде жидких углеводородов. Для организации взаимодействия разряда с жидкими углеводородами предлагается увеличить их электропроводимость при помощи хорошо растворимых в жидких углеводородах электропроводящих добавок. В качестве электропроводящих добавок были использованы формиаты щелочных металлов.

В процессах внутрипластового горения одной из главных проблем является коксования песчаной породы, это уменьшает полноту извлечения углеводородного сырья. Поэтому задачей данной работы было определение условий, при которых в химических процессах горения (окисления) больше всего образуется сажа. Для сравнительного изучения этого процесса были использованы индивидуальные углеводороды алканового ряда и ароматические углеводороды.

Было обнаружено, что при плазмолизе углеводородов ароматического ряда больше всего образуется сажа, что приводит к закоксовыванию породы и потере углеводородного сырья. Исследование образцов сажи показало, что размер частиц колеблется в пределах 20-100 нм, а также были обнаружены скопления углеродных нанотрубок.

Для получения наночастиц металла в качестве прекурсоров катализаторов были использованы растворы резинатов различных металлов в органических растворителях.

THERMAL STEAM PLASMA DECOMPOSITION OF ORGANOCHLORINE COMPOUNDS

Surov A.V., Subbotin D.I., Popov V.E., Popov S.D., Litvyikova A.I.,
Nakonechniy Gh. V., Serba E.O., Obraztsov N.V.

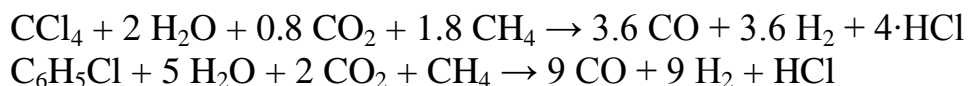
*Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, Dvortsovaya nab., 18, Saint Petersburg
191186, Russia, subbotin1987@mail.ru*

The report considers the decomposition of carbon tetrachloride and chlorobenzene by the plasma obtained in an AC plasma torch with separate supply of shielding gas and reaction components.

A large group of organochlorine compounds is prohibited for use and requires careful processing. The thermal plasma can be used for their processing. Under high temperature, organic compounds decompose to form simpler ones. Thus most of the researches is concerned with air-plasma processing [1]. This process is a high-temperature oxidation.

The steam plasma has significant advantages: a high concentration of active particles, the presence of hydrogen to form hydrogen chloride. However, the use of steam complicates the design of the plasma torch. For this purpose, the IEE RAS has developed an steam AC plasma torch with separate supply of shielding gas and main plasma-forming media [2]. Plasma torch tested during methane reforming [3].

The work deals with the decomposition of carbon tetrachloride and chlorobenzene under the plasma obtained in the AC plasma torch. Carbon dioxide is supplied into the near-electrode zone, but steam, vapor of organochlorine compound and methane are fed into the arc zone. Component flow rates are selected by the equations:



In the course of the experiment it was found that the initial organochlorine compounds completely decompose, however, chlorobenzene is partially converted to soot. The yield of soot was 0.84% wt. of raw materials, the content of chlorine in the soot was 2.08% by wt.

REFERENCES

1. P. Fazekas, E. Bodis, A.M. Keszler, Zs. Czegeny, Sz. Klebert, Z. Karoly, J. Szepvolgyi. *Plasma Chem Plasma Process.* **33** (2013) 765.
2. Ph.G. Rutberg, Gh.V. Nakonechny, A.V. Pavlov, E.O. Serba, A.V. Surov. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** (2015) 245204.
3. P.G. Rutberg, V.A. Kuznetsov, V.E. Popov, S.D. Popov, A.V. Surov, D.I. Subbotin and A.N. Bratsev. *Applied Energy.* **148** (2015) 159.

**МОДИФИКАЦИЯ ИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ
ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ИЛИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО
СПЕКАНИЯ ПОРОШКА**
**MODIFICATION OF METAL ARTICLES OBTAINED BY LASER OR
ELECTRON-BEAM POWDER SINTERING BY INTENSE ELECTRON
BEAM**

Тересов А.Д., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Крысина О.В.
*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, Томск,
634055, пр. Академический 2/3, E-mail: tad514@yandex.ru*

Проведены исследования по полировке поверхности пористых металлических образцов, полученных методом послойного селективного спекания порошка, с помощью импульсного электронного пучка. На примере титанового сплава ВТ6 показано, что воздействие импульсного электронного пучка на поверхность образца приводит к значительному уменьшению шероховатости и пористости поверхностного слоя материала.

The paper presents research results on pulsed electron beam surface finish of porous metal samples obtained by selective powder sintering. On the example of VT6 alloy, it is shown that surface finish with a pulsed electron beam provides a considerable decrease in surface roughness and porosity.

Целью настоящей работы являлась модификация интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности структуры и фазового состава поверхностного слоя металлических изделий, полученных методом послойного селективного электронно-пучкового спекания в вакууме титанового порошка марки ВТ6 с размером частиц 40-100 мкм (установка «Arcam A2X» фирмы Arcam (Швеция)).

На примере титанового сплава ВТ6 показано, что последовательное воздействие импульсного электронного пучка на поверхность образцов, получаемых методами аддитивного производства из металлического порошка, в вакууме при давлении $3,5 \cdot 10^{-2}$ Па (Аг) в режиме №1 (200 мкс, 45 Дж/см², 10 имп.) и затем в режиме №2 (50 мкс, 20 Дж/см², 3 имп.) приводит к значительному уменьшению шероховатости (в 20 раз по R_a) и пористости поверхностного слоя материала. Сканирующая электронная микроскопия подтверждает, что в результате импульсного электронно-пучкового воздействия профиль поверхности образцов значительно изменяется. В поверхностном слое сплава ВТ6 формируется однородная зёрненная структура, отличающаяся отсутствием видимых отдельных частиц исходного порошка. Микротвёрдость поверхности, коэффициент трения и уровень износа при этом практически не изменяются. Кроме того, по предварительным данным, электронно-пучковая обработка позволяет повысить предел прочности на разрыв в 1,33 раза и увеличить деформацию при растяжении в 1,18 раза. Такой способ полировки является альтернативой традиционным методам подготовки поверхности изделий, получаемых методами аддитивного производства из металлического порошка, для дальнейшего применения в машиностроении, имплантологии, авиакосмической промышленности и других областях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №16-58-00075-Бел_a).

**РАЗДЕЛЕНИЕ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД
ПОЛИСУЛЬФОАМИДНЫМИ МЕМБРАНАМИ,
МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ
SEPARATION OF EMLSIFIED WASTEWATER BY POLYSULFONAMIDE
MEMBRANES MODIFIED WITH LOW-TEMPERATURE PLASMA**

Федотова А.В.

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»
РФ, 420015, Казань ул.К.Маркса, 68, e-mail: felina.93@mail.ru*

Проведены исследования разделения водомасляной эмульсии полисульфонамидными (ПСА) мембранами с массой отсекаемых частиц 20 кДа, обработанными низкотемпературной плазмой в среде аргона и воздуха.

Investigated the separation of oil-water emulsion using polysulfonamide (PSA) membrane with molecular weight cut-off of 20 kDa, treated by low temperature plasma in argon and air.

Воздействие низкотемпературной ВЧ плазмы на поверхность полимера позволяет изменять его контактные свойства - смачиваемость, адгезию, что связано с процессами травления и окисления с образованием гидрофильных групп различной химической природы [1].

Данное обстоятельство является основанием для применения плазмообработанных полимерных мембран для интенсификации разделения водомасляных сред, в частности жидких отходов в виде эмульсий нефтепродуктов. Экспериментальными данными [2] показано увеличение эффективности разделения водомасляной эмульсии полисульфонамидными (ПСА) мембранами с массой отсекаемых частиц 20 кДа, обработанными ВЧ низкотемпературной плазмой в среде аргона и воздуха при анодном напряжении $U = 1,5-7,5$ кВ и времени обработки $\tau = 1,5-7$ мин. При этом эффективность исходной мембраны составила 89,8%, а наиболее селективной плазмообработанной мембраны при $U = 1,5$ кВ и $\tau = 1,5$ мин – 93,2%. Методом сидячей капли выявлено уменьшение краевого угла смачивания с $59,6^\circ$ до $47,9^\circ$ в результате плазмообработки ПСА мембран. Таким образом, увеличение смачиваемости при воздействии ВЧ низкотемпературной плазмы на поверхность ПСА мембран способствует увеличению их селективности относительно водной фазы эмульсии и отталкиванию гидрофобных молекул масла, что обуславливает повышенную эффективность плазмообработанных фильтр-элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Б. Гильман. *Химия высоких энергий*. **37** (2003) С. 20-26.
2. Л.В. Фетисов, А.В. Федотова, В.О. Дряхлов, И.Г. Шайхиев. *Вестник технологического университета*. **19** (2016) С. 31-34.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ ТИПА «КОН-Н₃ВО₃»
INVESTIGATION OF COATING THICKNESS OBTAINED BY PLASMA
ELECTROLYTIC OXIDATION ON ALUMINIUM ALLOYS IN
ELECTROLYTES OF TYPE «КОН-Н₃ВО₃»**

Косенко А.¹, Кузнецов Ю.А.², Коломейченко А.В.², Титов Н.В.², Соловьев
Р.Ю.³, Шарифуллин С.Н.⁴

¹*Ариэльский Университетский Центр, Израиль, 40700, г. Ариэль, Science Park*

²*ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»,
Россия, 302019, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69,
e-mail: kolom_sasha@inbox.ru*

³*ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, 109428, г. Москва,
1-й Институтский проезд, д. 1, e-mail: rudsol@mail.ru*

⁴*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул.
Кремлевская, д. 18, e-mail: Saidchist@mail.ru*

Работа посвящена исследованию толщины покрытий, сформированных плазменно-электролитическим оксидированием на различных алюминиевых сплавах в электролите типа «КОН-Н₃ВО₃».

The work is devoted to the investigation of the thickness of coatings formed by plasma electrolytic oxidation on various aluminum alloys in an electrolyte of the «КОН-Н₃ВО₃» type.

Одним из перспективных способов, позволяющих в значительной степени увеличить ресурс деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов (поршни двигателей внутреннего сгорания, корпуса гидравлических шестеренных насосов и т.п.) является плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО). Суть ПЭО заключается в формировании на поверхности детали в условиях воздействия микроплазменных разрядов тонкослойного высокопрочного износостойкого керамического покрытия, состоящего преимущественно из твердофазных оксидов алюминия.

Исследования показали, что толщина покрытия, необходимая для обеспечения высокой износо- и коррозионной стойкости, низкой пористости должна быть не менее 90...120 мкм. Для упрочнения поверхностей дополнительной ремонтной детали (например, ремонтных втулок) в электролите типа «КОН-Н₃ВО₃» можно рекомендовать следующее: для изготовления ремонтных втулок ДРД применять сплав АМг2; использовать электролит следующего состава, г/л: КОН – 4...6, Н₃ВО₃ – 20...25; рекомендуемая температура электролита 30...35 °С; плотность тока в ходе процесса поддерживать около 20...25 А/дм²; рекомендуемая продолжительность ПЭО – 110...130 мин.

Данный способ упрочнения поверхностей деталей может быть рекомендован к внедрению на машиностроительных и ремонтно-технических предприятиях, занимающихся изготовлением, восстановлением и упрочнением деталей. Прогнозируемое увеличение ресурса упрочненных деталей составит не менее 150...200% по отношению к новым деталям.

ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ КАК МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОФИЛЬНОСТИ ТКАНЕЙ СМЕСОВОГО СОСТАВА

PLASMA MODIFICATION AS A METHOD OF REGULATION OF HYDROPHILICITY OF FABRICS BLENDED COMPOSITION

М.В. Антонова, И.В. Красина, С.В. Илюшина

Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015 Казань, ул. К.Маркса 68)

Аннотация: В статье рассмотрено влияние плазменной модификации на поверхностные свойства смесовых тканей.

Abstract: In article influence of plasma modification on the surface properties of mixed fabrics.

Проблема регулирования гидрофильности поверхностей тканей смесового состава остается значимой при пропитке их препаратами на водной основе, например антибактериальными растворами. Содержание в составе тканей синтетических волокон приводит к гидрофобизации их поверхности. Пропитка таких тканей водными растворами затруднена. Поэтому, чтобы активировать поверхность текстильного материала, была проведена его модификация в низкотемпературной плазме пониженного давления в гидрофильном режиме. Для исследований выбраны ткани состава: 1- 80% -хлопок, 20% полиэстер; 2 - 65% полиэстер, 35% хлопок. Для каждого вида ткани, в зависимости от состава выбирался свой режим обработки в плазме высокочастотного емкостного разряда.

Выбор режимов плазменной обработки основывался на изменении капиллярности ткани с параллельным контролем изменения механических характеристик и гигиенических свойств. Модификация выбранных тканей смесового состава в высокочастотной плазме пониженного давления не приводит к ухудшению их гигиенических показателей. Показатели гигроскопичности, воздухопроницаемости и паропроницаемости остаются в пределах нормы. Капиллярность, смачиваемость и водопоглощаемость несколько увеличиваются, что способствует лучшему проникновению растворов вглубь волокон .

Показатели прочности на разрыв и относительного удлинения тканей остаются в пределах нормы.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что плазменная модификация способствует повышению гидрофильных свойств тканей смесового состава, и может быть использована как метод регулирования свойств поверхности текстильных материалов.

ПУЛЬСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

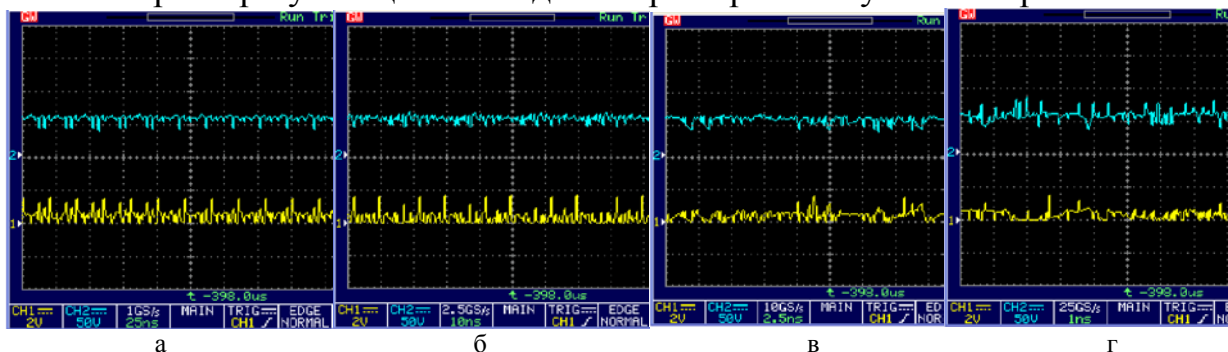
PULSATION OF VOLTAGE AND DISCHARGE CURRENT WITH LIQUID ELECTRODES

Галимзянов И.И., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ф.М., Булатов Р.И., Иванова А. В.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н. Туполева-КАИ, Республика Татарстан, Россия, lilup@bk.ru

The purpose of this work is to study the pulsations of the current and discharge voltage with liquid electrodes. Shows a change in the nature of pulsations with increasing source voltage.

Целью данной работы является изучение пульсаций напряжения и тока микроразрядов между струйным электролитическим анодом и жидким катодом в широком диапазоне развертки времени. В качестве электролита использовался 20 % раствор хлорида натрия в технической воде. Колебания напряжения и тока наблюдались на экране цифрового осциллографа GD S-806S. Длина струи электролита 30 мм, диаметр струи 3 мм и расход электролита 3,8 г/с. Развертка времени менялась от 50 нс до 1 нс. Пульсации напряжения и тока микроразрядов исследовались для четырех режимов напряжения источника питания ($U=350-1200$ В). При первом режиме микроразряды не горели из-за недостаточной величины $U=350$ В. Во втором режиме источника питания $U=500$ В в диапазоне развертки от 25 нс до 1 нс среднее значение тока разряда равнялось 4 А с пульсацией тока микроразряда до 18А. Характер пульсаций U и I для второго режима указан на рис. 1 а-г.



В интервале развертки времени от 25 до 10 нс наблюдаются периодически повторяющиеся импульсы напряжения и тока микроразрядов. На рис.1 в и г при времени развертки от 10 до 1 нс наблюдаются короткие импульсы токов, а между ними- случайные колебания. Величина импульсов тока микроразрядов достигает 1,8 А. При уменьшении времени развертки от 5 до 2,5 нс, проявляются микроимпульсы различной геометрической формы. В данном случае токи микроразрядов меняются от 0,5 до 2 А, а напряжение в среднем составляет около 500В. С ростом напряжения источника питания характер и величина пульсаций U и I существенно меняются.

ПОЛУЧЕНИЕ КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

OBTAINING OF COLLAGEN COMPOSITE MATERIALS USING A PLASMA PROCESSING

Э.Ф. Вознесенский, Е.С. Васильев, А.К. Хайруллин
ФГБОУ ВО «КНИТУ», РФ, г.Казань, ул.Карла Маркса д.68 e-mail:
jevgen321@gmail.com

Рассмотрено получение коллагенсодержащего композитного материала с использованием плазменной обработки. Концентрация связующего вещества и продолжительность плазменной обработки влияют на физико-механические свойства композита.

The thesis considers the obtaining of collagen composite material using plasma processing. The concentration of the binder and the duration of the plasma processing affect the physical and mechanical properties of the composite.

Одним из направлений рационального производства является изготовление композитных строительных материалов на основе коллагенсодержащих отходов. Материалы обладают хорошими звуко-, шумо-, теплоизоляционными характеристиками. Основными компонентами композитных материалов на базе отходов кожевенного производства являются хромовая стружка и полимерное связующее вещество, например, дисперсия на основе поливинилацетата (ПВА).

Предложено провести модификацию хромовой стружки с целью повышения ее гидрофильности и снижения концентрации ПВА. Ранее установлено [1], что низкотемпературное плазменное (НТП) воздействие существенно зависит от химического состава компонентов материала.

Обработка проводилась на опытно-промышленной высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазменной установке. Использовались следующие параметры плазменной обработки: частота генератора $f = 13,56$ МГц; давление в рабочей камере $P = 26,6$ Па; расход плазмообразующего газа – аргона $G = 0,04$ г/с; продолжительность обработки $t = 5–15$ мин; мощность разряда $W_p = 1,6$ кВт.

Далее сухая кожевенная стружка смешивалась с водной дисперсией ПВА концентрации 35–55%. Образцы композита размером 10×10 см и толщиной от 1–1,2 см формировались, высушивались в течение 24–48 часов.

Установлено, что при плазменной обработке в течение 5 мин и концентрации ПВА 35 % достигается наибольшая прочность, повышается стойкость на истирание на 25–35 %; при обработке в течение 15 мин и концентрации ПВА 55% улучшаются звукоизолирующие свойства на 15–20 %. Плазменная обработка также позволяет снизить количество расходуемого ПВА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джанбекова, Л.Р. Физическая модель взаимодействия коллагенсодержащих волокнистых материалов с низкотемпературной плазмой пониженного давления / Л.Р. Джанбекова. – Вестник Казанского технологического университета, 2009, №4. – С.193–198.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОЗДУХЕ И АРГОНЕ

MODIFICATION OF POLYPROPYLENE IN THE ATMOSPHERIC PRESSURE AIR AND ARGON DISCHARGES AFTERGLOW

Василькин Д.П.¹, Шикова Т.Г.¹, Титов В.А.², Смирнов С.А.¹, Хомякова Н.С.¹
¹ФГБОУ ВО «ИГХТУ», Россия, 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7;
E-mail: d-vasilkin@mail.ru

²Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Россия, г. Иваново

Исследовано влияние обработки в послесвечении разрядов в воздухе и аргоне на смачиваемость, топологию и химический состав поверхности пленок полипропилена (ПП). Показано, что результаты модифицирования полимера зависят от рода газа, скорости его потока, времени обработки и расстояния от образца до зоны разряда.

The influence of processing in the afterglow of discharges in air and argon on the wettability, topology and chemical composition of the surface films of polypropylene (PP) was investigated. It is shown that the polymer modification results depend on the gas nature, gas flow rate, treatment time and distance from the sample to the discharge area.

Одним из наиболее перспективных и современных методов модифицирования полимеров является воздействие плазмы при пониженном или атмосферном давлении. Целью настоящей работы было исследование влияния условий проведения процесса в послесвечении разрядов атмосферного давления в аргоне и воздухе на эффективность модифицирования ПП. Методика эксперимента изложена в [1]. Обработка полимера приводит к улучшению смачиваемости поверхности. Краевые углы смачивания уменьшаются от 89° для исходного образца до 58° и 48° для разрядов в воздухе и аргоне соответственно. Исследование пленок методом ИК спектроскопии показало, что модифицирование полимера в послесвечении разряда приводит к окислению поверхности. При использовании обоих газов наблюдается увеличение поглощения в области валентных колебаний связи С=О, а для аргона отмечается также рост поглощения в области валентных колебаний связи О-Н. Оценка концентраций этих функциональных групп показала, что в случае аргона, несмотря на более низкое содержание в поверхностных слоях полимера карбонильных групп, общая концентрация кислородсодержащих групп за счет образования гидроксильных групп выше, чем при обработке в воздухе. Причиной этого может быть более высокая концентрация гидроксил радикалов в плазме аргона. Расчеты показали, что концентрация гидроксил радикалов, как продуктов диссоциации примесей воды в положительном столбе разряда в аргоне почти на два порядка выше, чем в разряде воздуха.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ивановской области в рамках научного проекта № 15-42-03124-р-центр-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнова К.В., Никитин Д.И., Шикова Т.Г., Титов В.А. *Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий*. 2015. Т. 1, № 6. С. 119-124

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ НА ГИГИЕНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕМБРАННЫМ ПОКРЫТИЕМ

INFLUENCE OF PLASMA MODIFICATION ON HYGIENIC PROPERTIES OF TEXTILE FABRICS WITH MEMBRANE COATING

Ибрагимов Р.Г., Вознесенский Э.Ф., Вишневская О.В.

ФГБОУ ВО «КНИТУ», Россия, 420015, Казань, ул.К.Маркса 68, modif@inbox.ru

В работе рассматривается процесс влияния плазменной обработки на гигиенические свойства текстильных материалов с мембранным покрытием с целью улучшения паро-, воздухопроницаемости и водоупорности.

The paper considers the process of influence plasma treatment on the hygienic properties of textile materials with a membrane coating to improve steam, air permeability and waterproof.

Ассортимент изделий из текстильных материалов с мембранным покрытием, используемых для пошива специальной одежды курток верха, не решает всех проблем, связанных с эксплуатационными способностями данного материала. Известно, что основным недостатком текстильных материалов с беспористым мембранным покрытием является их низкая паропроницаемость. Целью данного исследования являлась модификация текстильных материалов с мембранным покрытием в ВЧЕ-плазме пониженного давления для повышения показателей гигиенических свойств.

В качестве объектов исследования были выбраны полиэфирная ткань с ПУ покрытием Климат 3 и полиэфирвискозная ткань с ПУ покрытием Климат 3+ и подкладкой производства ОАО «Чайковский текстиль» (г. Чайковский).

Эксперименты выполнялись на ВЧЕ-плазменной установке пониженного давления, подробное описание установки и режимы обработки представлены в работах [1,2]. Для определения закономерностей влияния плазмы на свойства материалов с мембранным покрытием, были проведены испытания на паропроницаемость по ГОСТ 22900-78, водоупорность на приборе FX 3000 HYDROTESTER III, воздухопроницаемость по стандарту ASTM D737.

В работе установлено, что обработка в плазме ВЧЕ-разряда пониженного давления текстильных материалов с покрытиями Климат 3 и Климат 3+ позволяет увеличить паропроницаемость на 12,3% и 8,8%, соответственно; приводит к повышению воздухопроницаемости на 31% и 54%, соответственно; при этом водозащитные свойства текстильных материалов с мембранным покрытием сохраняются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. *Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения*, 2000.
2. Ибрагимов Р.Г., Вознесенский Э.Ф., Гревцев В.А., Вишневская О.В., Вишневский В.В., Осипов Н.В. *Вестник технологического университета*. **20** (2017) 88.

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ СИЛИКАТНЫХ И ТУГОПЛАВКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

PLASMA TECHNOLOGY FOR PROCESSING OF SILICATE AND NON-METALLIC REFRACTORY MATERIALS

Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В.
*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,
E-mail: vgg-tomsk@mail.ru*

Аннотация: В данной работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по получению силикатных расплавов с использованием энергии низкотемпературной плазмы.

Abstract: In this paper, we present the results of theoretical and experimental studies on the production of silicate melts using low-temperature plasma energy.

Разнообразие задач, решаемых в области технологии получения тугоплавких силикатных расплавов с использованием энергии низкотемпературной плазмы, обусловило разработку и создание плазмохимических реакторов способных вырабатывать расплав из материалов с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % масс [1-3].

Анализ результатов экспериментов позволил сделать выводы о том, что процесс получения расплава в условиях низкотемпературной плазмы отличается отсутствием отдельных этапов образования первичного эвтектического расплава и растворения оксидов в расплаве. Эти процессы за счет быстрого нагрева шихты протекают одновременно с процессом образования гетерогенного расплава одновременным плавлением всех компонентов, который в итоге, перемешивается, образуя гомогенный силикатный расплав за счет понижения вязкости. Процесс получения расплава в условиях низкотемпературной плазмы со скоростью нагрева сырьевых материалов более 1000 °С в секунду характеризуется одновременным плавлением всех фаз, в отличие от процессов, протекающих при обычных скоростях нагрева 0,5–1 °С в секунду. Сверхвысокие скорости нагрева сокращают время образования гетерогенного расплава и уменьшают удельные энергозатраты (1,5–2,1 кВт/кг), что в 2–2,5 раза меньше, чем в существующих технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. G. Volokitin, N. K. Skripnikova, O.G. Volokitin, S. Volland. *Glass and Ceramics*. **68** (2011) pp. 239-241.
2. G. Volokitin, N. Skripnikova, O. Volokitin, I. Iuriev, V. Shekhovcov. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. **71** (2015).
3. Yu. A. Abzaev, G. G. Volokitin, N. K. Skripnikova, O. G. Volokitin, V. V. Shekhovtsov. *Glass and Ceramics*. **72** (2015) pp. 225-227.

RESEARCH OPPORTUNITIES USING PLASMA MODIFICATION FOR TECHNICAL FABRICS

Minyazova A.N., Ilyushina S.V., Antonova M.V., Krasina I.V.

Kazan National Research Technological University, Russia, 420015, Kazan, K.

Marksa, 68, strelfy@mail.ru

Abstract: The article discusses the possibility of using plasma modification to get anti adhesive properties of the technical fabrics.

Technical textiles are widely used for the production of conveyor belts, rubber hoses, flat and V-belts, upholstery seats and the interior lining of cars, for tents, shells, and folding camping hiking, automobile and aircraft tires; in as filter screens.

To reduce the adhesion of filling material on the basis of technical fabrics for the procurement of raw rubber is required to further processing with release formulations. Fabrics are either impregnated or duplicated with film material, or covered with various emulsions based on polymers of low molecular weight rubbers.

Non-equilibrium low-temperature plasma (NLP) changes the adhesive properties of the material surface depending on the parameters of the modification. In connection with this interest is the impact on the NLP fabrics for technical purposes, including on the basis of natural and synthetic fibers.

The object of the study performed technical fabrics ChLH (51% cotton, 49% of PEF) produced by "Krez," Elabuga. Insulating fabric cushioning ChLH is used in the tire industry between steel cord and rubber, therefore, is to make the necessary anti adhesive properties of the technical fabrics to the rubber. Treatment of the samples was carried out at high plasma installation of capacitive discharge. Evaluation of the surface properties of the object of research carried out by changing the capillary tissue according to a standard method according to GOST 3816 - 81.

Experimental dependence of the values of the capillary modes plasma treatment of tissue ChLH is presented in Table 1.

Table 1 - The influence of NLP processing on tissue capillarity (t = 3 min, P = 26.6 Pa; G = 0,04 g/s, argon / propane-butane (70%/30%))

Processing modes	I _a , A	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,8	Not treated
	U _a , kV	4,5	3	6	2,5	4,5	6,5	3	6	4,5	
Capillarity, mm		86	77	63	102	5	89	70	83	8	105

According to Table 1, the lowest elevation of tissue fluid after the plasma-forming gas treatment in argon / propane-butane (70% ÷ 30%) was observed for the parameters: I_a = 0,5 A, U_a = 4,5 kV, t = 3 min, P = 26,6 Pa.

Thus, the processing of technical textiles NLP allows you to effectively regulate the surface properties and can be recommended as an alternative to chemical modification.

АНАЛИЗ ИОННЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ НЕРАСПЫЛЯЮЩЕГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

ION FLUX CHARACTERIZATION IN A NON-SPUTTERING MAGNETRON DISCHARGE

Казиев А. В., Колодко Д. В., Зибров М. С., Степанова Т. В., Леонова К. А.
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409,
Россия, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: kaziev@plasma.mephi.ru*

С помощью фильтра Вина (Е×В зонда) с системой экстракции экспериментально определен состав ионных потоков в плазме нераспыляющего магнетронного разряда при работе в смеси Ar/CO₂ для различных значений мощности разряда. Показано, что содержание ионов металлов в потоке на экстрактор пренебрежимо мало.

The ion flux composition in a non-sputtering magnetron discharge has been experimentally measured by a Wien filter (E×B probe) equipped with an extraction system. It is demonstrated that the metal ion fraction in the extracted flux is negligible.

Нераспыляющий магнетронный разряд (НРМР) — квазистационарный режим магнетронного разряда, характеризующийся высокой плотностью плазмы [1] и малой (< 50 эВ) энергией ионов, бомбардирующих катод [2]. В настоящей работе проводился масс-спектрометрический анализ ионных потоков в плазме НРМР. Эксперименты проводились при давлении 1 Па при различных соотношениях Ar и CO₂ в смеси рабочего газа. Варьировалась мощность разряда, при этом напряжение для всех экспериментов составляло $U_d \sim 80$ В. Ионы вытягивались из центральной области разряда с помощью специализированного экстрактора. Разделение ионов по массам проводилось фильтром Вина (Е×В-зондом) [3].

Полученные спектры свидетельствуют об отсутствии в плазме примесей материала катода или анода, что находится в согласии с результатами других методов диагностики [1, 2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (соглашение 16-32-00825\17).

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Ходаченко, Д. В. Мозгрин, И. К. Фетисов, Т. В. Степанова. *Физика плазмы* **38(1)** (2012) 78
2. A. V. Kaziev, D. V. Kolodko, A. V. Tumarkin, M. M. Kharkov, T. V. Stepanova. *Proc. XXVIIth ISDEIV, Suzhou, China, 18–23 September 2016* 733
3. А. В. Казиев, Д. В. Колодко, Д. Г. Агейченков. *Доклады X Конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», Москва, 14–16 ноября 2016 г.* 217

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ВАННУ-АНОД ЛЕЙКОКСЕНОVOГО КОНЦЕНТРАТА

HEAT IMPACT OF DC PLASMA ARC ON LEUCOXENE MELTED POOL ANODE

Кирпичев Д.Е., Николаев А.А., Николаев А.В., Цветков Ю.В.

ИМЕТ РАН, 119334, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 49, dym2004@bk.ru

Сопоставлены результаты плазменно-дугового восстановления лейкоксенового концентрата в холодном медном и горячем графитовом тиглях. Показано, что худшая проработка концентрата в горячем тигле вызвана меньшими температурой и плотностью тока в анодном пятне.

Results of plasma-arc reduction of leucoxene concentrate in copper and graphite crucibles are compared. It was shown that worse treatment of concentrate in graphite crucible is due to low temperature and current density in anode spot.

Лейкоксеновый концентрат, включающий 55 % TiO_2 и 36 % SiO_2 , относится к перспективному сырью российской титановой промышленности. Плазменно-дуговая восстановительная плавка позволяет получить из этого концентрата синтетически рутил, содержащий более 80 %. Физикохимия процесса заключается в углетермическом восстановлении SiO_2 до SiO с испарением последнего из расплава. При этом необходимо обеспечить температуру расплава в диапазоне 2500 – 3000 К. Целью работы являлось исследование температурного поля в области анодного пятна при вариации тепловых условий на границе ванны. Были сопоставлены эксперименты при медном водоохлаждаемом и графитовом радиационно охлаждаемом тиглях. Получено, что степень рафинирования от кремния в медном тигле в 1,4 раза выше, чем в графитовом, что свидетельствовало о меньшей температуре материала в последнем. Температурное поле ванны определяли расчётом в предположении, что анодное пятно дуги ограничено изотермой $T_0=2000$ К. Для расчёта использовали формулу, полученную по данным [1]:

$$T(r) = 0,282 \frac{Q}{\lambda r_0} [\varphi(r) - \varphi(r_s)] + T_s, \quad (1)$$

где r_0 – радиус анодного пятна, T_s – температура материала в области контакта с тиглем, λ – теплопроводность материала, $\varphi(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{r^2}{2r_0^2}\right)$, I_0 – функция

Бесселя мнимого аргумента. Из расчёта следует, что в медном тигле вследствие сильного охлаждения периферийной области формируется более сосредоточенное анодное пятно с более высокой плотностью тока и средней температурой. При мощности дуги 10 кВт соответствующие значения для медного и графитового тиглей составили: $r_0=2,67$ и $3,22$ см, $j = 15,6$ и $13,8$ А/см², $T_{cp}= 2808$ и 2668 К. Таким образом, несмотря на то, что материал в медном тигле имел более низкую периферийную температуру $T_s= 400$ К против $T_s= 1263$ в графитовом, проработка материала в медном тигле оказалась лучше из-за более высокой температуры в анодном пятне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский И.П. Температурное поле ванны при дуговом нагреве. *Физика и химия обработки материалов*, 1982, № 5, с. 49 - 52.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF CERAMIC UNITS AND PARTS BY SELECTIVE LASER FUSION

S. Kolmakov, S. Koitov, I.Evdokimova

EMBD Novator, JSC. Russia, neo-ksv@yandex.ru, koytov@inbox.ru

The development of highly efficient thermal protection is most acute in missile and aerospace applications in connection with the solution of problems of hypersonic flight with gas-jet control. One of the most effective materials are considered ceramic materials with low thermal conductivity and, in the first place, the oxide materials. However, ceramic parts usually have extremely low thermal resistance, making them unsuitable for operation in the conditions of thermal shock and thermal cycling.

Therefore, currently, a hypersonic aircraft to protect the metal parts from overheating and erosive effects of the environment, in particular in the gas-jet control system applied ceramic thermal barrier coating. This increase in requirements of the range leads to increased thermal loads on the elements of the modernized systems of the gas-jet control. In this regard, more stringent requirements for erosion resistance, strength and thermal insulation ability of ceramic materials to withstand cyclic thermal exposure of high intensity.

Increasing demands for range and intensity of maneuvering hypersonic vehicles at the moment is hampered by the complex dependent factors: weight, heat resistance and mechanical strength of structural materials at elevated temperatures. Existing to date technology of hot pressing and conventional sequential molding followed by sintering of ceramic materials, can not provide the required characteristics of the structural parts for hypersonic vehicles. This is especially true of hollow ceramic parts of cellular structure. Technology of production of ceramic components and parts by means of selective fusion, which refers to the additive technology will enable the engineering industry to solve complex materials science problems and to create a programmable structural material of cellular structure.

It should be noted that the analysis of modern trends of development of the relevant area of science and technology shows a rapidly growing segment of additive manufacturing refers to production technology of ceramic components and parts by means of selective fusing.

The result of the work performed will be established additive technology for manufacture of ceramic units and parts of the hypersonic aircraft of a new type by means of selective laser fusing of the modified ceramic powder materials with the use of innovative diagnostic methods that will increase not less than 30% of the thermal resistance of monolithic ceramic parts, and reduce the cost of production of parts and components of hypersonic vehicles is not less than 25 %, to reduce the time of manufacturing the parts and components of hypersonic vehicles is not less than 2 times.

The result of scientific research works on the program cipher 2016-14-579-0009-027 will be the transition to development work for the manufacture of ceramic units and parts of the hypersonic aircraft of a new type by means of selective laser fusing of the modified ceramic powder materials with the use of innovative methods of diagnostics in the interests of the military-industrial complex of the Russian Federation.

**СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В МАГНЕТРОНЕ
С ГОРЯЧИМ КАТОДОМ**
**DEPOSITION OF PROTECTIVE COATINGS IN THE MAGNETRON
WITH HOT TARGET**

Леонова К.А., Тумаркин А.В., Казиев А.В., Колодко Д.В., Дробинин В.Е.
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409,
Россия, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: leonova.ka.31@gmail.com*

Проведены эксперименты по высокоскоростному (до 15 мкм/мин) осаждению хромовых покрытий в магнетроне с горячим катодом. Получен устойчивый режим самораспыления. Исследовано влияние метода предварительной очистки поверхности образца, а также потенциала смещения в процессе осаждения на адгезионные характеристики покрытий.

Chromium coatings have been deposited by high-rate (up to 15 $\mu\text{m}/\text{min}$) magnetron sputtering with hot target. The magnetron was operated in a stable self-sputtering regime. The influence of both the sample cleaning method and the bias potential on the adhesion of Cr films have been studied.

Актуальной задачей тонкопленочной промышленности является повышение производительности магнетронных распылительных систем (МРС). В частности, большой интерес представляет увеличение скоростей осаждения покрытий на основе Cr, которое является перспективным методом защиты поверхностей материалов в атомной отрасли и автомобилестроении.

Скорость осаждения пленок Cr повышается при использовании МРС с горячим катодом [1]. Однако, достижение предельных скоростей осаждения требует работы в режиме самораспыления. Ранее были разработаны методы высокоскоростного осаждения Cu и Si в таком режиме в МРС с расплавленным катодом [2, 3]. Благодаря высокому давлению насыщенных паров Cr, переход в режим самораспыления происходит при температуре мишени ниже температуры плавления.

Осаждение Cr на образцы из Zr и стали 40X13 проводилось при удельной мощности разряда 45 Вт/см² при значениях потенциала смещения от 0 до –300 В. Скорость осаждения достигала 15 мкм/мин. Поверхности образцов предварительно очищались либо ионным пучком, либо тлеющим разрядом.

Диагностика адгезии проводилась с помощью скретч-тестера с индентором Роквелла. Лучшая адгезия наблюдалась у покрытия, полученного при подаче на образец потенциала смещения –100 В. Влияние метода предварительной очистки на адгезию незначительно.

ЛИТЕРАТУРА:

4. D. V. Sidelev, G. A. Bleykher, V. P. Krivobokov, Z. Koishybayeva. *Surf. Coat. Technol.* **308** (2016) 168.
5. А. В. Тумаркин, Г. В. Ходаченко, А. В. Казиев, И. А. Щелканов, Т. В. Степанова. *Успехи прикладной физики* **1(3)** (2013) 276.
6. A. Tumarkin, M. Zibrov, G. Khodachenko, D. Tumarkina. *J. of Phys.: Conf. Ser.* **768** (2016) 012015.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ZrN-ПОКРЫТИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СТАЛИ СТ3

STUDY OF THE EFFECTS OF MODES OF ION-PLASMA ZrN COATING ON CORROSION RESISTANCE OF ST3 STEEL

Селезнёва Н. В., Гурвич Л. Г., Смоланов Н.А., Осипов А. К.

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва"

Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68, 430005

E-mail: natasch.selezneva2010@yandex.ru

Аннотация: в работе приведены результаты исследования коррозионной стойкости ионно-плазменного покрытия ZrN, нанесенного на сталь марки Ст3. Исследование проводилось гравиметрическим и потенциостатическим методами. Дана сравнительная характеристика коррозионной стойкости пленки в различных коррозионных средах.

Abstract: the paper presents the results of study of corrosion resistance of ZrN ion-plasma coating on St3 steel. The study applied the gravimetric and potentiostatic methods. Comparative characteristic of corrosion resistance of the layer obtained in different modes of spraying is given.

В последнее время ионно-плазменные покрытия на основе ZrN и TiN [1] широко используются для повышения коррозионной стойкости различных металлов и сплавов.

В настоящей работе изучено влияние режимов нанесения ионно-плазменных ZrN-пленок [2] на сталь Ст3.

Таблица. Режимы нанесения ZrN-пленки на Ст3

Режим	Давление, Па	Расход азота, см ³ /сек	Время нанесения, мин	Время начала разрушения после коррозионных испытаний, ч		
				Кислая среда	Нейтральная среда	Щелочная среда
1	0,022	0,6	10	24	24	72
2	0,017	0,3	10	24	48-72	96
3	0,05	0,25	10	Менее 24	24	48
4	0,08	0,2	10	Менее 24	24	72

Гравиметрическим методом установлено, что режимы напыления не оказывают значительного влияния на коррозионную стойкость ZrN-покрытия в кислой и нейтральной средах. Щелочная среда способствует большей коррозионной прочности изучаемых покрытий. Потенциостатические исследования показали, что покрытия, полученные по режиму 1, обладают меньшей склонностью к питтингообразованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин. *Тонкопленочные многослойные покрытия побеждают трещины. РФФИ, Москва, 2007.*
2. А. Л. Каменева, И. И. Замалетдинов, В. И. Кичигин. *Коррозионная стойкость твердого сплава ВК8 с пленками на основе нитридов титана и циркония. Коррозия: Материалы, Защита, 1, Москва, 2013.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧАСТИЦЫ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРОПАН-БУТАНОВОЙ СМЕСИ

INVESTIGATION OF THE IMPACT ON PARTICLES OF THE POROUS MATERIAL OF THE TRANSVERSE DISCHARGE IN THE STREAM OF COMBUSTION PRODUCTS OF COMBUSTION OF PROPANE-BUTANE MIXTURES

Даутов Г.Ю.¹, Софроницкий А.О.^{1,2}, Марков Е.О.¹, Даутов И.Г.^{1,2}.

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

²Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань, 420008, ул. Кремлевская, 18.

E-mail: artempic8@mail.ru

Аннотация: В данной работе было исследовано воздействие поперечного несамостоятельного разряда на частицы пористого материала в потоке продуктов сгорания пропан-бутановой смеси.

Abstract: In this paper, we investigated the effect of a transverse, non-self-sustaining discharge on particles of a porous material in a stream of combustion products of a propane-butane mixture.

В частности, если температура достаточна для ионизации атомов и молекул частиц (NaCl, HCl, CaCl), наблюдается повышение силы тока в десятки раз по сравнению с несамостоятельным поперечным разрядом в потоке продуктов сгорания пропан-бутановой смеси ($U=\text{const}$). Наличие этих условий и развитая поровая структура могут позволить получить многоканальный разряд [1,2].

Вольт-амперная характеристика при введении в область сгорания пропан-бутановой смеси частиц торфа и сапропеле сравнивалась с исходными вольт-амперными характеристиками и полученными ранее для KCl.

Твердые частицы исследовались до и после горения на сканирующем электронном микроскопе «AURIGA CARL ZEISS». Помимо этого, для этих частиц (до и после горения) был измерен рН по ГОСТ 26423-85 «Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки». Результаты работы предполагается использовать для получения компактных обеззараженных питательных смесей для растениеводства, компонентов смесей для восстановления поврежденных почв, при производстве абсорбентов для удаления вязких углеводородов. Изменение геометрии пористой частицы в результате процесса горения позволяет получить экономию в объеме 20-30 %.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гайсин Ал.Ф. *Физика и химия обработки материалов*. 2016. № 3. С. 22-26.
2. Гайсин Ал.Ф., Абдуллин И.Ш., Басыров Р.Ш., Хазиев Р.М., Самитова Г.Т., Шакирова Э.Ф. *Физика плазмы*. 2014. Т. 40. № 12. С.1095.

USAGE OF AC PLASMA TORCH FOR PRODUCTION OF OXIDE POWDERS

Surov A.V., Subbotin D.I., Popov V.E., Popov S.D., Litvyikova A.I.,
Nakonechniy Gh. V., Serba E.O., Obraztsov N.V.

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, Dvortsovaya nab., 18, Saint Petersburg 191186, Russia, subbotin1987@mail.ru

The report deals with the synthesis of oxide materials in a plasma torch with separate injection of plasma-forming gas and solid aerosol of precursors. Thus, it is possible to provide a stability of the plasma torch operation and high degree of mixing of thermal plasma and precursors.

Oxide materials are actively used in a wide range of products, such as catalysts, filter materials, electrical devices (transformer cores), magnetic fluids for tomographic studies, etc. The main methods of their production are hydrothermal synthesis [1], coprecipitation [2], glycine-nitrate synthesis [3], gel-sol process [4], and also electric arc synthesis [5]. Usually plasma synthesis is carried out by mixing the flow of solid particles with the flow of thermal plasma in a plasma reactor. In the proposed method, a plasma torch with two feeding zones of plasma-forming media is considered: the near-electrode zone and the arc-burning zone. In the near-electrode zone the main air flow is fed, and a solid aerosol of the ground oxides with air is tangentially supplied to the arc-burning zone.

The composition and properties of the produced material were studied by energy-dispersive analysis, scanning electron microscopy, IR Fourier spectroscopy and X-ray phase analysis.

REFERENCES

1. S. Byrappa, C.S. Vicas, N. Dhanaraj, K. Namratha, S.D. Keerthana, R. Dey, K. Byrappa. *Journal of Crystal Growth* **452** (2016) 111.
2. F. Huixia, C. Baiyi, Z. Deyi, Z. Jianqiang, T. Lin. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **356** (2014) 68.
3. N. Kikukawa, M. Takemori, Y. Nagano, M. Sugasawa, S. Kobayashi. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **284** (2004) 206.
4. V.A. Zhuravlev, R.V. Minin, V.I. Itin, I. Yu. Lilenko. *Journal of Alloys and Compounds Volume* **692** (2017) 705.
5. M. Farbod, A. Movahed, I. Kazeminezhad. *Materials Letters* **89** (2012) 140.

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНОГО ДУБИТЕЛЯ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL FEATURES OF VEGETABLE TANNING AGENT IN GAS DISCHARGE PLASMA

Э.Ф. Вознесенский, А.М. Сабиров, А.К. Хайруллин

ФГБОУ ВО «КНИТУ», РФ, г.Казань, ул.Карла Маркса д.68 e-mail:

beckhenkel@mail.ru

Рассмотрена модификация растительного дубителя за счет плазменного воздействия. Применение полученного продукта в процессе додубливания кожи позволяет улучшить ее физико-механические и потребительские свойства.

The thesis considers the modification of vegetable tanning agent due to a plasma effect. Application of the obtained product in the process of leather retanning improves its physical-mechanical and consumer properties.

Натуральные танинсодержащие растительные экстракты обладают хорошей связывающей способностью при переработке кожевенно-меховых материалов. Однако, из-за большой молекулярной массы и образования крупных агрегатов растительные дубители существенно уступают токсичным хромовым. Предложено провести активацию сухого дубящего растительного экстракта квебрахо в условиях высокочастотного индукционного (ВЧИ) плазменного разряда с целью снижения молекулярной массы и разрушения агрегатов. Обработка проводилась на оборудовании, описанном в источнике [1], использовались следующие параметры плазменной обработки: плазмообразующий газ – аргон; давление в рабочей камере 30 Па; расход плазмообразующего газа 0,04 г/с; энергия ионов плазмы 10–15 эВ, плотность ионного тока 20 А/м², сухой материал инжестировался в разряд с потоком плазмообразующего газа и улавливался ловушкой.

Установлено, что плазменная модификация приводит к уменьшению оптической плотности получаемых растворов; их характеристическая вязкость снижается в 2,7 раза. Происходит снижение размеров коллоидных фракций дубителя с 68,94–98,13 нм и 367,33–502,88 нм у контрольного образца до 48,37–68,94 нм и 260,28–405,29 нм у опытного. При использовании модифицированного дубителя процесс додубливания полуфабриката овчины необходимо проводить при рН=4; при этом термостойкость кожи увеличивается на 9⁰С; предел прочности – на 15%; относительное удлинение – на 50 %. Полученные кожи также обладают улучшенными свойствами: мягкий гриф и равномерная окраска поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин, И.Ш. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, Н.Ф. Кашапов. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2000. – 348 с.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПОТОКАМИ ИОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧИ РАЗРЯДА

TITANIUM SURFACE MODIFICATION UNDER ION FLUXES IN AN ICP DISCHARGE

Харьков М.М., Казиев А.В., Тумаркин А.В., Дробинин В.Е., Мещерякова Е.А.,
Писарев А.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409,
Россия, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: wolframax@yandex.ru*

Проведены эксперименты по ионной модификации поверхности образцов из титана VT1-0 в плазме высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда низкого давления. В зависимости от параметров обработки получены различные варианты развития микрорельефа с характерными масштабами неровностей в диапазоне 0,5–5 мкм.

The ion surface modification experiments have been conducted with samples of VT1-0 titanium in a low-pressure ICP discharge. Depending on the treatment parameters, different surface topography structures have been obtained, with the roughness features in the range of 0.5–5 μm .

Исследовалось воздействие облучения ионами в плазме высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда на структуру поверхности образцов из титана VT1-0. Эксперименты проводились при ВЧ мощности 1 кВт при различных давлениях Ar, потенциале смещения подложки, температуре и длительности обработки. Поверхность после травления диагностировалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). На рис. 1 представлены изображения поверхности титана после обработки в различных режимах.

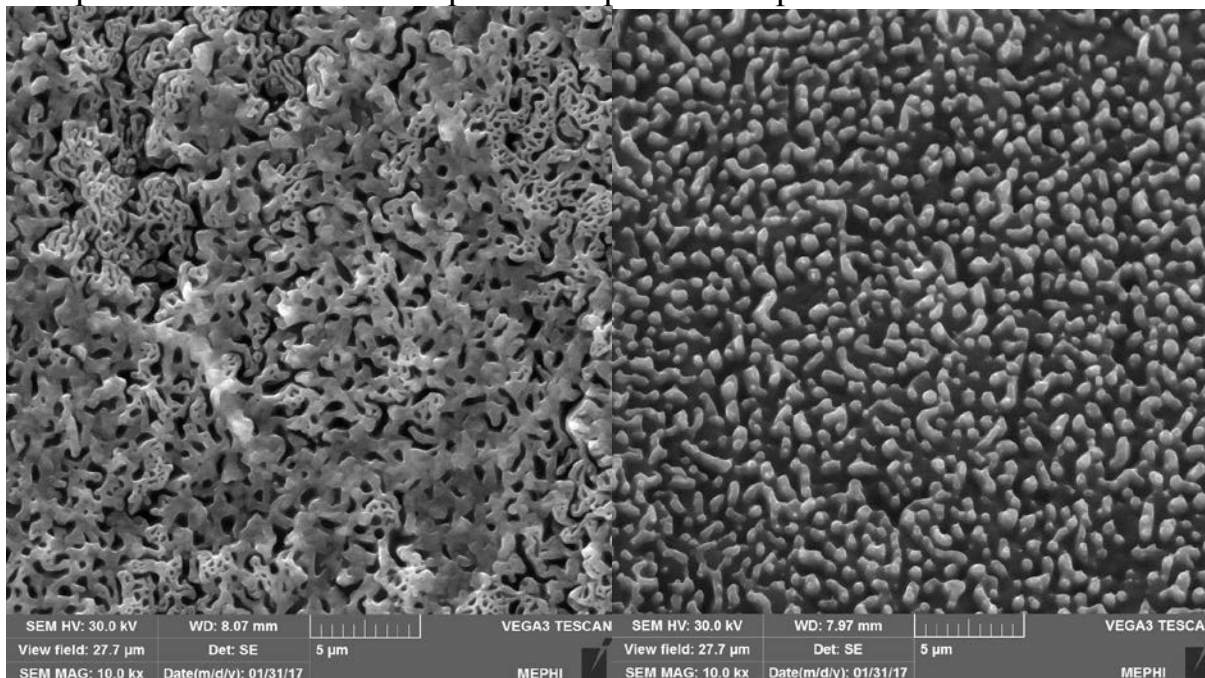


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности титана VT1-0 после травления в плазме.

Технологии развития микрорельефа поверхности актуальны для улучшения характеристик имплантатов, а также могут найти применение при разработке новых накопителей энергии.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРИАЛОВ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ
IMPROVEMENT OF TECHNICAL PURPOSE MATERIALS
PERFORMANCE CHARACTERISTICS WITH THE RADIO FREQUENCY
LOW PRESSURE PLASMA**

Махоткина Л.Ю., Христолюбова В.И.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
РФ, 420015, vallerrriya@mail.ru*

Рассмотрено воздействие высокочастотной плазмы пониженного давления в процессах модификации материалов технического назначения. Обоснована эффективность применения плазменных технологий. Приведены результаты обработки образцов технических материалов в высокочастотной плазме пониженного давления.

The impact of low pressure radio frequency plasma in the processes of materials for special purposes modification are considered. The efficiency of the plasma technology application is provided. The results of the materials for special purposes sample processing by a radio frequency low pressure plasma are described.

При разработке конструкций изделий технического назначения и выборе материалов для ее изготовления необходимо комплексное решение задач по обеспечению как эксплуатационных, так и гигиенических свойств. Для совмещения этих требований необходима разработка принципиально новых специальных решений производства изделий, изготовленных из разрабатываемых технических материалов.

Исследования проводились на экспериментальных образцах материалов технического назначения, выполненных по двум технологиям: наноструктурированные образцы (натуральные материалы, которые на заключительном этапе отделочного производства обрабатывали ВЧ-плазмой пониженного давления в режиме $W_p = 1,5$ кВт, $\tau = 7$ минут), наномодифицированные образцы (натуральные материалы, где на этапе жирования, при покрывном крашении и на этапе нанесения закрепителя покрывной пленки двукратно вводили биоцидный агент, раствор наночастиц серебра 0,2 %, а на этапе отделочного производства обрабатывали ВЧ-плазмой пониженного давления в режиме $W_p = 1,5$ кВт, $\tau = 7$ минут).

Плазмотрон для получения потока плазмы ВЧЕ типа с плоскими электродами представляет собой две водоохлаждаемые медные пластины размером 20x30 см или диаметром 40 см. Electrodes размещены в вакуумном блоке. Между электродами размещается приспособление для закрепления образцов с устройством для их вращения в процессе обработки. Основание вакуумного блока смонтировано в виде сварного каркаса. На каркасе блока размещены двухроторные насосы и система водяного охлаждения узлов установки.

В результате наноструктурирования и наномодифицирования материалов, из которых изготавливаются изделия технического назначения, увеличиваются физические, механические и гигиенические характеристики. Обработка материалов позволяет увеличить эксплуатационные показатели изделий и продлить их срок службы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ

SIMULATION OF THE PROCESSES OF PULSE ELECTRON-ION-PLASMA SURFACE TREATMENT OF ALUMINUM

Коваль Т.В., Чан Ми Ким Ан

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия 634050 Томск, пр. Ленина 30, tranmykiman@gmail.com*

Numerical simulation of the processes of combined treatment of aluminum surfaces combining electron-beam mixing of the film / substrate system and nitriding in a low-pressure gas discharge plasma is carried out.

Комбинированная обработка поверхности алюминия, сочетающая электронно-пучковое перемешивание системы пленка/подложка, и азотирование в плазме газового разряда низкого давления позволяет формировать поверхностного слоя с повышенным (более чем в два раза, по отношению к исходному материалу) значением твердости [1].

В работе проводится численное моделирование импульсного электронно-пучкового воздействия на систему титан/алюминий с последующим насыщением атомами азота. Термодиффузионные процессы исследовались в диапазоне плотностей энергии электронов ($10-30 \text{ Дж / см}^2$) и длительностью импульса (50 - 200 мкс). Показано, что в зависимости от режима пучкового воздействия в поверхностном слое алюминия перемешивание пленки происходит как при ее полном расплаве, так при ее не полном расплаве за счет силы тяжести.

Сравнение расчетов с экспериментом показывает, что электронно-пучковое перемешивание системы пленка (титан)/подложка (алюминий) при вариации плотности энергии электронного пучка и количества импульсов воздействия сопровождается диффузией атомов титана.

Процесс азотирования в плазме газового разряда низкого давления, является заключительным этапом модификации и носит диффузионный характер. Численное моделирование диффузионного процесса насыщения азотом в результате бомбардировки поверхности материала ионами плазмы существенно зависит от структуры поверхностного слоя алюминия, сформированной после пучковой обработки, а интенсивность процесса определяется количеством атомарного азота и зависит от интенсивности распыления поверхностного слоя ионами плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. Под ред. Н.Н. Ковалья и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изво НТЛ, 2016. – 312.

УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ МЕЗДРИЛЬНЫХ НОЖЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЕМКОСТНЫМ РАЗРЯДОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

HARDENING OF THE CUTTING EDGE FLESHING KNIFE RADIO- FREQUENCY CAPACITIVE DISCHARGE OF LOW PRESSURE

Шаехов М.Ф., Кадыров Ф.Ф.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
(КНИТУ-КХТИ), Россия, 420015, Российская Федерация, Республика
Татарстан, Казань, ул.К.Маркса, 68, E-mail: office@kstu.ru*

Проведена плазменная обработка мездрильных ножей. Исследовали такие параметры как: микротвердость, радиус угла заточки, шероховатость поверхности до и после плазменного воздействия.

Carried out plasma processing of fleshing knives. Investigated parameters such as microhardness, angle radius, surface roughness before and after plasma exposure.

Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения является обработка в высокочастотном разряде пониженного давления. Суть такой модификации материалов состоит в том, что атомы плазмообразующего газа проникают в поверхностные слои материала на глубину порядка 60 нм. Если плазмообразующий газ реакционно-способный (O_2 , N_2 , CH_4 и т.д.), то на поверхности образуются нанофазные системы из оксидов, нитридов и карбидов элементов, входящих в состав материала [1-2].

Особенностью мездрильных ножей является острая кромка заточки по кругу. Во время модификации в ВЧЕ разряде пониженного давления необходимо увеличить микротвердость и минимизировать закругление режущей кромки ножа.

Мездрильные ножи модифицировали в следующем режиме:

Мощность разряда	1200 Вт
Расход газа аргона	0,045 г/с
Давление в камере,	24 Па
Время обработки,	20 мин
Расход газа азота,	0,006 г/с

В результате плазменной обработки микротвердость ножей увеличилась на 45,2%, радиус угла заточки на 36%, шероховатость поверхности увеличилась по параметру R_a на 38,5%, по параметру R_z на 13,1%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев И.И. *Взаимодействие плазмы с поверхностью металлических изделий* / И.И. Васильев, И.Ш. Абдуллин, М.М. Миронов // Вестник Казанского технологического университета. - 2014.-№7. -С 71-73.
2. Хубатхузин А.А. *Использование плазменных методов для модификации поверхности металлов*/ А.А. Хубатхузин, И.Ш. Абдуллин, А.А. Башкирцев, Э.Б. Гатина // Вестник Казанского технологического университета. – 2012.- №22. -С 48-52.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
ТЕКСТИЛЯ, ПРОПИТАННОГО КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ**

**THE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE MODIFIED
CARBON TECHNICAL TEXTILES IMPREGNATED WITH ADHESIVE
COMPOSITION**

Гарифуллин А.Р., Каримуллин И.И., Карноухов А.Е., Парсанов А.С.,
Шаехов М.Ф.

*ФГБОУ ВО «КНИТУ», Россия, 420015, Казань, К.Маркса 68,
darin-loko@yandex.ru*

Исследовано изменение показателей физико-механических свойств технического текстиля из УВ, пропитанного клеевой композицией. Установлена корреляционная связь между капиллярностью технического текстиля из углеродных волокон (УВ) и сдвиговой прочностью клеевого соединения. Установлено, что ВЧ плазменная модификация обеспечивает повышение показателей физико-механических свойств на 15-20 %.

Studied mechanical properties of carbon technical textiles impregnated with the adhesive composition. Correlation established between the capillarity of carbon technical textiles and the shear strength of the adhesive bond. Found that the RF plasma modification provides improved mechanical properties by 15-20 %.

Эффективным методом модификации материалов различной химической природы является обработка в плазме высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда при пониженном давлении в диапазоне от 13 до 133 Па. К числу достоинств данного метода следует отнести возможность регулирования комплекса свойств без ухудшения физико-механических показателей объекта [1].

Установлена сильная корреляционная связь между капиллярностью технического текстиля из УВ и сдвиговой прочностью клеевого соединения. Коэффициент корреляции составляет 0,92.

Регулирование смачиваемости позволяет направленно изменять показатели физико-механических свойств технического текстиля из УВ, пропитанного клеевой композицией, что дает возможность производить материал с заданными свойствами.

Выявлено, что регулирование комплекса свойств технического текстиля из УВ позволяет направленно изменять показатели физико-механических характеристик текстиля, пропитанного клеевой композицией. Установлено, что ВЧЕ плазменная модификация технического текстиля обеспечивает повышение сдвиговой прочности на 40-50 %, модуля упругости при растяжении от 13 до 15 %, модуля упругости при сжатии от 11 до 18%, предела прочности при сжатии от 16 до 19 %. По итогам испытания технического текстиля, пропитанного клеевой композицией на короткобалочный изгиб предварительная модификация обеспечивает повышение межслоевой прочности на 16 %.

1. А.Р. Гарифуллин, И.Ш. Абдуллин. *Вестник Казанского технологического университета*. 17. 14. 101–102 (2014)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ИОННО – ПЛАЗМЕННЫХ КАРБОНИТРИДЦИРКОНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ 12Х18Н10Т

ELECTROCHEMICAL AND CORROSION PROPERTIES OF ION-PLASMA ZIRCONIUM CARBONITRIDE COATINGS ON 12X18H10T STEEL

Шкергина М.В., Гурвич Л. Г., Смоланов Н. А., Осипов А.К.

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва"

Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68, 430005

E-mail: marissshka2015@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены закономерности коррозионно – электрохимического поведения ионно – плазменных покрытий из карбонитрида циркония на стали 12Х18Н10Т гравиметрическим, потенциостатическим, фотоколориметрическим методами. Дана сравнительная оценка коррозионных потерь в различных коррозионных средах.

Abstract: regularities of electrochemical corrosion behavior of ion-plasma zirconium carbonitride coatings on 12X18H10T steel were examined by means of the gravimetric, potentiostatic and photocolorimetric methods. Comparative assessment of corrosion losses in different corrosive environments was given.

Обеспечение высокой коррозионной стойкости металлических поверхностей изделий не потеряет актуальности и в обозримом будущем. Для защиты стальных конструкций перспективно использование ионно – плазменных покрытий на основе соединений циркония. Высокая температура плавления, твёрдость, износостойкость, коррозионная стойкость и устойчивость к окислению карбонитрида циркония определяют широкое применение таких покрытий в качестве защиты стальных поверхностей [1].

Так как электрохимические и коррозионные свойства данного вида покрытия на стали 12Х18Н10Т в настоящее время изучены недостаточно полно, то этот аспект и явился целью представленной работы.

В ходе эксперимента получена зависимость скорости коррозии исследуемых образцов от времени в различных средах гравиметрическим методом [2]. Кинетика электродных реакций была изучена на основе анодных поляризационных кривых. Установлена целесообразность нанесения карбонитридциркониевых покрытий в качестве защитных на сталь 12Х18Н10Т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амирханова Н.А., Валиев Р.З., Разяпова А.Ф., Рааб Г.И. *Исследование коррозионного поведения и высокоскоростного растворения сталей Ст3, Ст 45 и 12Х18Н10Т в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях* // Вестник УГАТУ. – 2008. – №1. – С. 91-95.
2. Харина Г.В., Ведерников А.С., Садриев Р.С. *Исследование коррозионного поведения стали 20Л в агрессивных средах* // Наука, техника и образование. - 2015. - № 8. – С. 8-12.

**ВЛИЯНИЕ ВЧ ПЛАЗМЫ Пониженного Давления на
всхожесть семян сельскохозяйственных культур**
**INFLUENCE OF HF PLASMA OF THE LOWERED PRESSURE UPON
VIABILITY OF SEEDS OF CROPS**

Шарифуллин Ф.С.¹⁾, Гафаров И.Г.²⁾

ФГБОУ ВО «КНИТУ», Россия, г.Казань, ул.К.Маркса, д.68,

E-mail: sharifullin80@mail.ru

*Научно-внедренческая фирма «РЕНАРИСОРБ», Россия, Ленинский проспект,
88/3,*

E-mail: renari@mail.ru

Исследовано влияние режимов плазменной обработки на всхожесть семян сельскохозяйственных культур. Установлено, что высокочастотная плазма может успешно применяться в технологических операциях при подготовке семян к посеву, обеззараживании семян от болезней и вредителей, а также стимуляции прорастания.

Influence of the modes of plasma processing on viability of seeds of crops is investigated. It is established that high-frequency plasma can successfully be applied in technological operations by preparation of seeds for crops, disinfecting of seeds from diseases and wreckers, and also germination stimulation.

Высокая стоимость стимуляторов, сложная и дорогостоящая технология химической обработки и дражирования семян, вредное действие химикатов на людей и животных заставляют ученых и практиков искать новые, альтернативные способы повышения качества семян.

Объектами исследования являлись различные сельскохозяйственные культуры: семена кукурузы, подсолнечника, огурцов, моркови, бахчевых. Для обработки семян использовалась высокочастотная емкостная плазменная установка. Режимы плазменной обработки: мощность разряда 0,1-1,5 кВт, давление в вакуумной камере 26,6 Па, время обработки 30-300 с, расход плазмообразующего газа (50% Ar/50% N₂) 0,04г/с. Семена прорастивались в оптимальных условиях в специальной камере (влажность 96-98%, температура 22-25 °С).

Анализ полученных результатов показывает стимулирующее воздействие плазменной обработки. Прорастание и лабораторная всхожесть семян увеличивались по отношению к контрольным образцам на 4-10%, при этом обработка положительно влияет на последующее развитие растений. Замеры и оценка проростков по бальной системе показали, что по всем вариантам обработки они лучше на 8-18 %, чем у контрольных.

Особого внимания заслуживает губительное влияние плазмы на вредителей и болезни семян. Обработка плазмой снижает количество больных семян, заложенных на прорастивание на 40-50 %. С увеличением времени обработки обеззараживающее действие плазмы возрастает, однако полного обеззараживания семян не происходит.

Опыты позволяют сделать выводы о том, что обработка семян ВЧ плазмой пониженного давления может стать эффективным агротехническим приемом стимулирования роста овощных и зерновых культур, который является более эффективным и безопасным, нежели существующие химические и физические способы обеззараживания и предпосевной подготовки семян.

PLASMA-INDUCED ELECTRET CHARGE IN POLYTETRAFLUOROETHYLENE FILMS

Yablokov M.Yu., Gilman A.B., Kuznetsov A.A.

Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials RAS, Russia, 117393,
Moscow, ul. Profsoyuznaya 70
E-mail: yabl1@yandex.ru

The effect of plasma treatment on the surface properties of PTFE films modified by direct current glow discharge was investigated. The relationship between the formation of the electret states and the contact properties of PTFE films was examined.

The improvement of the contact and adhesion properties of polymers by low-temperature plasma treatment is usually associated with chemical transformations on their surface, such as the formation of chemically different (mainly, oxygen-containing) polar groups. However, no direct correlation between the values of the contact angle, data on the adhesion of plasma-modified polymers and the formation of electret states in the surface layers of the films has been revealed.

Samples of the PTFE film of 40 μm thickness (Russia, "Plastpolymer", St. Petersburg) were modified by DC discharge at the anode and cathode [1]. The surface properties were characterized by the values of the contact angle (θ) of deionized water. The electret potential (U) was measured by the compensation technique using a dynamic capacitor. From the measured U value, the effective surface charge density (σ) was calculated by the equation $\sigma = \epsilon_0 \epsilon U/L$. The adhesive properties were investigated according to the procedure described in [2]. The peel strength (A) was determined using the T-peel test for the Scotch®810/PTFE film contact.

The results obtained are indicated the existence of an inverse correlation between the contact angle and the peel strength: the less the value of θ , the greater the value of A . This relationship is characteristic of the both types of films modified at the anode or at the cathode. It was established that the initial film had a small negative surface potential and the effective charge density of this film is $\sigma = -15 \mu\text{C}/\text{m}^2$. The presence of this potential is apparently due to the sample prehistory. After modifying the film at the anode, the effective density of negative charge increases to $\sigma = -36 \mu\text{C}/\text{m}^2$, whereas the film treated at the cathode acquires a positive surface charge. It was also shown that as the storage time increases the contact angle increases, the peel strength decreases, and the effective surface charge density is reduced. Note that there is the undoubted correlation between the effective surface charge density and θ , as well as between σ and A .

REFERENCES

1. D. Richkov, M. Yablokov, A. Richkov. *Appl. Phys. A, Mater. Sci. Process.* **A 107** (2012) 589.
2. M. Yablokov, A. Kechek'yan, S. Bazhenov, A. Gilman, M. Piskarev, A. Kuznetsov. *High Energy Chem.* **43** (2009) 512.

Секция 5
ПЛАЗМОХИМИЯ

DBD PLASMA CATALYSIS PROCESS FOR CARBON RECOVERY

Amouroux J., Cavadias S.

ENSCP/UPMC

Since many years carbon dioxide reduction by hydrogen through catalyst processes is a usual way from the Paul Sabatier reaction to produce CH₄. this process is able to be done from thermal process by using an heterogeneous catalyst such as zirconia cerium support with nickel sites for the hydrogen reduction of CO₂. However this reaction is well working (85%-90%) at 350°C and its selectivity depends of the secondary reactions such us carbon monoxide or carbon deposit which appears above 350°C.

Our goal is to point out that the cerium oxide is a N semiconductor while Nickel sites are a P semiconductor and by that way we have a N-P semiconductor so the bimetallic catalyst is able to produce electrons for the CO₂ reduction when the DBD plasma polarize the ceramic in the small pores of the bulk of the pellet (plasma appears inside the pore) We have *demonstrated an electro catalyst process working at room* temperature with a high efficiency close to 85% -90% and a selectivity of 100% . The exothermal reaction of the reduction increases the temperature of the reactor until 120°C without any secondary reactions (CO,Carbon deposit)and points out the role of the N-P semiconductor as the key step for the electron flow to reduce the CO₂ into CH₄ .

КИНЕТИКА ДЕСТРУКЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ, СОРБИРОВАННЫХ ДИАТОМИТОМ, В ПЛАЗМЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

KINETICS OF DESTRUCTION OF PETROLEUM PRODUCTS SORBED BY DIATOMITE IN A PLASMA OF A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

Гусев Г.И.¹, Гущин А.А.¹, Демьяновская А.В.¹

¹ФГБОУ ВО «ИГХТУ», Россия, 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7;

E-mail: grisha.gusev.05@mail.ru

Работа посвящена изучению процессов деструкции нефтепродуктов (НП), сорбированных на диатомите, в диэлектрическом барьерном разряде. Степень разложения НП составила не менее 98-100 %. В качестве конечных продуктов был обнаружен CO₂, выход которого составляет не менее 60 %, что говорит о полноте протекающих процессов окисления органических соединений. В качестве продуктов деструкции НП были обнаружены альдегиды и карбоновые кислоты (КК), которые являются неустойчивыми и в дальнейшем полностью разлагаются до СО и СО₂.

The work is devoted to study of products of destruction oil products (OP) from the surface of diatomite sorbent in a dielectric barrier discharge. The degree of decomposition of the OP was not less than 98-100%. As the final products, CO₂ was found, the yield of which is not less than 60%, which indicates the completeness of the ongoing oxidation of organic compounds. As degradation products of OP, aldehydes and carboxylic acids (CA) have been detected, which are unstable and subsequently completely decompose to CO and CO₂.

Ранее проведенные исследования показали возможность использования диэлектрического барьерного разряда (ДБР) для модификации и регенерации сорбентов различной природы [1]. Однако исследований, посвященных количественной и качественной оценке продуктов деструкции НП, образующихся при регенерации сорбентов не проводилось. Целью данной работы являлось определение кинетики процессов деструкции НП, адсорбированных на диатомите, и образования продуктов их разложения после обработки в ДБР.

Процессы деструкции НП с поверхности сорбента в ДБР протекают со степенью разложения НП не менее 98 %. В качестве продуктов был обнаружен CO₂, выход которого составляет не менее 60 % от общего содержания углерода. Также в качестве продуктов деструкции были обнаружены альдегиды и КК, которые, согласно полученным кинетическим данным, являются промежуточными продуктами деструкции НП, и при дальнейшей обработке разлагаются до СО и СО₂. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии вторичного загрязнения окружающей среды при регенерации сорбента в ДБР, за счет образования менее токсичных продуктов, по сравнению с исходными НП.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Гущин, В.А. Любимов, Г.И. Гусев. *Наука и инновации в технических университетах: матер. Восьмого Всерос. форума.* (2014) С. 98-99.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПЛАЗМЕ БАРЬЕРНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

PHYSICO-TECHNICAL PROPERTIES OF POLYMER COATINGS, DEPOSITED AT ATMOSPHERIC PRESSURE IN THE BARRIER GAS DISCHARGE PLASMA

Данилаев М.П.¹, Богослов Е.А.¹, Польский Ю.Е.¹, Вахитов И.Р.²,
Гумаров А.И.², Янилкин И.В.², Тагиров Л.Р.^{2,3}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ, Российская Федерация, 420111 г. Казань, ул. К. Маркса 10, E-mail: danilaev@mail.ru

²Казанский федеральный университет, Российская Федерация, 420008 г. Казань,
ул. Кремлевская 18, E-mail: amir@gumarov.ru

³Институт перспективных исследований АН РТ, г. Казань, 420111 ул. Лево-Булачная, 36а,
ltagirov@mail.ru

В работе определены параметры разряда (плотность тока не более 25 мА/см², мощность не более 200 Вт), обеспечивающих формирование полистирольной пленки с воспроизводимыми свойствами (толщина, однородность и чистота покрытия).

The discharge parameters (current density not more than 25 mA/cm², output power not more than 200 watts), providing formation of polystyrene films with reproducible properties (thickness, uniformity and purity of the coating) are shown in the presentation.

Возможность получения в плазме газового разряда полимерных покрытий с требуемыми свойствами на поверхности различных субстратов; стимулировала рост исследований в этом направлении [1,2]. При этом важно обеспечить воспроизводимость физико-технических свойств полимерных покрытий, например, толщины, однородности, сплошности и чистоты покрытия. В данной работе определено влияние основных параметров формирования полимерных пленочных покрытий в плазме барьерного газового разряда атмосферного давления на толщину полимерных пленок. Формирование полистирольной пленки осуществлялось на предметном стекле в плазмохимическом реакторе, приведенном в работе [2]. В результате наших исследований показано, что скорость роста полимерного пленочного покрытия линейно зависит от плотности тока, которая изменялась в диапазоне (7–25 мА/см²), и определяется концентрацией мономера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский, И.Р. Вахитов, А.И. Гумаров, И.В. Янилкин, Л.Р. Тагиров. *Физика и химия обработки материалов* **1** (2017) в печати.
2. Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский, М.С. Пудовкин. *Физика и химия обработки материалов* **2** (2016) 23.

КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПЛАЗМОХИМИИ ЕМКОСТНЫХ ВЧ-РАЗРЯДОВ В СМЕСЯХ CF₄/AR И CHF₃/AR MULTIFOLD STUDY OF VOLUME PLASMA CHEMISTRY IN CF₄/AR AND CHF₃/AR CCP DISCHARGES

Зотович А.И.^{1,2,*}, Прошина О.В.¹, Лопаев Д.В.¹, Зырянов С.М.^{1,2}, Рахимова Т.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

² МГУ, физический факультет, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

* e-mail: zotovich@physics.msu.ru

Аннотация: Было проведено комплексное экспериментально-теоретическое исследование емкостной плазмы на частоте 81 МГц в смесях Ar/CF₄/CHF₃ при давлениях 50 мТорр и 150 мТорр. Широкий набор экспериментальных диагностик вместе с одномерной гибридной Монте-Карло моделью на основе метода частиц в ячейках (PIC MC) были применены для исследования плазмы. Такой подход позволил определить сложный химический состав активных частиц в плазме, а также определить потоки ВУФ фотонов.

Abstract: Multifold experimental and theoretical study of capacitively coupled plasma at 81 MHz in Ar/CF₄/CHF₃ has been carried out at 50 and 150 mTorr gas pressures. The wide set of experimental diagnostics together with the hybrid PIC MC model calculations were applied to the detailed study of the plasmas. This multifold approach enabled us to determine the complicated plasma chemical composition of active species and the fluxes of VUV photons.

Емкостные ВЧ-разряды во фторуглеродных смесях используются в микроэлектронике для травления SiO₂ и SiO₂-подобных диэлектриков. Последние используются в качестве межслойных диэлектриков с низким показателем преломления [1]. Процесс травления таких диэлектриков приводит к их деградации под действием плазменных радикалов и фотонов в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Чтобы минимизировать деградацию диэлектриков, должны изучаться как процессы взаимодействия плазмы с веществом, так и плазмохимия данных разрядов. Для описания сложной плазмохимии фторуглеродных разрядов в смесях Ar/CF₄/CHF₃ были применены различные экспериментальные диагностические методы для определения плотности плазмы и функции распределения электронов по энергиям, ионного состава, электроотрицательности плазмы, концентрации основных радикалов и потоки фотонов в ВУФ области, а также гибридная одномерная Монте-Карло модель на основе метода частиц в ячейках. Такой подход позволил описать сложную плазмохимию данных смесей и определить и/или верифицировать константы реакции и отношения ветвлений основных объемных реакций.

Работа выполнена при поддержке российского научного фонда (РНФ) грант № 16-12-10361.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mikhail R. Baklanov et al. *Journal of Applied Physics*. **113** (4) 2013

ХОЛОДНЫЙ ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

COLD PLASMATRON FOR TECHNOLOGY OF SILICON LAYERS DEPOSITION

Константинов В.О., Шарафутдинов Р.Г., Щукин В.Г.

*Институт теплофизики СО РАН, Россия, Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, д.1,
konstantinov@itp.nsc.ru*

Разработан и создан холодный плазматрон, позволяющий проводить осаждение слоев кремния в форвакуумном диапазоне давлений. Достигнуты значения КПД источника электронов свыше 80% при энергии пучка порядка 1 кэВ.

A cold plasmatron was developed and constructed, which makes possible to carry out silicon layers deposition in the forevacuum range of pressures. The efficiency of an electron source is over 80% at electron beam energy about 1 keV.

Для плазмохимических технологий осаждения слоев кремния форвакуумный диапазон рабочих давлений является оптимальным с точки зрения достижения максимальной эффективности процесса. Создание устройства, способного генерировать электронный пучок в этом диапазоне давлений является актуальной задачей. Нами был разработан струйный плазмохимический метод [1] и создан прототип холодного плазматрона (ХП), состоящий из электронной пушки с полым катодом и блока кольцевых сверхзвуковых сопел. С использованием ХП были получены слои кремния различной кристаллической структуры и измерены параметры электронно-пучковой плазмы, а также установлены корреляции между параметрами плазмы и характеристиками осажденных слоев [2]. В ходе работы выяснилось, что прототип холодного плазматрона подвержен эрозии полого катода, нестабильности при длительной работе и сложности в техническом обслуживании. Спроектирован и изготовлен новый образец ХП, нивелирующий недостатки прототипа. На рисунке приведены зависимости токов источника и коллектора, а также КПД плазматрона в зависимости от расхода плазмообразующего газа. Видно, что при энергиях пучка, необходимых для осаждения качественных слоев кремния достигается высокий КПД источника. В ходе эксплуатации установлено, что новый плазматрон лишился недостатков, характерных для прототипа ХП.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.G. Sharafutdinov et al. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **89** (2005) 99.
2. Konstantinov V.O. Sharafutdinov R.G., Shchukin V.G. *PPPT-6*, **Vol.2** (2009) 413.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ И ИЗОТОПНЫХ МОДИФИКАЦИЙ КРЕМНИЯ, ГЕРМАНИЯ, БОРА И МОЛИБДЕНА ИЗ ИХ ЛЕТУЧИХ ГАЛОГЕНИДОВ

PLASMA CHEMICAL PRODUCTION OF VARIOUS STRUCTURAL AND ISOTOPIC MODIFICATIONS OF SILICON, GERMANIUM, BORON AND MOLYBDENUM FROM THEIR VOLATILE HALOGENIDES

Корнев Р.А., Сенников П.Г.

*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950,
г. Нижний Новгород, ул. Тropicина, 49 kornev@ihps.nnov.ru*

Сформирован новый подход к созданию технологий получения изотопно-модифицированных веществ и материалов на их основе с помощью плазмохимических методов. В качестве исходных веществ рассматриваются галогениды кремния, германия, бора и молибдена. Исследования проводили в широком диапазоне технологических параметров с использованием различных типов ВЧ и СВЧ разрядов.

A new approach to the development of technologies for obtaining isotope-modified substances and materials based on them using plasma chemical methods has been developed. As starting materials, halides of silicon, germanium, boron and molybdenum are considered. The studies were carried out in a broad range of technological parameters using different types of RF and MW discharges.

Изотопные модификации кремния, германия, бора и молибдена, обладая рядом уникальных физических свойств, представляют большой интерес в различных областях науки и техники. Для получения этих элементов и материалов на их основе следует использовать их летучие фториды и хлориды, так как для этих соединений хорошо развиты технологии изотопного обогащения, основанные на центробежных методах и методах ректификации. Кроме того, для данных галогенидов хорошо развиты методы глубокой очистки, что позволяет использовать их в качестве исходных соединений, находящихся в высокочистом состоянии.

В докладе рассматривается новый подход к созданию технологий получения изотопно-модифицированных веществ и материалов на их основе с помощью плазмохимического восстановления указанных галогенидов водородом. Данный подход базируется на исследованиях, проводимых в следующих направлениях: 1) исследование процесса восстановления галогенидов кремния, германия, бора и молибдена в различных типах разряда с целью поиска возможности получения материала требуемого качества; 2) поиск оптимальных условий процесса восстановления в выбранном типе разряда; 3) исследование внутренних параметров химически-активной плазмы бесконтактными методами диагностики с целью определения основных механизмов протекания химических реакций; 4) исследование газодинамических и тепловых режимов плазмохимических реакторов с целью их масштабирования; 5) исследование физико-химических свойств образцов, полученных в процессе плазмохимического синтеза и определение влияния технологических параметров на эти свойства; 6) разработка технологического процесса получения материала требуемого качества.

DEPOSITION OF NANOSIZED POLYMER FILMS ONTO TRACK-ETCHED MEMBRANE SURFACE OBTAINED BY PLASMA POLYMERIZATION OF HEXAMETHYLDISILAZANE

Kravets L.I.¹, Dyussebekova A.A.², Satulu V.³, Mitu B.³, Dinescu G.³

¹*Joint Institute for Nuclear Research, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions,
Joliot-Curie Str. 6, 141980 Dubna, Russia*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Str. 30, 634050 Tomsk, Russia*

³*National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Atomistilor Str. 409,
077125 Magurele, Bucharest, Romania
E-mail: kravets@jinr.ru*

The structure, surface and electrochemical properties of polypropylene track-etched membrane with a polymer layer obtained by plasma polymerization of hexamethyldisilazane have been studied.

The synthesis and characterization of the polymer bilayer composite membranes prepared by deposition of thin films formed on one side of a porous substrate using a plasma polymerization method were studied. Polypropylene track-etched membrane (PP TM) with thickness of 10.0 μm and pore diameter of 300 nm (pore density of 10^8 cm^{-2}) were used as porous substrates. To produce the membrane, PP-foil Torayfan T2372 (Toray Co., Japan) was irradiated by xenon ions accelerated at the cyclotron and then subjected to physicochemical treatment using the method described in [1]. The deposition of the polymer films on the membrane surface was conducted by RF-discharge (100 W, 13.56 MHz) [2] generated at a working pressure of 0.7 Pa established by a mixture of argon, used as feed gas, with hexamethyldisilazane (HMDSN) vapors used as precursor. The deposition time was varied.

The membrane characterization was carried out by atomic force microscopy (AFM), the surface properties were characterized by measuring the water contact angles, and the chemical structure was investigated by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier-transformed infrared spectroscopy (FTIR) in attenuated total reflectance (ATR) mode. The measurements of the current-voltage characteristics of the membranes were carried out with a direct current regime in the voltage range of -1 to $+1$ V using a PC-controlled potentiostat 'Elins P-8S' (Russia) with a scan rate of 50 mV/s. A two-chambered cell with Ag/AgCl electrodes, containing a water solution of potassium chloride of identical concentration on both sides of the membrane was used for this purpose.

This work was supported by the grants (Nos 14-08-00896 and 17-08-00812) from Russian Foundation for Basic Research.

REFERENCES

1. L.I. Kravets, S.N. Dmitriev, P.Yu. Apel. *Collect. Czech. Commun.* **62** (1997) 752.
2. L. Kravets, S. Dmitriev, N. Lizunov, V. Satulu, B. Mitu, G. Dinescu. *Nucl. Instr. Meth. B* **268** (2010) 485.

USING THE PLASMA CHEMICAL METHODS FOR DEPOSITION OF FLUORINATED POLYMER COATINGS ONTO TRACK-ETCHED MEMBRANE SURFACE

Kravets L.I.¹, Gilman A.B.², Yablokov M.Yu.², Satulu V.³, Mitu B.³, Dinescu G.³

¹*Joint Institute for Nuclear Research, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions,
Joliot-Curie Str. 6, 141980 Dubna, Russia, E-mail: kravets@jinr.ru*

²*Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials RAS, Profsoyuznaya Str. 70, 117393 Moscow,
Russia*

³*National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Atomistilor Str. 409,
077125 Magurele, Bucharest, Romania*

The structure, surface and electrochemical properties of track-etched membranes from poly(ethylene terephthalate) with fluorinated polymer coatings obtained by plasma chemical methods have been studied.

The synthesis and properties of polymer composite membranes with hydrophilic porous substrate and hydrophobic top layer were studied. To prepare the composite membranes the fluorinated polymer films have been applied on one side of a poly(ethylene terephthalate) track-etched membrane used as a porous substrate. The plasma polymerization of 1,1,1,2-tetrafluoroethane [1], RF magnetron [2] and electron-beam sputter deposition of polytetrafluoroethylene [3] techniques were used for applying of polymer films onto membrane surface. The influence of the deposition time on the surface properties, chemical composition and wettability on both sides of the composite membranes is reported.

It was found that the application of such layers results in bilayer composite membranes with hydrophilic and hydrophobic sides. The surface roughness of the initial membrane changes in these processes. Besides, the deposition of a polymer film causes an essential narrowing the pores. The research of the electrochemical properties of the composite membranes has shown that the deposition of the hydrophobic polymer layer results in the creation of membranes featuring asymmetry of conductivity in solutions of electrolytes, which manifests itself at various orientations of membranes in an electric field. The principal cause of appearing the asymmetric conductivity is the changing the pore geometry due to the essential reduction of their diameter in the layer of the deposited polymer.

This work was supported by the grants (Nos 14-08-00896 and 17-08-00812) from Russian Foundation for Basic Research.

REFERENCES

1. L. Kravets, S. Dmitriev, N. Lizunov, V. Satulu, B. Mitu, G. Dinescu. *Nucl. Instr. Meth. B* **268** (2010) 485.
2. V. Satulu, B. Mitu, V. Altynov, N. Lizunov, L. Kravets, G. Dinescu *Thin Solid Films* 2017 (in press).
3. L.I. Kravets, A.B. Gilman, M.Yu. Yablokov, A.N. Shchegolikhin, B.Mitu, G. Dinescu *High Temp. Mater. Proc.* **19** (2015)121.

МЕЖФАЗНЫЙ СЛОЙ, ФОРМИРУЕМЫЙ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЖЕЛЕЗЕ

INTERFACE FORMED IN LOW-TEMPERATURE PLASMA OF HYDROCARBONS ON IRON

Ляхович А.М.¹, Шаков А.А.²

¹Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, alalam@mail.ru

²Физико-технический институт Уральского отделения РАН, Россия, 426000, г. Ижевск, ул. Кирова, 132

Использование двухслойной подложки из нерезонансного изотопа ^{56}Fe и сверхтонкого слоя ^{57}Fe позволяет использовать мёссбауэровскую спектроскопию для исследования межфазной области в системах «железо – плазмополимеризованное покрытие». Для обнажения межфазного слоя используется анодное растворение железной подложки.

The use of a two-layer substrate from the nonresonant ^{56}Fe isotope and the ^{57}Fe thin layer makes it possible to use Mossbauer spectroscopy to study the interphase region in "iron- plasma polymerized coating" systems. Anodic dissolution of the iron substrate is used to expose the interphase layer.

Одним из способов нанесения тонких функциональных органических покрытий на металлах является плазмохимический метод. Функциональные свойства тонких, а особенно наноразмерных, покрытий во многом обусловлены энергетическим состоянием межфазной границы системы «покрытие – подложка». Изучение свойств межфазной границы и процессов, проходящих при ее формировании, является весьма важным для понимания механизма формирования функциональных свойств таких покрытий. В работе предложена методика подготовки к исследованию межфазной области в системах «железо – плазмополимеризованное покрытие», основанная на обнажении межфазного слоя посредством анодного растворения железной подложки. Для обеспечения однозначного протекания электрохимического процесса применяется ячейка с отдельными катодным и анодным пространствами и раствор сульфата аммония в качестве электролита, что обеспечивает мягкие условия растворения металлической подложки, не «травмирующие» межфазный слой. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и атомно-силовой микроскопии изучены рельеф и химический состав межфазных слоев.

Использование двухслойной железной подложки, состоящей из пластины нерезонансного изотопа ^{56}Fe с осажденным на ее поверхности сверхтонким слоем ^{57}Fe , позволило применить метод мёссбауэровской спектроскопии для исследования химического состояния атомов железа в межфазной области систем «железо – наноразмерная полимерная пленка».

Установлено, что в состав межфазного слоя кроме оксидов железа входят, соединения железа с функциональными группами пленки и карбиды железа.

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ПЛАЗМЕ ВОЗДУХА, РЕАГИРУЮЩЕЙ С ПОЛИКАРБОНАТОМ

FEEDBACKS IN AIR PLASMA REACTING WITH POLYCARBONATE

Овцын А. А., Кадников Д. В., Смирнов С. А.

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, 153000, г.
Иваново, пр. Шереметевский, 7, moose2004@inbox.ru*

Приведены экспериментальные результаты исследований эффекта загрузки при воздействии тлеющего разряда в воздухе на плёнку поликарбоната (ПК). С ростом количества обрабатываемого полимера в плазме уменьшается удельная скорость травления. Скорости выделения газообразных продуктов травления CO_2 , CO , H_2O , H_2 также изменяются с увеличением степени загрузки. Температура газа существенно снижается, а приведенная напряженность электрического поля в плазме воздуха увеличивается.

The experimental results of the studies of load effect under glow discharge treatment in the air on a polycarbonate film (PC) are presented. With increasing amount of polymer treated by plasma etching reduced etching rate is decreasing. The rate of release of gaseous products of etching CO_2 , CO , H_2O , H_2 are also changing with increasing the amount of polymer in the reactor. Gas temperature varies only slightly, and the reduced electric field intensity decreases in air plasma.

При плазмохимическом травлении полимерных материалов наблюдается эффект загрузки – уменьшение удельной скорости травления материала с увеличением его количества. Эффект загрузки связан с образованием газообразных продуктов гетерогенных реакций и изменением граничных условий для активных частиц. В результате меняются физические параметры плазмы, скорости генерации активных частиц и, как следствие, скорость целевого процесса.

Обработку образцов поликарбоната (ПК) марки Lexan 8010 производили на термостатируемой стенке цилиндрического стеклянного реактора диаметром 3 см в зоне положительного столба. Диапазон изменения тока разряда (i): 20 – 110 мА, давления плазмообразующего газа (P): 50 – 300 Па.

Скорости травления поликарбоната при увеличении его обрабатываемой площади в реакторе от 28,5 до 84,6 см² снижаются с $1,24 \cdot 10^{-7}$ до $1,01 \cdot 10^{-7}$ г/см²·с⁻¹. По данным масс-спектральных измерений с увеличением количества полимера в реакторе растут скорости выделения CO_2 и H_2O , а также скорость расходования O_2 , при этом скорость выделения CO значительно снижается. Скорость выделения молекулярного водорода практически не изменяется. Суммарная мольная доля газообразных продуктов травления ПК достигает 0,108 и приводит к изменению электрофизических параметров плазмы: при увеличении площади обрабатываемого полимера от 28,5 до 84,6 см² приведенная напряженность электрического поля увеличивается с $8,69 \cdot 10^{-16}$ до $1,25 \cdot 10^{-16}$ В·см², а температура газа уменьшается с 600 до 500 К (при $i = 80$ мА, $P = 100$ Па).

Газообразные продукты травления полимера оказывают влияние на электрофизические параметры разряда, кинетические закономерности плазмохимического травления и это необходимо учитывать при дальнейших исследованиях и разработке новых технологических процессов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–32–00404).

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ ИЗОТОПНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛЕТУЧИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФТОРИДОВ PLASMA-CHEMICAL CONVERSION OF ISOTOPE-MODIFIED VOLATILE INORGANIC FLUORIDES

Сенников П.Г., Корнев Р.А.

Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Девярых РАН, Россия. 603950 г.

Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49 pgsen@rambler.ru

Рассмотрены основные стадии ВЧ и СВЧ плазмохимической водородной конверсии изотопно-обогащенных летучих неорганических фторидов кремния, германия, серы, молибдена и бора в элементарные формы, а для кремния, молибдена и бора также и в карбиды.

Main steps of RF and UHF plasma-chemical hydrogen conversion of isotope-modified volatile inorganic fluorides of Si, Ge, S, Mo, and B to elementary form, and for Si, Mo, and B also to carbides, have been discussed.

Летучие неорганические фториды – соединения с ковалентной связью, находящиеся при обычных условиях в газообразном состоянии, а также в жидком или твердом, но имеющие при этом достаточно высокое (десятки мм.рт.ст. и выше) давление насыщенного пара. Повышенный интерес к этим соединениям возник в связи с их применением для разделения изотопов фторид-образующих элементов (стабильных за исключением урана) с помощью наиболее эффективных и относительно недорогих физико-химических методов, прежде всего центробежного. Этим они обязаны моноизотопностью фтора. Наряду с совершенствованием технологии собственно процесса разделения требуется разработка эффективных одностадийных методов конверсии фторидов в элементарные формы или в другие соединения. Применение плазмы, поддерживаемой различными типами разрядов, позволяет в принципе реализовать прямое превращение фторида в элементарную форму или, добавляя в плазму другое вещество, – получать соединения заданного состава в виде пленок или объемных образцов. В докладе рассмотрены некоторые результаты исследования конверсии изотопно-обогащенных SiF_4 , GeF_4 , SF_6 , MoF_6 , BF_3 , выполненные в ИПФ РАН и ИХВВ РАН в Нижнем Новгороде совместно с ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск в последние годы. Эта работа состояла из следующих этапов:

- выбор типа ВЧ и СВЧ разряда для получения элементарной формы изотопа в виде тонкой пленки, нанопорошка или массивного образца и диагностика плазмы на основе смеси фторидов и водорода;
- обсуждение механизма плазмохимического превращения в каждом отдельном случае;
- разработка метода компактирования элементарной формы изотопа после осаждения и его извлечения из реактора с последующим выращиванием кристаллов (в случае германия и кремния);
- разработка метода плазмохимической конверсии фторидов кремния, молибдена и бора в соответствующие карбиды заданной формы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-13-01027.

ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ГЕТЕРОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ГЕНЕРАЦИЮ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ АРГОНА

INFLUENCE OF PLASMA-CHEMICAL DESTRUCTION PRODUCTS OF HETEROCHAIN POLYMERS ON GENERATION OF ACTIVE SPECIES IN ARGON PLASMA

Титов В.А.¹, Смирнов С.А.², Шикова Т.Г.², Овцын А.А.²

¹*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 153045, Россия, Иваново, ул.
Академическая, 1,*

²*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, 153000, г.
Иваново, Шереметевский проспект, 7 e-mail: sas@isuct.ru*

Представлены экспериментальные данные о газообразных продуктах взаимодействия плазмы пониженного давления в аргоне с полиарамидом и полиэтилентерефталатом. Получены спектры излучения плазмы и ее электрофизические параметры при различной площади обрабатываемого материала в реакторе. На основе экспериментальных данных выполнено численное моделирование процессов генерации активных частиц плазмы с учетом продуктов гетерогенных реакций, рассчитаны потоки активных частиц на поверхность обрабатываемых материалов.

Experimental data are presented on the gaseous products of the low-pressure argon plasma interaction with polyaramide and polyethylene terephthalate. The emission spectra and plasma electrophysical parameters are given for different areas of the material being treated in the reactor. On the basis of experimental data, numerical simulation of the processes leading to the formation of active plasma species has been carried out, taking into account the products of heterogeneous reactions. The fluxes of active species to the surface of the materials have been calculated.

Воздействие плазмы на полимеры сопровождается выделением газообразных продуктов, появление которых изменяет набор протекающих в плазме процессов и ее параметры. В данной работе представлены результаты численного кинетического моделирования процессов в плазме аргона при обработке полиарамидных материалов и полиэтилентерефталата. Моделирование строилось на совместном решении уравнения Больцмана для электронов с уравнениями колебательной и химической кинетики в стационарном приближении. Использовали экспериментальные данные о составе стабильных компонентов, включая продукты реакций активных частиц с полимерами (O_2 , N_2 , H_2O , H_2 и CO), а также о напряженности электрического поля и температуре газа при различной площади обрабатываемого материала. Проанализировано влияние газообразных продуктов деструкции на ФРЭЭ и скорости процессов, инициированных электронным ударом, на заселенности возбужденных состояний аргона, спектры излучения плазмы, включая потоки УФ-квантов, приводящих к фотодеструкции полимеров. Показано, что значительный вклад в гетерогенные реакции могут вносить активные частицы, образующиеся из продуктов деструкции полимеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ивановской области в рамках научного проекта № 15-42-03124-р-центр-а.

ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ И ВЕЩЕСТВА В ГАЗОРАЗРЯДНУЮ ПЛАЗМУ ИЗ ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОЛИТНОГО КАТОДА, СОДЕРЖАЩЕГО СОЛИ ЩЕЛОЧНОГО МЕТАЛЛА

TRANSFER OF CHARGES AND SUBSTANCES IN GAS-DISCHARGE PLASMA FROM THE LIQUID ELECTROLYTE CATHODE CONTAINING SALTS OF ALKALI METAL

Тазмеев Х.К.¹, Тимеркаев Б.А.², Тазмеев Г.Х.²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт, Россия, 423810, Набережные Челны, просп. Мира, 68/19, tazmeev@mail.ru

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

Экспериментально исследован газовый разряд в воздухе между проточным жидким катодом и твердотельным анодом. В качестве жидкого электролитного катода использован водный раствор хлорида натрия. Его массовый унос за счет испарения и распыления был компенсирован добавлением дистиллированной воды в непрерывном режиме. Обнаружено, что удельная электрическая проводимость водного раствора практически не меняется. Установлены закономерности изменения анионного состава раствора.

Gas discharge in the air between the flowing liquid cathode and a solid anode was experimentally studied. Aqueous solution of sodium chloride was used as the liquid cathode electrolyte. Mass loss due to evaporating and sputtering was compensated by adding distilled water in a continuous mode. It was found that the specific electric conductivity of the aqueous solution is almost unchanged. The regularities of changes in the composition of an anionic solution were discovered.

Исследования проводились на экспериментальной установке [1]. Опыты показали, что жидкофазное вещество переносится в разрядную зону в виде капель и пара. При этом меняется ионный состав и водного раствора, и капель. В качестве примера на рисунке представлены результаты, полученные при использовании водного раствора хлорида натрия с молярной концентрацией 0.1 моль/л.

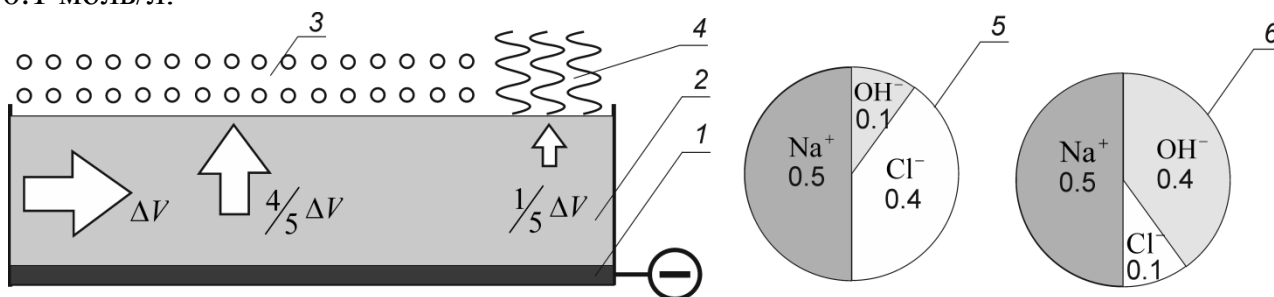


Рис. 1. Упрощенная картина явлений переноса. 1 – графитовая пластина; 2 – водный раствор хлорида натрия; 3 – капельная фаза уносимого из катода раствора; 4 – водяной пар. Круговые диаграммы – молярные содержания ионов в водном растворе (5) и в каплях (6) (цифрами указаны доли катионов и анионов в общем количестве ионов). $I = 11.0$ А. Объем водного раствора $V = 15.0$ л. $\Delta V/V = 2/3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tazmeev Kh. K., Arslanov I. M., Tazmeev G. Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. P. 012001.

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ,
КОНТАКТИРУЮЩИХ С ЖИДКОСТЯМИ
SURFACE MODIFICATION OF POLYMER MATERIALS USING GAS
DISCHARGES CONTACTING WITH LIQUIDS**

Титов В.А.¹, Кузьмичева Л.А.¹, Хлюстова А.В.¹, Никитин Д.И.^{1,2}

¹*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН,
153045, Россия, Иваново, ул. Академическая, 1,*

²*Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, V Holesovickach 2,
18000 Prague, Czech Republic
titov25@gmail.com*

Представлен краткий обзор работ по модифицированию поверхности полимеров с использованием разрядов, возбуждаемых над жидкостью или в ее объеме. Рассмотрены способы реализации таких процессов, дана информация об активных частицах, способных реагировать с полимерами. Приведены примеры модифицирования различных материалов.

A brief review is presented on the studies of surface modification of polymers using discharges excited above the liquid or in the liquid. The discharge excitation methods and information on active species capable of reacting with polymers are discussed. Examples of the modification of various materials are given.

Модифицирование полимерных материалов – одно из направлений возможного применения плазмы, контактирующей с жидкостями. В плазменно-растворных системах активные частицы образуются как в газовой, так и в жидкой фазе. Использование различных способов организации процесса позволяет регулировать преимущественное участие тех или иных активных частиц в реакциях с полимерами. При активации под действием плазмы в жидкости можно обрабатывать полимерные пленки, волокна, нити, нетканые волокнистые материалы, суспензии частиц полимеров или водорастворимые высокомолекулярные соединения, что позволяет сочетать плазмохимические процессы с традиционными химико-технологическими операциями. В качестве источника плазмы используют диафрагменный или контактный разряды в объеме жидкости, а также разряд постоянного тока, катодом (или анодом) которого выступает обрабатываемый раствор. Показано, что действие плазмы на водные растворы, в которые помещен полимерный материал, ведет к структурно-химическим изменениям в поверхностном слое материала, улучшению его гидрофильности и адгезионных свойств. При этом возможно закрепление на поверхности различных соединений, в том числе, обладающих биологической активностью. Плазмохимическая обработка растворов хитозана ведет к уменьшению его средней молекулярной массы, а при обработке суспензий микрокристаллической целлюлозы наблюдается изменение распределений частиц по размерам. Плазмохимическая обработка растительного целлюлозосодержащего сырья позволяет значительно сократить время и энергозатраты на делигнификацию целлюлозы.

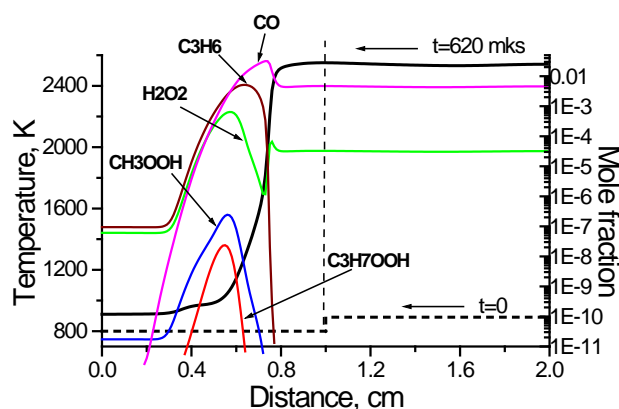
IGNITION OF PROPANE-AIR MIXTURE WITH SPATIALLY-NONUNIFORM REACTIVITY, GENERATED BY STREAMER DISCHARGES

Filimonova E. A., Bocharov A.N., Bityurin V.A.

Joint Institute for High Temperatures of RAS, Russia, Moscow, Izhorskaya str. 13, bld.2,
helfil@mail.ru

This work presents the numerical results regarding to ignition of the premixed lean C_3H_8 -air mixture. The temperature and radical stratifications are created by a filamentary electrical discharge. The formation of combustion wave at the different specific deposited energy and the important role of low temperature oxidation chemistry (below 1000 K) in the preheating zone ahead the flame front for the acceleration of low flame velocity in lean mixture are shown.

In connection of modern requirements to the content of automotive exhaust gas, the use of a homogenous charge compression ignition (HCCI) engine with a stratificated reactivity of lean premixed mixture in the engine cylinder is considered. The stratification of lean mixture can provide a control of ignition and maximum temperature. A modified reactivity due to the fast discharge impact can be achieved by non-uniform discharges with the filamentary structure like in experiment [1]. The goal of given work was to show the discharge effect on the ignition of lean propane-air premixed mixture stratified on the temperature and concentrations of primary radicals generated by discharge at $P_0=30$ bar and $T_0=800$ K.



The system has stratification in the form of the alternation of discharge filaments ($x>1$ cm in figure) and free space ($x\leq 1$ cm). The initial heating and concentrations of radicals produced by the discharge were determined in an approximation of a constant reduced electric field at the different input specific energies Q . The spatial distribution of components at the ignition moment of at $t = 620 \mu s$

is presented in figure at $Q=0.05$ eV/molecule. The broadening of zone in front of flame front due to low temperature oxidation reactions (zones of cool and blue flame stages) is clearly seen: the behavior of temperature has the stepped growth before the flame front. Due to this oxidation the mixture is heated additionally and the flame front propagates through the zone with $T\sim 950$ K with a higher velocity than that in the undisturbed mixture at the normal conditions. This effect is known as a chemical acceleration flame.

This work was supported by LIA KaPPA-RFBR Grant 17-53-16003a (France-Russia).

REFERENCES

1. M.A. Boumehdi, S.A. Stepanyan et al. *Combust Flame* **162** (2015) 1336.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ATMOSPHERIC PRESSURE ELECTRICAL DISCHARGES AS WATER SOLUTIONS' CHEMICAL ACTIVATION TOOL

Шутов Д.А., Рыбкин В.В.

Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000,

Шереметевский пр., д.7., г. Иваново, Россия, e-mail: shutov@isuct.ru

В последние 20 лет опубликовано значительное число работ, посвященных исследованиям свойств различных разрядов атмосферного давления, горящих либо над поверхностью воды, либо в ней. Этот интерес обуславливается, как попытками разобраться в физикохимии разрядов, так и новыми возможностями, которые появляются для использования этих разрядов для решения целого ряда практических задач. Среди таких задач можно отметить биомедицинские приложения, источники возбуждения для атомно-эмиссионной спектроскопии, модификация поверхности полимерных материалов с целью изменения их поверхностных свойств или иммобилизации на ней других молекул, получение нано порошков катализаторов и полупроводниковых соединений, синтез фуллеренов, очистка сточных вод и газовых выбросов от органических соединений и др. Привлекательность плазменных систем заключается в том, что при их действии на воду в ней появляется широкий набор химически активных частиц, которые обладают как окислительными, так и восстановительными свойствами. Эти частицы образуются без использования каких-либо химических реагентов, а плазмообразующим газом может являться окружающий воздух. В докладе анализируются результаты экспериментальных исследований и моделирования физико-химических характеристик плазмы разрядов атмосферного давления различных типов, которые применяются для воздействия на водные растворы для инициирования в них различных химических процессов. Рассматриваются типичные конструкции реакторов. Приводятся данные о характеристиках источников питания, параметрах электронов, газовых температурах и концентрациях активных частиц в различных типах разрядов и плазмообразующих газов и их зависимости от внешних параметров разрядов. Описывается химический состав активных частиц, образующихся в воде. Обсуждаются возможные механизмы процессов образования и гибели частиц.

At last years a lot of properties investigations of atmospheric pressure electrical discharges in contact and in liquids were published. The interest of researches deals with both theoretical and applied aspects of plasma-liquid systems. The practical study includes bio- and medical application, atomic emission spectrometry, modification of the polymers surfaces, synthesis of metal catalysts Nan particles and semiconductor materials, water and gas purification, etc. The attractiveness of plasmas in and in contact with solutions is caused by the fact that under discharge action a large number of both oxidative and reducing active species are generated in liquid. The oxidative agents are primarily presented by OH radicals ($E^0=2.85$ V), O atoms ($E^0=2.42$ V), hydrogen peroxide molecules ($E^0=1.68$ V), ozone molecules ($E^0=1.51$ V) and HO₂ radicals ($E^0=1.70$ V). The reducing species are hydrogen molecules and atoms ($E^0=-2.3$ V), and solvated electrons ($E^0=-2.68$ V). In principle the active species formation doesn't require any chemicals additions and discharge in ambient air may be easily used. In this report the results of experimental research and plasma parameters modeling of several atmospheric pressure gas discharge plasma action for the chemical processes' initiation in liquid are analyzed. The typical plasma-liquid system constructions are observed. The data on power supplies, electron parameters, gas temperatures and active species concentrations both in plasma and in liquid phase depending on the discharge types, plasma-forming gases and discharge parameters are reviewed. Some possible mechanisms on the active species formation and loss are discussed.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 3.1371.2017/ПЧ

COLD ARGON PLASMA TORCH FOR WATER TREATMENT

Plamena Marinova¹, Evgenia Benova², Yana Topalova³, Yovana Todorova³, Maya Zhekova¹,
Ivaylo Yotinov³, Frantisek Krcma⁴

¹*Faculty of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., Sofia, 1164, Bulgaria*

²*DLTIS, Sofia University, 27 Kosta Loulchev Str., 1111 Sofia, Bulgaria*

³*Faculty of Biology, Sofia University, 8 Dragan Tsankov Blvd., Sofia, 1164, Bulgaria*

⁵*Faculty of Chemistry, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic*

The effects of water treatment by surface-wave-sustained plasma torch at 2.45 GHz are studied. Two aspects of the plasma–liquid interaction have been investigated: water physical and chemical characteristics as H₂O₂ concentration, conductivity and pH, are modified as a result of the plasma treatment and on the other hand the plasma properties are changed during the interaction with water.

The plasma torch is considered as plasma–air configuration. Working gas is Argon at atmospheric pressure. Gas flow rate varies from 0.1 l/min up to 3 l/min. Discharge conditions are: plasma radius from 0.5 mm to 1.5 mm; wave frequencies 2.45 GHz. Treatment time during all the investigations is significantly short – less than a minute and the input wave power is in the range from 12 W to 40 W.

The advantage of this type of discharge is the low operating gas temperature, since the H₂O₂ decomposition is strongly dependent on the temperature. The low gas temperature also allows plasma to be in close contact to the treated water without evaporation. Estimation of the changes in the characteristic concentration of hydrogen peroxide of plasma treated liquids is done.

Simultaneously, the plasma characteristics as plasma length and electron temperature are measured in the presence of water placed below the discharge and compared with the same characteristics when there is no water.

Creation and determining the H₂O₂ concentration is needed since the H₂O₂ is one of the most powerful oxidizers, able to destroy organic contaminates which are ordinarily difficult to destroy, as well as inactivating cells of living organisms. This is the reason why it plays a main role in various biological, biomedical, environmental and wastewater treatments.

Acknowledgments:

This work was supported by the Bulgarian Fund for Scientific Research at the Ministry of Education under Grant DH08/8 – 2016.

PROCESSING OF HYDROCARBONS DRIVEN BY ELECTRON BEAM AND NON-THERMAL PLASMAS

M.N. Vasiliev, R. Cartaya, V. Miasnikov, T. Vasilieva,

Moscow Institute of Physics and Technology, Russian Federation, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700

E-mail: rene.alejandro.cartaya@gmail.com

Abstract: Energetic processing of liquid and gas phase hydrocarbons as Crude Oil, Methane (CH₄) and Acetylene (C₂H₂) driven by Electron-Beam plasma, as well as other nonthermal plasma generation techniques as Radio Frequency (RF) discharges, Direct Current (DC) discharges, and Hybrid Plasma (HP) discharges has been studied in plasmachemical reactor in conditions of low temperatures and low pressures. Experimental results show the cracking of long molecules and polymerization of shorter ones using different plasma modes. Analysis of Plasma has been performed using mass spectroscopy, fiber optic spectrometry, Charge-coupled Device (CCD) Camera imaging as well as electric diagnostics techniques as Langmuir probes.

To improve understanding of reaction mechanism and pathway of plasma process Monte Carlo based modeling of plasma has been performed. Effects of plasma processing over liquid phase hydrocarbons was studied using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy analysis as well as contact angle and viscosity measurement. The results obtained show Electron-Beam and hybrid plasma discharges produces cracking, reducing the size of chain of hydrocarbon molecules and RF Plasma discharges induces polymerization, generating longer molecular chains. The achieved results prove the cracking and polymerization process to be considered as promising applications of nonthermal plasma processing of hydrocarbons for environmental, energy, nanomaterial and industrial applications as well as for reproduce in laboratory astrochemical reactions involving Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) present in Low Earth Orbit (LEO).

REFERENCES:

- [1] Mirikin G. Zaykina RF, Zaykin Yu. A Radiation methods for upgrading and refining of feedstock for oil chemistry. Radiation Physics and Chemistry. *Science Research Institute of Experimental and Theoretical Physics*. 2003.
- [2] R. Cartaya, V. Miasnikov. Study of the interaction of non-thermal plasmas and organic liquids. *MIPT Conference 59*. 2016
- [3] Zaykina R.F., Zayking Yu., Miriking G., Nardirov N.K. Prospect for irradiation processing in the petroleum industry. *Radiation Physics and Chemistry*. 2002.
- [4] Zaykin Yu. A., Zaykina RF, Mirki G. On energetics of hydrocarbon chemical reactions by ionizing irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2003.

ELECTROPHYSICAL INSTALLATION BASED ON BARRIER DISCHARGE FOR HYDROCARBON SYNTHESIS

¹Khomich V. Yu., ^{1,2}Malanichev V. E., ¹Malashin M. V., ²Shmelev V. M.

¹*Institute for Electrophysics and Electric Power RAS,
Russia, 191186, 18, Dvortsovaya emb., Saint Petersburg*

²*Semenov Institute of Chemical Physics RAS
Russia, 119991, 4, Kosygin st., Moscow
mve.191@gmail.com*

In an electrophysical installation, a mixture of CH₄ and C₂H₆ was treated by a barrier discharge. The hydrocarbon conversion was experimentally recorded. For the developed plasma chemical reactor, with help of the solver "ZDPlasKin", a theoretical evaluation of the plasma kinetics processes occurring in the discharge was carried out. The experimental results are in good agreement with the theoretical estimate.

To the plasma chemical reactor (PCR) with a coaxial configuration of electrodes with the help of a special generator rectangular voltage pulses were applied with an amplitude of 12 kV, a duration of 60 μs with a frequency of 4 kHz [1]. In a mixture of CH₄ (98.2% vol.) and C₂H₆ (1.8% vol.), a barrier discharge was initiated to activate and stimulate chemical reactions. During the experiments, the volume of CH₄, C₂H₄, C₂H₆ and H₂ at the outlet from the PCR was measured (see table). For a theoretical evaluation of the plasma kinetics and chemical composition of the output stream, a 0-dimensional plasma kinetics model based on "ZDPlasKin" [2] was used (see table).

It can be seen from the table that within the limits of the order of magnitude the experimental and modeling results agree well. Thus, it can be concluded that the 0-dimensional plasma kinetics model acceptability for estimating the most probable ways of the reactions of stimulated barrier discharges in a PCR.

Table – Comparison of the results of measuring the chemical composition of chromatography and the results of modeling

	Initial mixture	Experiment	Modeling
N _{CH₄} , cm ⁻³	265.1 x 10 ¹⁷	262.4 x 10 ¹⁷	264.1 x 10 ¹⁷
N _{C₂H₄} , cm ⁻³	0.0	1.1 x 10 ¹⁷	3.6 x 10 ¹⁷
N _{C₂H₆} , cm ⁻³	4.9 x 10 ¹⁷	5.4 x 10 ¹⁷	4.6 x 10 ¹⁷
N _{H₂} , cm ⁻³	0.0	1.1 x 10 ¹⁷	6.1 x 10 ¹⁷

REFERENCES

1. V. Khomich, V. Malanichev, M. Malashin, S. Moshkunov, E. Shershunova, *Book of Contributions HAKONE 14*.
2. S. Pancheshnyi, B. Eismann, G. J. M. Hagelaar, L. C. Pitchford, Computer code ZDPlasKin, <http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr> (University of Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP, Toulouse, France, 2008).

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ РАСТВОРОВ ХЛОРИДОВ НАТРИЯ И КАЛЬЦИЯ MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF ION SPUTTERING OF THE SOLUTIONS OF SODIUM AND CALCIUM CHLORIDES

Сироткин Н.А., Титов В.А.

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 153045, Россия, Иваново, ул. Академическая, 1, e-mail: alexsad8@yandex.ru

Методом молекулярной динамики исследован процесс ионного распыления водных растворов хлоридов натрия и кальция. Показано, что ионы растворенного вещества могут выходить в газовую фазу как в виде гидратированных ионов, так и в виде ионных пар в составе водных кластеров.

The ionic sputtering of sodium chloride and calcium chloride solutions was studied by classical molecular dynamics method. It is shown that the ions of the solute transferred into the gas phase both in the form of hydrated ions and in the form of ion pairs in water clusters.

В газовом разряде атмосферного давления с жидким катодом поверхность электролитного катода бомбардируется положительными ионами, что приводит к различным химическим и физическим процессам, как в жидкой, так и в газовой фазах. В тоже время бомбардировка поверхности приводит к переносу в газовую фазу компонентов раствора: растворителя и растворенного вещества.

Цель настоящей работы заключается в исследовании ионного распыления водных растворов хлоридов натрия и кальция 1-20 падающими ионами с начальной энергией 50-500 эВ методом классической молекулярной динамики, реализованным в программном пакете Gromacs по алгоритмам, описанным в работе [1]. Следует отметить, что в настоящей работе при моделировании учтено наличие электрического поля у поверхности катода. Моделирование показало, что в зависимости от числа и энергии бомбардирующих ионов меняется характер ионного распыления жидкого катода. При вкладываемой энергии 0,14-0,25 эВ/частица (13,5-24 кДж/моль) в газовую фазу переходят преимущественно молекулы воды. При достижении пороговой энергии (0,3 эВ/частица, 30 кДж/моль) в газовой фазе появляются не только молекулы воды, но и компоненты растворенного вещества, перенос которых происходит как в виде гидратированных катионов и анионов, так и в составе водных кластеров в виде ионных пар. Наличие электрического поля препятствует уносу гидратированных катионов в газовую фазу тем самым значения коэффициентов переноса для хлорид-ионов оказываются выше, чем для катионов натрия или кальция. Таким образом, результаты моделирования подтверждают установленное ранее экспериментально нарушение стехиометрии при переносе нелетучих компонентов жидкого катода [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-33-60061 мол_а_дк)

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Yu. Nikiforov. *High Energy Chem.* **42** (2008) 235.
2. A.V. Khlyustova, N.A. Sirotkin, A.I. Maximov. *High Energy Chem.* **44** (2010) 75.

SYNTHESIS AND DEPOSITION OF AG NANOPARTICLES ONTO POLYPROPYLENE FILM BY ATMOSPHERIC PRESSURE GLOW DISCHARGE TREATMENT

Khlyustova A. V., Sirotkin N. A., Kraev A. S., Kochkina N. E., Titov V. A.,
Agafonov A. V.

*A. G. Krestov Institute of Solution Chemistry of RAS, Russia, Akademicheskaja str., 1, 153045,
Ivanovo*

This report presents a one-step method of silver nanoparticles synthesis and deposition of it onto polypropylene surface by use of an atmospheric pressure glow discharge. Obtained data of UV-vis spectroscopy and Zetasizer indicate that Ag nanoparticles are polydispersed. The polypropylene film surface is modified during gas discharge treatment.

It is known that silver and silver salts have the antibacterial effects. And silver in nanoscale is more attractive due to high surface area and high fraction of surface atoms. At present there are various methods for synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) including plasma liquid method. Methods of nanoparticles (NPs) deposition onto different surfaces are main part of the technology development. All methods require more then one step process. It was established that the non-thermal plasmas in liquids are an effective method of polymer surface modification. The silver deposition onto polymer surface would be preventing bacterial attachment. And the DC glow discharge is the most frequently method for synthesis of NPs. The new one-step process method of synthesis of silver nanoparticles and its deposition onto polymer surfaces is described. The silver nitrate was used as sources of NPs and polypropylene films are used as solid templates.

The negative glow discharge is ignited between metallic cathode and liquid anode. The graphite rods (diameter 5 mm) were used as metal electrodes. The discharge current was 5 mA, applied voltage was 1.2 kV, and time of treatment was 4 min.

The boardering peak of surface Plasmon resonance and data of Zetasizer have shown that AgNPs formed in liquid are polydisperse and have an average size of 50-65 nm. Gas discharge treatment leads to appearance of new functional groups onto polymer surface. After treatment in solution with NPs precursor, the surface energy increases due to growth of dispersive component of surface energy. The deposition of AgNPs onto polymer surface has confirmed by SPM analysis (Fig. 1)

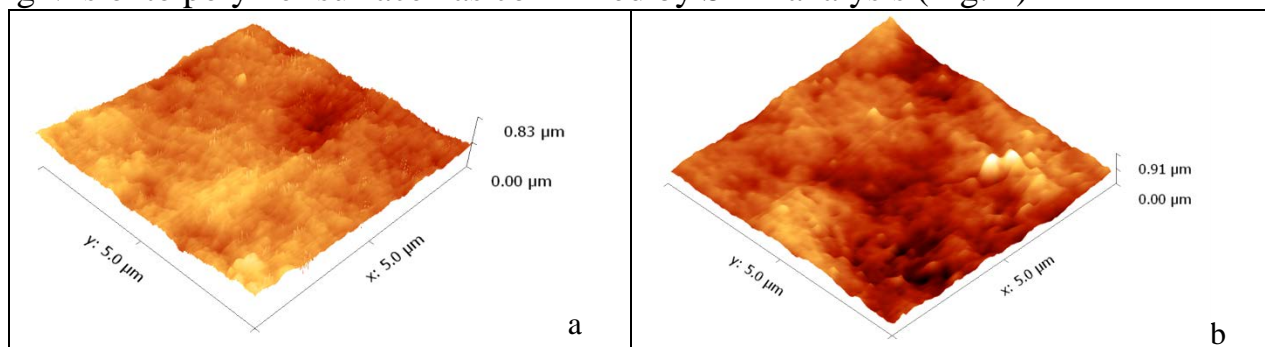


Fig. 1 SPM topographic image of polypropylene films before (a) and after treatment (b)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАЗМЕННОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

RESULTS OF PLASMA AND CHEMICAL PROCESSING OF MOLDS FOR PRODUCING DETAILS FROM TITANIUM ALLOYS

Даутов Г.Ю.¹, Даутов И.Г.¹, Садиков К.Г.², Софроницкий А.О.^{1,2}

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

²Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань, 420008, ул. Кремлевская, 18.

E-mail: artempic8@mail.ru

Аннотация: Проведены исследования поверхности и приповерхностных слоев образца с переменным сечением из титанового сплава. Модификация поверхности литейной формы была проведена плазменной обработкой и нанесением графитового слоя методом химического осаждения.

Abstract: In this article the results of researching the surface and near-surface layer of the titanium alloy sample with variable cross-section were presented. The mold surface was modified by using plasma treatment and coating it with the graphite layer by chemical vapor deposition.

Слой повышенной твердости на титановых отливках образуется при поглощении остаточных газов с поверхности литейных форм и диффузии примесей при остывании. Температура литейного процесса способствует образованию соединений TiOx. По мере удаления от поверхностного слоя вглубь отливки происходит постепенное снижение массовой доли кислорода. Одним из путей снижения поглощения кислорода может являться создание покрытия на поверхности литейных форм [1-2].

В работе представлены результаты исследований отлитой из титанового сплава заготовки сложной геометрической формы. Литейная форма предварительно обрабатывалась потоком плазмы, содержащей углеводородные газы, после наносился слой графита. Полученное изделие разрезано по сечениям с различными характерными размерами. Выбранные области детали отличаются температурными режимами в процессе затвердевания.

Химический состав исследовали на сканирующем электронном микроскопе «AURIGA CARL ZEISS». Выбирались точки и области сканирования в областях, отстоящих от поверхности на 2×10^{-3} м. Не обнаружено отдельных пиков, соответствующих кислороду.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ал.Ф. Гайсин *Физика и химия обработки материалов*. 2016. № 3. С. 22-26.
2. Ал.Ф. Гайсин, И.Ш. Абдуллин, Р.Ш. Басыров, Р.М. Хазиев, Г.Т. Самитова, Э.Ф. Шакирова *Физика плазмы*. 2014. Т. 40. № 12. С.1095.

Секция 6

ПЛАЗМА В МЕДИКО- БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF PLASMA JET INTERACTION WITH SURFACE

Schweigert I.^{1,2}, Lin L.¹, Keidar M.¹

¹ *George Washington University, Washington D.C. 20052, USA*

² *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk 630090, Russia*

Characteristics of streamer propagating over helium jet at atmospheric pressure are studied in 2D simulations and in the experiment. This type of streamer often referred as cold atmospheric plasma jet is widely used for medical applications. We study effect of surface presence and interaction of the streamer with surface with different properties (surface charge, ion-electron emission, biased surface). The enhancement of streamer properties is obtained with biased ring placed some distance from dielectric tube.

Cold atmospheric plasma (CAP) jet becomes attractive research topic due to different applications, in particular for cancer treatments (see for example [1]). The CAP jet forms as a result of ionization along the gas flow passing through high voltage electrodes. Streamer propagates by ionizing neutral particles at front. In Ref. [2], the idea of using a ring with DC voltage was proposed. It was shown that the jet length can be changed by setting up different ring potentials. To study the effect of additional DC voltage from the ring and interaction of jet with a surface we performed experimental and computational analysis of CAP jet, generated by an AC voltage of 4 kV pk-pk at 12.44 kHz in a 5 LPM helium flow. The ring with applied voltage is placed 1 cm apart from the discharge tube. Additionally a grid made from crossed wires covered by dielectric is placed 4 cm apart from discharge tube which models a cell membrane. We have performed 2D simulations of DC discharge in dielectric tube and streamer formation and propagation outside of tube. In our simulation model we use the fluid approach with additional continuity equation for electron energy. The surface charge accumulation and ion-electron emission are taken into account. We assume that streamer propagates over helium at atmospheric gas pressure.

In simulation the ionization front speed is about 17 km/s. The ionization rate is about $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ and this value is constant during streamer propagation up to 4 cm and then quickly decreases. Note that in simulation the gas flow is assumed to be laminar. Streamer channel radius is 300 microns. The electrical field in streamer head is about 10 kV/cm. The measured and computed jet characteristics are in good agreement. A variation of ring potential from -1.5 kV to 1.5 kV considerably affect CAP jet properties. The sheath structure and strength of electrical field near grid surface are essentially changed for different surface potentials and emission yield.

REFERENCES

1. M. Keidar et al. *Br. J. Cancer* **105** (2011) 1295.
2. A. Shashurin, M. N. Shneider, and M. Keidar. *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** (2012) 034006.

INTERACTION OF HELIUM AND ARGON PLASMA JETS ARRAYS

Babaeva N.Yu. and Naidis G.V.

Joint Institute for High Temperatures Russian Academy of Sciences, Izhorskaya 13, Moscow
125412 Russia

nybabaeva@gmail.com, gnaidis@mail.ru

We discuss results from computational investigations of the properties of jets arrays operated in He and Ar. He or Ar is flowing through the tubes of the jets into ambient humid air. We show that jet–jet interactions primarily depend on the properties of plasma forming gas through the tubes. For the helium array, the jets at edges of the array tend to divert while for Ar array plasma propagates more directionally.

Non-equilibrium atmospheric-pressure plasma jets and jets arrays are one of the main plasma sources used in biotechnology and plasma medicine. A rare gas or a mixture of a rare gas with a small percentage of a reactive gas such as O₂ are often used as a plasma-forming gases. One solution to increase the area treated is to group many jets together to form an array [1]. In this work, we investigated the properties of four jets arrays operated in He and Ar. For helium, jets on the edges of the array tend to divert while for Ar plasma propagates more directionally. Such a behavior can result from electrostatic, photoionization and gas dynamic origins as shown in Figure 1. For example, N₂⁺ ions are produced at the boundary of the He or Ar channels where the diffusion of N₂ provides a sufficient density of collision partners and there are still enough energetic electrons and excited helium or argon atoms.

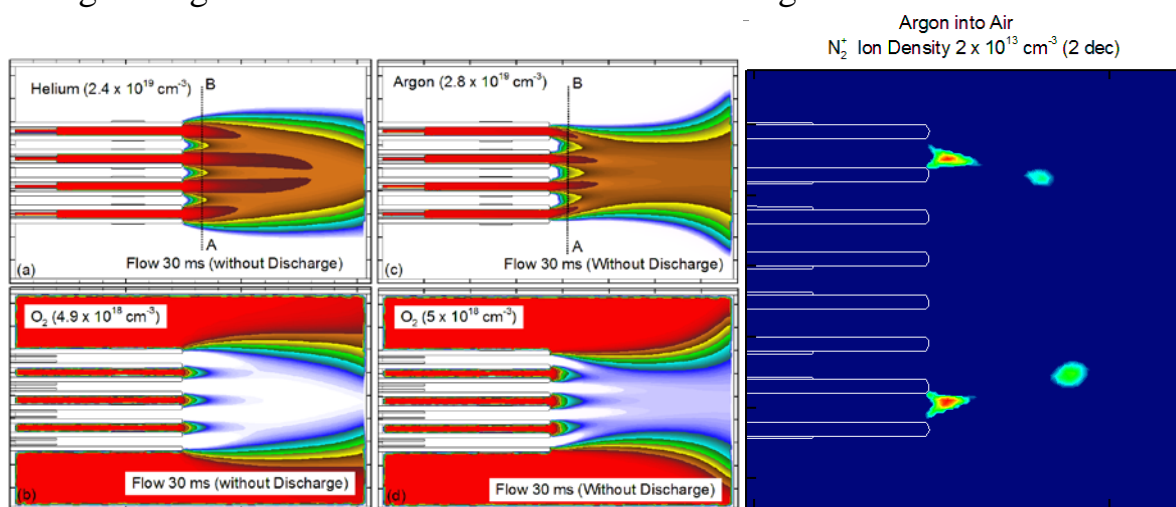


Figure 1. Flow patterns for (a) helium, (b) oxygen for the He array, (c) argon, (d) oxygen for the Ar array, (e) N₂⁺ ion densities for the Ar array.

This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research under Grant 17-52-53044.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Yu. Babaeva, M. J. Kushner. *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** (2014) 015007.

EFFECT OF DC DISCHARGE PLASMA ON CHITOSAN-BASED FILMS: SURFACE PROPERTIES AND *IN VITRO* EVALUATION

Demina T.S.¹, Drozdova M.G.², Zaytseva-Zotova D.S.², Yablokov M.Yu.¹, Gilman A.B.¹, Markvicheva E.A.², Akopova T.A.¹, Zelenetskii A.N.¹

¹*Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials of Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya str, 70, 117393, Moscow, Russia, e-mail:*

²*Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of Russian Academy of Sciences,
Miklukho-Maklaya str, 16/10, 117997, Moscow, Russia
e-mail: detans@gmail.com*

This work was aimed at studying the effect of DC discharge plasma modification of films casted from various chitosan samples and chitosan/poly(L,L-lactide)/gelatin graft-copolymers on their surface properties, chemical structure and cell response. Contact angle measurements, XPS and SEM showed that in spite of the similarity of the observed processes, such as surface hydrophilization and etching, the contribution of each process significantly depended on the initial polymer films characteristics.

Chitosan (Chit), a deacetylated derivative of naturally occurring chitin, is a promising material for a wide range of applications from biotechnology to packaging industry. Plasma modification of Chit-based films was proposed to control their hydrophilic-hydrophobic balance, permeability as well as cell adhesion and proliferation.

This study deals with evaluation of DC discharge treatment effect on chemical structure, surface properties and cell response to the plasma modified films casted either from Chit with various macromolecular characteristics or chitosan/poly(L,L-lactide)/gelatin graft-copolymers (CGP). The films were treated at the cathode or anode by DC discharge using residual air at pressure of 10-15 Pa and current of 50 mA for 60 s. Contact angle and surface charge measurements showed that plasma modification led to hydrophilization and surface energy increase of all the studied films. SEM and XPS observations demonstrated that plasma treatment of Chit films led to etching and oxidation of the surface layers. However, particular features of each process significantly depend on the Chit characteristics, as well as plasma treatment conditions. XPS data confirmed that a surface layer of the CGP films was enriched with a polyester component. The use of CGP for film fabrication markedly affected the surface chemical structure and properties and, therefore led to specific modification effects, namely decrease of oxygen-containing groups.

A number of mouse fibroblasts (L929) were shown to decrease on the plasma treated CGP and Chit films as compared to those on non-treated films (control). Plasma treatment at the cathode led to more pronounced cell viability decrease than at the anode and control. Thus, plasma surface modification could be proposed as a tool to control cell response on the material surface.

**СРАВНЕНИЕ РЕАКЦИИ МОДЕЛЬНОГО БИОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЪЕКТА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ ПЛАЗМЫ
ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА И СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ**

**REACTION OF THE MODEL BIOLOGICAL OBJECT TO INFLUENCE OF
SDBD'S PLASMA PRODUCTS OR STRONG ELECTRIC FIELD**

Лазукин^{1,2} А.В., Сердюков² Ю.А., Кривов¹ С.А., Никитин¹ А.М.

¹ФГБОУ ВО «НИУ «Московский энергетический институт», Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная улица, 14

²ФГБУН Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Россия, 127276, Москва, ул. Ботаническая, 35

E-mail: lazukin_av@mail.ru

Проведено экспериментальное сравнение реакции модельного биологического объекта (семена пшеницы) на воздействие продуктов поверхностного барьерного разряда и переменного электрического поля.

Experimental comparison of reaction of the model biological object (wheat seeds) to the influence of products of a surface barrier discharge and an alternating electric field is carried out.

В работе приведены результаты экспериментального исследования реакции модельного биологического объекта (высококачественные семена озимой мягкой пшеницы «Иркусткая», урожай 2015 г.) на воздействие продуктов плазмы поверхностного барьерного разряда (ПБР) и переменного электрического поля. Обработка продуктами ПБР и электрическим полем проводилась в однотипной электродной конфигурации (три дисковых электрода на поверхности барьера из нитрида алюминия, семена расположены на заземленной плоскости на расстоянии 10 мм от барьера). Различие систем заключалось в наличии обратного электрода при ПБР обработке. Электроды питались синусоидальным напряжением 3,5 кВ (действующее значение) с частотой от 0,05 до 66 кГц. Реакция оценивалась по энергии прорастания (всхожесть на 3-и сутки) и морфологии (длина ростка и длина корневой системы) трехсуточных проростков. Показано, что с ростом частоты переменного электрического поля снижается энергия прорастания. Длина ростка и длина корневой системы (средние по выборке) не имеют прямой связи с изменением частоты (в отдельных случаях наблюдается стимулирование). При воздействии продуктов плазмы ПБР энергия прорастания не снижается. В отдельных режимах ПБР-обработки также наблюдается достоверное стимулирование ростка и корневой системы. Таким образом, наличие плазмы ПБР снижает негативное действие собственного электрического поля плазмонесущего электрода. При сравнении данных необходимо учитывать, что увеличение длины ростка в случае с обработкой электрическим полем связано со снижением всхожести – ослабленные (фитопатогенами, хранением и т.п.) растения с небольшими длинами ростка при воздействии поля тормозят свое развитие и не определяются как всхожие к третьим суткам.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПОДАВЛЕНИЕ РОСТА КИШЕЧНОЙ ПАЛОЧКИ ПРИ ЕЁ ОБРАБОТКЕ СТРУЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

THE INFLUENCE OF GAS OUTLET VELOCITY ON THE INHIBITION OF *ESCHERICHIA COLI* GROWTH WITH LOW-TEMPERATURE PLASMA JET

Степанова О.М.¹, Рыбальченко О.В.¹, Орлова О.Г.¹, Астафьев А.М.²,
Кудрявцев А.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

Россия, 199034, Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург,

E-mail: o.m.stepanova@spbu.ru

Проведено исследование влияния гелиевой плазменной струи при объёмном расходе газа 4,5 и 11 л/мин на рост кишечной палочки *E.coli* M17. В результате выявлены зоны подавления роста (ЗПР) бактерий, форма которых изменялась в зависимости от скорости газового потока. Электронно-микроскопический анализ показал различные соотношения физиологически активных, покоящихся и деструктивных форм клеток на различных участках и границах ЗПР.

The effect of helium plasma jet at the of gas flow rate of 4.5 and 11 l/min on the growth of coliform bacterium *E.coli* M17 has been investigated. Zones of bacterial growth inhibition with various shapes, which depend on the gas outlet velocity, have been revealed. Electron microscopic analysis detected physiologically active, resting and destructive cells from different regions and boundaries of the growth inhibition zones.

Выполнена обработка свежезасеянных на агар клеток кишечной палочки *E.coli* M17 гелиевой плазменной струей при объёмном расходе газа 4,5 и 11 л/мин. Источником плазмы служил барьерный разряд, инициируемый внутри кварцевой трубки с внутренним диаметром 7,49 мм и системой электродов «внутренний стержень – внешнее кольцо». Импульсы питающего напряжения с размахом 4-7 кВ и частотой генерирования 40 кГц подавали на внутренний электрод. Заданный объёмный расход газа 4,5 и 11 л/мин соответствовал скорости газового потока 1,8 и 4,1 м/с. Расстояние между выходным отверстием разрядной ячейки и поверхностью агара устанавливали равным 15 мм.

В результате действия плазменной струи, сформированной при разной скорости потока гелия, выявлены приблизительно одинакового диаметра (10-12 мм) ЗПР бактерий. Их форма, однако, различна: ровный круг с разреженным ростом бактериальных колоний по периферии при расходе газа 4,5 л/мин и два полукольца разного радиуса с плотным бактериальным газоном в центре и между ними - при 11 л/мин. Электронно-микроскопический анализ методом позитивного окрашивания уранилацетатом бактериальных клеток из различных участков и с границы ЗПР выявил различные соотношения физиологически активных, покоящихся и деструктурированных форм клеток.

АНТИМИКРОБНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНДЕНСАТОВ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

THE ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED PLASMA CONDENSATES ON MEDICAL IMPLANTS

Шамсутдинов И.И., Баязитова Л.Т., Гребенщикова М.М., Миронов М.М.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, 420015, Казань, К.Маркса 68, mironov.medinstrument@yandex.ru

На медицинские имплантаты из титана наносили ионно-плазменной технологией покрытия на основе нитридов гафния. Исследовали элементный состав, свойства покрытий в условиях изгиба, а также многослойную структуру и топографию поверхности. Установлены антимикробные свойства и отсутствие токсичности, разработаны методики испытаний. Coatings based on nitrides of hafnium were applied with ion-plasma technology on medical titanium implants. Elemental composition, properties of the coatings in terms of bending, the multilayer structure and the surface topography were investigated. The anti-microbial properties and absence of toxicity are determined. Testing methods are developed.

Конденсацию покрытий из металлической плазмы осуществили в атмосфере азота при давлении около 10^{-1} Па на установке с тремя электродуговыми испарителями. Покрытия характеризуются ровным соломенно-желтым цветом, металлическим блеском. При изгибе основы отслоение покрытия не наблюдается. Микротвердость покрытия достигала 14-30 ГПа, при толщине 2-5 мкм, а объем пор в покрытии не превышал 1-2% на толщине 2 мкм. Структура покрытия характеризуется столбчатыми кристаллами нитридов с характерным размером 20-50 нм и высотой в толщину покрытия. Срез покрытия по толщине ионным травлением установил многослойность покрытия, состоящего из нитридных слоев толщиной 20-30 нм и демпфирующих слоев меньшей толщины, обогащенных металлической составляющей.

Токсикологические и санитарно-химические исследования показали отсутствие токсичности титановых имплантатов с покрытием на основе HfN на длительных сроках контакта. Учитывая указания ГОСТ (ISO) 10993-2011, разработана методика оценки антимикробного эффекта. Испытания на грамположительных (стафилококк) и грамотрицательных (кишечная палочка) бактериях, а также микрогрибковой инфекции доказали наличие достоверно подтвержденного антимикробного эффекта от покрытия. Биосовместимость имплантата с покрытием может гарантировать отсутствие токсичности и сверхнизкая концентрация ионов гафния в 20 суточной водной вытяжке, составившая менее 10^{-9} моль/литр. Концентрация ванадия от основы имплантата-титана марки ВТ6 в водной вытяжке уменьшилась в 5 раз, что характеризует барьерный эффект покрытия, а незначительная миграция ионов титана и гафния – биосовместимость. К этому можно добавить отсутствие цитотоксичности по перевиваемым культурам в условиях их автономного роста на поверхности покрытия.

MICROWAVE PLASMA FOR WOUND TREATMENT

I. Tsonev¹, T. Bogdanov², E. Benova³

¹*Faculty of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., Sofia, 1164, Bulgaria*

²*Medical University–Sofia, 15 Academician Ivan Evstratiev Geshov Blvd., Sofia, 1431, Bulgaria*

³*DLTIS, Sofia University, 27 Kosta Loulchev Str., Sofia, 1111, Bulgaria*

Over 40% of combat-related deaths are attributable to uncontrolled bleeding, the majority of those from noncompressible profuse hemorrhage [1]. Other patients, for example diabetics, have problems with activating healing processes in wounds, which could escalate to losing a limb, quite common in patients suffering from severe forms of diabetes. Plasma treating has proven to have positive effect on activating healing processes and enhancing wound healing. Low temperature plasma jet discharge contains active agents, microwave radiation and UV radiation which sterilize and activate the healing agents in the wound.

The purpose of this research is to accelerate blood coagulation and tissue regeneration of open wounds. For this purpose, we are investigating the effect of a microwave plasma torch sustained by travelling electromagnetic wave with the usage of different gasses and gas mixtures. Till this moment this type of plasma source has not been investigated regarding bio-medical purposes.

Low temperature plasma torch at atmospheric pressure sustained by solid state microwave generator coupled to a wave launching structure surfatron type is used. This plasma source allows varying of the: geometrical parameters (length, diameter, cross section), main plasma parameters (wave power, gas temperature, concentration of charged particles and reactive species, UV and microwave radiation), gas and gas mixture parameters (flow velocity, gas mixture ratio). The fact that we are able to vary these parameters allows us to sustain low temperature plasma torch (gas temperature up to 30 – 37 °C) for in vivo treatment of live ICR mice models.

Acknowledgments:

This work was supported by the Bulgarian Fund for Scientific Research at the Ministry of Education under Grant DM03/3 – 2016.

REFERENCES:

[1] Atharva Amritkar, Becky Cunningham, Bradly Hawkins, Brennan Batalla, David Moore, Eric Thompson, Matt Rossett, Rittick Gupta, Justine Han, & Justin M. Johnson, Nontherm al Plasma-Assisted Trauma Management: Hemostasis of Noncompressible Profuse Hemorrhage, *Plasma Medicine* 3(4): 291-314 (2013), 2151-805X/13/\$35.00 © 2013 by Begell House, Inc. 291

ОБРАБОТКА КСЕНОПЕРИКАРДА ХИРУРГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМОЙ

HIGH-FREQUENCY PLASMA PROCESSING OF XENOPERICARDIUM FOR SURGICAL IMPLANTS

Султангалиева Г.И., Миронов М.М., Гребенщикова М.М.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, 420015, Казань, К.Маркса 68, mironov.medinstrument@yandex.ru

Получали ксеноперикард из перикарда КРС с дублением глутаровым альдегидом и последующей плазменной обработкой в высокочастотном емкостном разряде аргона. Проводили исследование физико-механических характеристик ксеноперикарда собственного производства и зарубежного. Установлено, что после обработки в емкостном разряде прочностные характеристики улучшились на 20-40%.

Xenopericardium was obtained from cattle pericardium with glutaraldehyde tanning and high-frequency plasma processing in a capacitive discharge of argon. A study of physical and mechanical characteristics of xenopericardium own production and manufacturing group Johnson & Johnson (USA). It is found that after processing in a capacitive discharge strength properties improved by 20-40%.

Ксеноперикард применяют в производстве клапанов сердца, вен и артерий. Это объемно-пористый фибриллярный белковый материал животного происхождения с термостойкостью 100-110 °С, и содержанием влаги более 50 %. Структура имплантируемого ксеноперикарда сшита межмолекулярными дубителями. Промышленный выпуск производят США, Израиль, Россия.

Проводили выработку лоскутов из перикарда КРС с дублением глутаровым альдегидом и последующей плазменной обработкой в емкостном разряде аргона, используя для возбуждения частоту 13,56 МГц при давлении 26,6 Па и вкладываемой в разряд мощности 2,0 кВт. Расчетная неравновесность плазмы составляла по температуре тяжелых частиц около 400 К, по электронной температуре на уровне 10 000 К. Физико-механические характеристики ксеноперикарда собственного производства и производства концерна Джонсон и Джонсон (США) после обработки в емкостном разряде улучшились на 20-40% и приведены в таблице.

Таблица - Показатели ксеноперикарда до и после плазменной обработки

Производитель	Время обработки, мин	Прочность, МПа	Температура сваривания, °С
Джонсон и Джонсон	0	18,5-19,2	96,5-97,2
	18- 20	25,6-26,1	99,0- 100,5
Собственное производство	0	15,3-17,5	92,5- 94,6
	18- 20	18,1-19,0	97,2- 98,1

Измерение прочности проводили при относительной влажности воздуха близкой к 100%. Обработка приводит к упорядочению структуры, активации сшивающих агентов, усреднению нанопор, что определено расчетом и подтверждается электронной микроскопией структуры.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С ЖИДКОСТЯМИ, ДЛЯ ПРИДАНИЯ БАКТЕРИЦИДНЫХ СВОЙСТВ ВОДНЫМ РАСТВОРАМ И МЕДИЦИНСКИМ МАТЕРИАЛАМ

THE USING OF THE CONTACTING TO LIQUIDS GAS DISCHARGES FOR GIVING BACTERICIDAL PROPERTIES TO AQUEOUS SOLUTIONS AND MEDICAL MATERIALS

Наумова И.К., Субботкина И.Н.

*Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева,
Россия, 153012, г. Иваново, ул. Советская 45
e-mail: irinauma@mail.ru*

Обработка растворов и материалов медицинского назначения низковольтными газовыми разрядами приводит к их стерилизации и приданию им бактерицидных свойств. Наблюдаемый эффект вызван иницированием химически активных частиц в зоне плазмы. Установлено, что время полной стерилизации и наличие бактерицидной активности определяется типом разряда, видом бактериальной культуры и временем газоразрядной обработки.

The treatment of solutions and materials of medical appointment by low-voltage gas discharges leads to their sterilization and giving bactericidal properties to them. The observed effect is caused by reactive particles in a plasma zone initiation. It is established that the complete sterilization time and existence of bactericidal activity are defined by discharge type, bacteriemic culture type and time of gas-discharge treatment.

В настоящее время плазменно-растворные системы активно используются в ветеринарии и медицине для стерилизации и обеззараживания растворов, жидкостей, поверхности инструментария, оборудования и перевязочных материалов. В нашей работе исследовалось угнетающее воздействие низковольтных электрических разрядов переменного тока (диафрагменного и контактного), генерируемых внутри раствора электролита, на растворы и текстильные материалы, содержащие *Escherichia coli*, *Staphylococcus albus* и *Bacillus subtilis*.

Эксперименты показали, что при горении разряда происходит образование химически активных частиц, проявляющих стерилизующую и бактерицидную активность. Установлено, что полная стерильность объекта и наличие бактерицидного эффекта зависят от времени обработки и электрических параметров разряда, биологических особенностей бактериальной культуры и массивности обсеменения.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ПРИ
ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ПОТОКАХ ГЕЛИЯ,
АРГОНА И АЗОТА В ПРИСУТСТВИИ АГАРИЗОВАННОЙ
ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ В КАЧЕСТВЕ МИШЕНИ**

**ENERGY CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC-BARRIER DISCHARGE
IN THE FORMATION OF PLASMA JET IN HELIUM, ARGON AND
NITROGEN GAS FLOWS IN THE PRESENCE OF AGAR NUTRIENT
MEDIUM AS A TARGET**

Степанова О.М.¹, Пинчук М.Э.¹, Лазукин А.В.², Сподобин В.А.¹, Кривов С.А.².

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, 191186, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург

E-mail: olga.stepanova707@gmail.com

Рассмотрен баланс энергии в системе «барьерный разряд – плазменная струя» в присутствии агаровой питательной среды в качестве мишени. Расчёт энергии выполнен путем интегрирования вольт-кулоновской диаграммы, записанной при заземлении мишени и без него. Варьировали частоту следования импульсов питающего напряжения и скорость газового потока. Показано, что энерговыделение в области разряда растёт при переходе от ламинарного режима истечения газа к турбулентному. При заземлении мишени происходит перераспределение энергии между разрядом и плазменной струей.

Energy balance for the system of “dielectric barrier discharge – plasma jet” in the presence of an agar nutrient medium as a target has been considered. Energy was calculated by means of the integrating of Volt-Coulomb characteristics recorded with the grounding of the target and without it. Pulse frequency of the supply voltage and gas outlet velocity was varied. It is shown that the energy released in the discharge rises with the transition of laminar gas flow into turbulent one. At the grounding of the target the energy is redistributing between the discharge and plasma jet.

Исследованы плазменные струи (ПС) на основе барьерного разряда (БР), сформированные в потоках гелия, аргона и азота при их взаимодействии с микробиологической питательной средой (агаром), выложенной в чашке Петри. Рассмотрен баланс энергии, вкладываемой в разряд, при наличии заземлённого электрода под чашкой Петри и без него. Для питания плазменного генератора использовались высоковольтные источники синусоидального напряжения с частотой следования импульсов 7,5, 31,5 и 84 кГц. Рассматривались ПС, сформированные в ламинарном и турбулентном потоках газа. Вложенная энергия определялась путем интегрирования вольт-кулоновской диаграммы. Показано, что энерговыделение в области БР растёт при переходе от ламинарного режима истечения газа к турбулентному. При заземлении электрода под чашкой Петри происходит перераспределение энергии. При напряжении питания ~1-2 кВ энерговыделение в области БР несколько превышает энерговыделение на чашке Петри. В то время как при ~3-5 кВ энергия в ПС на порядок больше энергии, выделенной в БР, и может достигать величин, соответствующих дуговой стадии развития разряда (~1 мДж).

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ПОДГОТОВКИ СЕМЯН

POSSIBILITIES OF PLASMA CHEMICAL TREATMENT IN PRESOWING PREPARATION OF SEEDS

Субботкина И.Н., Наумова И.К.

*Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева,
Россия, 153012, г. Иваново, ул. Советская 45
Ivanovo State Agricultural Academy, Sovetskaya str 45, 153012 Ivanovo, Russia
e-mail: irinauma@mail.ru*

Обработка воды газовыми разрядами приводит к генерации химически активных частиц, в том числе, с относительно большим временем жизни, что придает воде бактерицидные свойства. В работе показано, что обработка с использованием активированной плазмой воды семян ржи и картофеля положительно влияет на начальные этапы развития растений и качественные характеристики урожая.

The treatment of water by gas discharges leads to the production of chemically active species, including species with a relatively long lifetime, which imparts the bactericidal properties to water. In our experimental study, it was shown that treatment of rye and potato seeds with plasma activated water positively influences the initial stages of plant development and the qualitative characteristics of the crop.

В последние годы большое внимание уделяется возможному использованию плазмы, контактирующей с жидкостями, для решения задач, возникающих в сельскохозяйственном производстве и в пищевой промышленности. В данной работе экспериментально исследовано влияние активированной плазмой воды (АПВ) на два вида биологических объектов: семена ржи и картофеля. Воду обрабатывали разрядом постоянного тока с жидким катодом, а также диафрагменным разрядом или контактном разрядом, возбуждаемом в объеме жидкости, и контролировали образование различных активных частиц в жидкой фазе. В обработанной воде замачивали семена ржи перед проращиванием. Эксперименты показали, что использование АПВ приводит к увеличению степени набухания и всхожести семян (эффект достигает 30%), а также положительно влияет на длину проростков и корней. Кроме уничтожения патогенной микрофлоры, которая находится на семенах, обработанная плазмой вода содержит активные частицы, которые проникают сквозь клеточную мембрану и активизируют клеточные процессы. Все это влияет на начальные этапы развития растений.

Кроме семян ржи замачиванию в воде, обработанной газовым разрядом, подвергали и семена картофеля. Контроль урожайности и качественных характеристик корнеплодов показал, что использование АПВ повышает урожайность на 29%, а также приводит к увеличению содержания общих сахаров и массы сухого остатка корнеплодов при некотором уменьшении содержания крахмала.

ЭКСПРЕСС СТЕРИЛИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКОГО ИНСТРУМЕНТА EXPRESS STERILIZATION OF MEDICAL INSTRUMENT

Токарев А.В., Лелевкин В.М.

Кыргызско - Российский Славянский Университет им. Б.Н.Ельцина, 720000,
Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская, 44,
dedushka79@mail.ru

Рассматривается метод экспресс стерилизации медицинского инструмента на основе совместного воздействия озона, УФ-излучения, атомарного кислорода и свободных гидроксильных радикалов.

The method of express sterilization of a medical instrument based on the joint action of ozone, UV radiation, atomic oxygen and free hydroxyl radicals is considered.

Целью работы является разработка экспресс метода стерилизации медицинского инструмента. В экспериментальном стерилизаторе (Рис.1.) генерация озона осуществляется в барьерном разряде а наработка активных

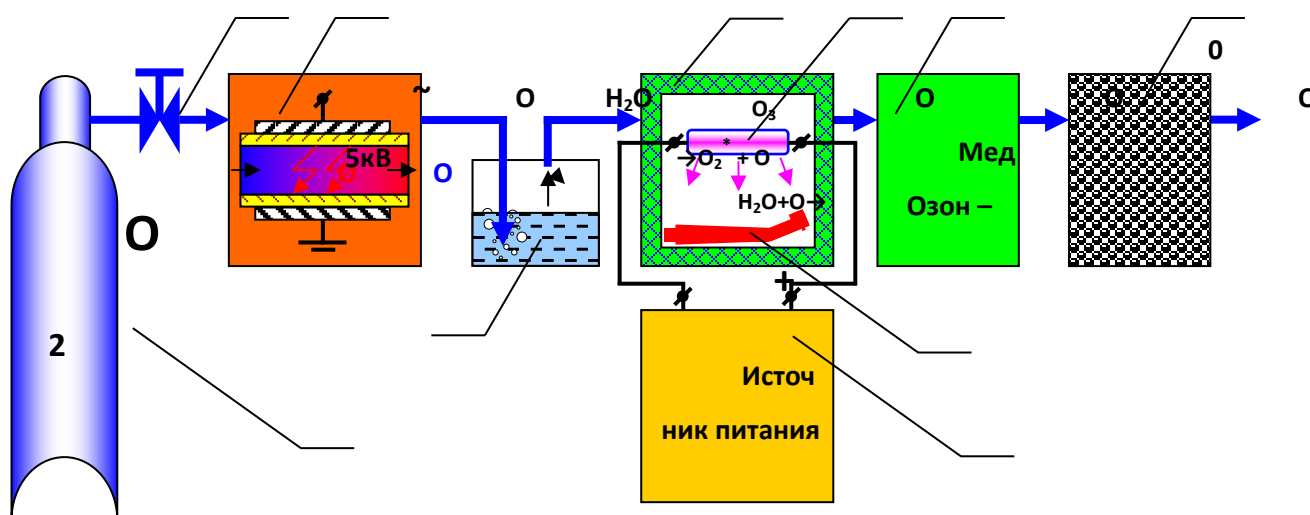


Рис. 1. Схема экспериментального стерилизатора. 1 – Кислородный баллон. 2 – Редуктор. 3 – Озонатор. 4 – Барботажный аппарат. 5 – Камера обеззараживания. 6 – Ультрафиолетовая лампа ДРЛ 250. 7 – Источник питания ультрафиолетовой лампы. 8 – Обеззараживаемый инструмент. 9 – Озонометр. 10 – Деструктор озона.

радикалов производится путем облучения объема УФ излучением газоразрядной лампы. В качестве модели используется кровь, содержащая вирусы гепатита В. Кровь наносилась на поверхности стоматологических наконечников, которые затем обрабатывались в камере установки.

Анализ обработанных наконечников на гепатит В проводился лабораторией центра изучения СПИДа г. Бишкек методом ИФА, который показал что при 5 – ти минутной экспозиции вирусы гепатита В присутствуют в незначительных количествах. Десяти минутной обработки достаточно для проведения стерилизации инструмента.

Таким образом совместное воздействие озона, УФ-излучения, атомарного кислорода и свободных гидроксильных радикалов позволяет эффективно воздействовать на микрофлору и получить быстрый стерилизационный эффект медицинского инструмента.

Секция 7
ПЛАЗМОДИНАМИКА

GENERATION OF QUASI-PERPENDICULAR COLLISIONLESS SHOCKS BY LASER-PRODUCED PLASMA TO SIMULATE THE EFFECTS OF SUPER-COMPRESSION OF THE EARTH MAGNETOSPHERE

Zakharov¹ Yu.P., Ponomarenko¹ A.G., Terekhin² V.A., Golubev² A.I., Boyarintsev¹ E.L., Vchivkov¹ K.V., Melekhov¹ A.V., Posukh¹ V.G., Prokopov¹ P.A.

¹ Institute of Laser Physics (ILP) Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Av. Lavrentyeva 13/3, 630090, Novosibirsk, Russia. E-mail: ki1z@mail.ru

² All-Russian Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF), Av. Mira 37, 607188, Sarov, Russia.

Giant plasma releases of so called Coronal Mass Ejections (CME, with kinetic energy up to $E_k \sim 10^{36}$ эрг) from the surface of the Sun and their potential catastrophic impact onto Earth's magnetosphere, with the probable opportunity to compress it 2, 3 or more times [1-3], represent one of the most important problem in the geophysical and historically-bioevolutional investigations of the past and present of the Earth. It was supposed that the re-connection of magnetic fields at MagnetoPause (MP) could play [2] an exclusive role in the inward shift of MP, but from the more general point of view (to perform laboratory simulation [1] of MP dynamics), the most important and common features of CME propagation in Solar Wind plasma are the formation of Quasi-Perpendiculare Shocks (Q-PS) ahead of Super-Alfvenic CME. It is provided by the almost radial (along to \mathbf{R}) motion of CME from the Sun, while the Interplanetary Magnetic Field \mathbf{B}_0 has an angle $\theta \sim 45^\circ$ (relative to \mathbf{R}) near the Earth orbit. Up to date, in spite of intensive development of laser energetics and energy [4] of Laser-Produced Plasma (LPP, e.g. in comparison with initial simulations [5] at KI-1 facility of ILP), such collisionless Q-PS never were studied in laboratory [6], excluding recent LPP-experiment (see Fig. 1) at KI-1 [7]. In the given work, a first results of our study were presented together with relevant calculations by hybrid codes and the data of physical model of VNIIEF [8] on the collisionless Magnetic Laminar Interaction of spherical LPP with magnetized background plasma. A special analysis was done on the conditions of whistler generation in front of oblique shocks. This work was supported by ILP SB RAS Research Program 0307-2016-0002 and by Fundamental Program of Presidium RAS/Siberian Branch of RAS on 2017.

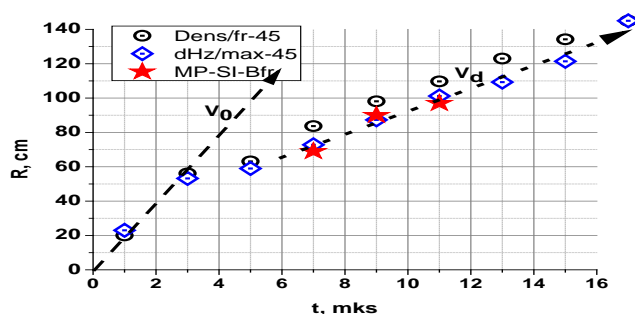


Fig. 1. R-t diagram propagation of strong disturbances in experiment MP-SI along to line target-dipole (at angle $\theta \sim 45^\circ$ to \mathbf{B}_{0z}), according to data: registration of front magnetic disturbances (asterisk) and data of hybrid code (on density front – circles and on maximum B_z -field – squares).

1. Yu.P. Zakharov, A.G. Ponomarenko, V.G. Posukh et al. *J. Phys.: Conf. Ser.* **688**, (2016) 012129.
2. V.S. Airapetian, et al., *Proc. 18th Workshop "Cool Stars, Stellar Systems..."* (2015) 257.
3. V.S. Airapetian, A. Glocer, G. Gronoff, et al., *Nature – Geoscience* **9**, (23 May 2016) 452.
4. Yu.P. Zakharov, A.G. Ponomarenko, V.A. Terekhin, et al. *Quantum Electronics* **46**, (2016) 399.
5. В. М. Антонов, Ю. П. Захаров, А.М. Оришич, и др. //VII Всесоюз. Конф. (Т. III) по Физике Низкотемпературн. Плазмы, Ташкент, 1987 г: Обз. Докл. – ИВТ АН СССР, 1988. – С.116.
6. D.B. Schaeffer, E.T. Everson, A.S. Bondarenko, et al., *Phys. Plasmas* **21** (2014) 056312.
7. Yu.P. Zakharov, A.G. Ponomarenko, V.A. Терехин, et al., *VII Intern. Symp. "Modern Problems of Laser Physics"* (22-28 August 2016, Novosibirsk, ILP) 254.
8. В.П. Башурин, А. И. Голубев, В.А. Терехин//Журн. Прикл. Мех.Техн. Физ. №5 (1983) –С.10.

МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ «ТЯЖЕЛЫХ» УДАРНИКОВ

ELECTROMAGNETIC LAUNCHER FOR “HEAVY” PROJECTILE

Козлов А.В., Котов А.В., Полищук В.П., Шурупов А.В., Шурупов М.А.

ОИВТ РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

polistchook@mail.ru

Представлен рельсовый ускоритель с емкостным источником энергии на 4,8 МДж. Описаны эксперименты по разгону ударников массой 15 г в режиме плазменной арматуры.

Railgun with capacitive power source of 4.8 MJ has been described. Experiments on the throwing of projectiles with weight of 15 g in the regime of plasma armature have been presented.

Представлена электромагнитная метательная установка с емкостным источником энергии (ЕН) на 4,8 МДж при номинальном напряжении зарядки 6 кВ. ЕН состоит из семи модулей с независимым запуском. Установка позволяет исследовать разгон ударников в рельсовом ускорителе в двух режимах: с твердым якорем и с плазменной арматурой. Энергия ЕН достаточна для метания ударников массой порядка 0,3 кг со скоростью 3 км/с.

Эксперименты с плазменной арматурой проводились в рельсотроне с длиной канала 0,7-1 м и внутренним диаметром 17-25 мм. Электроды изготавливались из меди, изоляторы – из поликарбоната. Масса ударников из поликарбоната составляла 5-15 г. Для запуска разряда в рельсотроне применялся графитовый инициатор массой 0,5-1 г. Использовались три модуля ЕН с суммарной номинальной энергией 1,2 МДж.

Система диагностики включала в себя: измерение тока, входного и выходного напряжения в рельсотроне, контактные датчики на мишени и выходе из канала, магнитные зонды. Проводилась видеосъемка со скоростью 100000 кадров в секунду движения ударника на баллистической трассе и процесса его столкновения с мишенью. В качестве мишеней использовались дюралевые диски толщиной 60 мм и диаметром 150 мм.

Приведены результаты экспериментов, в которых получены скорости метания 2,5-3,5 км/с. Описаны повреждения мишеней при высокоскоростном ударе.

Обсуждаются физические механизмы, ограничивающие скорость метания в рельсовых ускорителях.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ,
ВЫЗВАННЫХ САМОСОГЛАСОВАННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ**
**MATHEMATICAL MODEL OF THE CURRENTS OF DUST PLASMA
CAUSED BY THE SELF-COORDINATED ELECTRIC FIELD**

Тукмакова Н.А.¹, Тукмаков Д.А.²

¹КГТУ им. А.Н.Туполева, Россия, 420111, Казань, К.Маркса, 10,
nadejdatukmakov@yandex.ru

²ИММ РАН, Россия, 420029 г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7,
tukmakovDA@imm.knc.ru

В работе численно изучается процесс формирования волн сжатия и разрежения вследствие движения заряженных частиц под действием кулоновских сил.

In work is studied the process of formation of waves of compression and depression owing to the movement of charged particles under the influence of Coulomb forces.

Данная работа посвящена изучению нестационарных процессов в комплексной плазме представляющей собой взвесь твердых частиц в ионизированном газе. В ходе исследования получена математическая модель квазинейтральной пылевой плазмы конденсированная фаза которой имеет многофракционный состав- представлена частицами, имеющими различный размер и состоящими из веществ с различными физическими свойствами. Предложенная модель пылевой плазмы разработана на основе теории динамики полидисперсной многоскоростной и многотемпературной газовой взвеси с учетом скоростного и температурного запаздывания частиц конденсированных фракций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Б. Кадомцев *Коллективные явления в плазме*/ Издательство «Наука». Москва 1988.-303 с.
2. Ф.А. Сальянов *Основы физики низкотемпературной плазмы, плазменных аппаратов и технологий*/ Москва –«Наука». 1997. 240 с.
3. В.В. Кузенов, М.В. Филипский *Численное моделирование отдельных теплофизических параметров лазерной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2010. Т. 9. № 1. С. 150-158.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NONLINEAR GAS OSCILLATIONS ON THE CHARACTERISTICS OF ARC DISCHARGE

Шайдуллин Л.Р., Кашапов Н.Ф.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

В данной работе исследованы свойства взаимодействия акустических колебаний с плазмой. В случае резонансной частоты колебания газа в трубе, при больших значениях интенсивности были получены вольт-амперные характеристики разряда в воздухе у открытого конца трубы.

The properties of the interaction of acoustic oscillations with a plasma are investigated in this paper. In the case of the resonance frequency of gas oscillations in the pipe, at high values of the intensity, the current-voltage characteristics of the discharge in air at the open end of the pipe were obtained.

Изучение влияния нелинейных колебаний газа на плазму чрезвычайно важно как с точки зрения решения актуальных практических задач, так и теоретических исследований [1]. В последнее время в данной области знаний активно ведется развитие нетрадиционных подходов к проблемам повышения эффективности энергоемких характеристик в современных газопламенных горелках и плазмотронах. В настоящее время в основном изучены особенности происходящих процессов, где продольные колебания газа создаются акустическим электродинамическим излучателем [2]. При возбуждении среды в исследуемых газодинамических системах вблизи резонансов возникают сильно нелинейные волны давления.

Исследования проводятся на установке основанного на виброгенераторе марки TIRAvib S 5220/LS, который преобразует электрически генерированный и усиленный сигнал в механические колебания, передаваемые к поршню, соединенного со стеклянной трубой. С помощью данного вибростенда создается управляемый режим колебания газа в трубе, длиной $L = 0.918$ м и внутренним диаметром $d_0 = 0.1$ м. Источником питания для исследуемого разряда является Spellman STR30P/400VAC мощностью 6 кВт. В случае резонансной частоты ($\nu = 90.3$ Гц), под влиянием акустических колебаний при больших значениях интенсивности ($l = 0.01$ м), происходят изменения вольт-амперной характеристики разряда. Наличие таких колебаний приводит к росту разрядного напряжения при фиксированном значении тока, т. е. к повышению мощности, вкладываемой в разряд.

Интенсивные динамические колебания в плазме, представляет особый интерес в вопросе взаимодействия плазменных потоков с волновым полем, формируемых вибростендом в динамическом диапазоне и могут быть использованы для контроля параметров разряда в процессах получения газотермических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галечан, Г. *УФН*. **165** (12) (1995) 1357-1379.
2. Фадеев С.А. *Известия вузов. Физика*. **57** (3/2) (2014) 110-113.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ PLASMA STABILIZATION BY INERTIAL EFFECTS

Афанасьев В.В., Богослов Е.А., Данилаев М.П., Польский Ю.Е.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КИИ, Российская Федерация, 420111 г. Казань, ул. К. Маркса 10, E-mail: danilaev@mail.ru

Предложен подход к стабилизации плазмы на ограниченных временных интервалах с помощью временных и пространственных инерциальных воздействий.

An approach of inertial influences (time and spatial) plasma stabilization is considered in that paper.

Одна из особенностей стабилизации плазмы в реальных устройствах и системах заключается в обеспечении требуемого вида функции распределения частиц только на ограниченных временных интервалах [1]. В данной работе рассмотрен комплексный подход к стабилизации плазмы с помощью инерциальных воздействий (ИВ). Комплексность подхода заключается в том, что для области относительно больших характерных времен неустойчивостей ИВ реализуются во временной области (например, стабилизация плазмы в коаксиальной разрядной камере вращающимся магнитным полем). В области малых характерных времен (менее 10^{-9} с), где реализация стабилизирующих воздействий во временной области практически не возможна, реализуют пространственные стабилизирующие ИВ (например, за счет структурирования мишени для лазерного термоядерного синтеза - ЛТС) [2].

На основе формализованного подхода, в работе предложен метод стабилизации плазмы в мишенях ЛТС путем изготовления структурированных многослойных мишеней со слоями, выполненными в виде ячеистых пространственных структур с переменным размером ячеек по глубине слоев мишени. Важным преимуществом предлагаемых структурированных многослойных мишеней является возможность взаимоподавления локальных неустойчивостей в плазме, возникающих в различных локальных областях слоев мишени, при надлежащем выборе структуры слоев и параметров ячеистых пространственных структур. Таким образом, предлагаемый подход к стабилизации плазмы позволяет с общих позиций анализировать механизмы замедления развития локальных неустойчивостей в плазме мишеней ЛТС и обеспечения требуемых временных законов изменения плотности потока энергии для устойчивого сжатия и нагрева мишени, а также решать обратную задачу устойчивости плазмы с выявлением требуемого закона распределения плотности материала и присадок в абляционном и рабочем слоях мишени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайловский А.Б. *Теория плазменных неустойчивостей*. Изд. 2-е, перераб. и доп. в двух томах. М.: Атомиздат. 1975. 272 с.
2. В.В.Афанасьев, Е.А.Богослов, М.П.Данилаев, Ю.Е.Польский *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. **18**(3) (2015) 31.

ELECTROHYDRODYNAMIC FLOW APPLICATION IN GAS DISCHARGE LASER CIRCULATION SYSTEM

Dremin D.V., Khomich Yu.V., Rebrov I.E., Yamshchikov V.A.

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, Russia, Saint- Petersburg, Dvorzovaya Naberezhnaya 18, 191186, Rbrv.igor@gmail.com

Abstract: Electric discharge N₂-laser with circulation system based on electrohydrodynamic flow is described. Experimental studies and mathematical modeling of EHD flow considering configuration of circulation chamber and discharge gap have shown value of a stream more than 15 l/s.

Electrohydrodynamic (EHD) gas acceleration systems are extensively used in cooling and circulation devices, and in laser technique for active air flow control [1-3]. The advantage of these devices is the absence of moving parts, vibration and noise, as well as the need to use preionisation. They are simple, compact and reliable compared to conventional electromechanical fan. The most important factor affecting maximum frequency of electric discharge lasers impulse repetition is the velocity of working gas mixture circulation V in the interelectrode gap [4-7]. In its turn the circulation rate is determined by the value of gas flow W , provides by circulation system. Electric discharge N₂-laser with EHD circulation system integrated in gas circulation and cooling contour was investigated. Experimental studies and mathematical modeling of gasdynamic processes in EHD flow considering configuration of circulation chamber and the area of discharge gap of 200 cm³ were carried out. Multicascade circulation system consists of plasma emitters (PE) and ion collectors. Researches with amount of PE in one stage from one to six were conducted. According to our results, the value of the gas flow increases in proportion to the amount of PE by increasing the area of emitter. Therefore, to obtain $W \geq 15$ l/s, required for efficient laser operation, it is necessary to use more than three PE. The system with two emitters in two cascade configuration and with one PE and four stages was optimum for velocity of gas flow and efficiency. Operating voltage of such systems was 17 kV and the flow velocity reached 3 m/s in the output of single stage and 1,3 m/s in laser discharge gap. At this speed, the volumetric flow rate is of 16 l/s, thereby we are able to obtain the N₂-laser output energy of to 3 mJ with a pulse repetition frequency of 50 Hz using a single stage and up to 150 Hz using four respectively.

REFERENCES

1. V.Y. Khomich et al. *SPEEDAM 2016*. **1** (2016) 918.
2. A.P. Kuryachii et al. *Aerospace Science and Technology*. **59** (2016) 155.
3. S.V. Nebogatkin et al. *Plasma Physics Reports* **42** (2016) 104.
4. I.E. Rebrov et al. *Hakone 14*. **1** (2014) 78.
5. V.A. Yamshchikov et al. *ALT' 15*. **1** (2015) 175.
6. V.Y. Khomich et al. *JOP: CS*. **652** (2015) 012036.
7. V.A. Yamshchikov et al. *ALT'16*. **1** (2016) LSM-P-12.

THRUST AND THRUST-TO-POWER RATIO IN ELECTROHYDRODYNAMIC PROPULSION ELECTRODE SYSTEMS

Dremin D.V., Khomich Yu.V., Rebrov I.E.

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, Russia, Saint- Petersburg, Dvorzovaya Naberezhnaya 18, 191186, Rbrv.igor@gmail.com

Abstract: Dependences for the efficiency of ionocraft electrode system and the magnitude of the thrust were obtained for different polarity of the corona. The most effective mode of work lifters of the considered structures is achieved at low current. The increase of distance between the corona electrode and the collector gives the growth of thrust and thrust-to-power ratio up to some distance. In the subsequent distancing statistically significant increase of characteristics is not observed. It is advisable to use emitters with smaller diameter to reduce losses to the formation of the corona.

The influence on thrust parameter [1-2] and efficiency [3] from geometric parameters and design features [4, 5] of the ionocraft electrode systems (IES) in air at atmospheric pressure and natural humidity [6] is considered. Thrust parameter is represented by magnitude of a generated thrust F [g], and the efficiency is evaluated by magnitude of thrust-to-power ratio, which is equal to ratio of thrust to power consumption F/P [g/W]. Thrust F will increase in proportion to increasing distance of the collector-emitter l if other parameters stay the same [7]. In practice, this dependence cannot be fully performed. Increasing of the zone of acceleration of charged particles leads to an increase of the thrust up to some distance. As l increases, the growth of thrust F is slowing down. Using formula for estimating thrust for ionocraft and expressions for power consumption and I - V curve of corona discharge, thrust-to-power ratio for ionocraft is obtained:

$$\frac{F}{P} = 2l \left(\mu V_k \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4I}{CV_k^2}} \right) \right)^{-1}$$

where μ is ion mobility in air; V_k is the critical corona voltage; I is intensity of current; C is a constant value defined for a particular geometry of the system. Hyperbolic dependence for thrust-to-power ratio from current shows necessity of work of ionocraft in modes small values of current I as the most effective. With increasing l , the system with a negative corona becomes more effective in comparison with the device with the positive corona with the similar configuration. The using of emitter with wire diameter $d = 0.02$ mm increase thrust-to-power ratio by 10% compared with wire diameter $d = 0.08$ mm.

REFERENCES

1. B.S. Aleshin et al. *Technical Physics Letters*. **43** (2017) 45.
2. S.L. Chernyshev et al. *Aerosp. Sc. and Tech.* **59** (2016) 155.
3. M.D. Gamirullin et al. *Applied Ph.* **46** (2015) 591.
4. I.E. Rebrov et al. *Tech. Phys.* **61** (2016) 1130.
5. V.Yu. Khomich et al. *JOP: CS.* **652** (2015) 012036.
6. M.D. Gamirullin et al. *TsAGI Science Journal.* **46** (2015) 591.
7. K. Masuyama, S.R.H. Barrett. *Proc. of the Royal Society* **469** (2013) 20120623.

COMPARISON OF DIFFERENT IONOCRAFT ELECTRODE SYSTEM MODELS

Dremin D.V., Khomich Yu.V., Rebrov I.E.

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, Russia, Saint- Petersburg, Dvorzovaya Naberezhnaya 18, 191186, Rbrv.igor@gmail.com

Abstract: The influence on thrust parameter and efficiency from geometric parameters and design features of the ionocraft electrode systems (IES) in air at atmospheric pressure and natural humidity is considered. Collector in form of a grid or two parallel tubes gives a significant increase of thrust and thrust-to-power ratio of EHD propulsion system compared with the single tube collector.

Geometric parameters and design features of the IES include the diameter of the corona electrode, the distance between it and the collector, the number of plasma emitters (PE) in usage and the framework of the collector [1-4]. Designs of five IES models shown in Fig 1. Thrust parameter is represented by magnitude of a generated thrust F , g and the efficiency is evaluated by magnitude of thrust-to-power ratio F/P , g/W [5-7]. In all five models nichrome emitter wire with diameter $d = 0.02$ mm is under negative potential. The aluminum tube collector has diameter $d_c = 10$ mm. Results of the experiment show that F/P of system with the grid collector and system with double tube collector are comparable, although for the last one a greater thrust value is observed at the same discharge current. Compared to the single tube collector such configurations give an increase of value of F/P to 1.5–2 times. Using of double PE leads to a drop of output parameters due to the mutual shielding of PE, when the ratio h/l is lower value of 1.15. The IES with a grid collector has reached the maximum for this series of experiments of thrust to about 2.8 g.

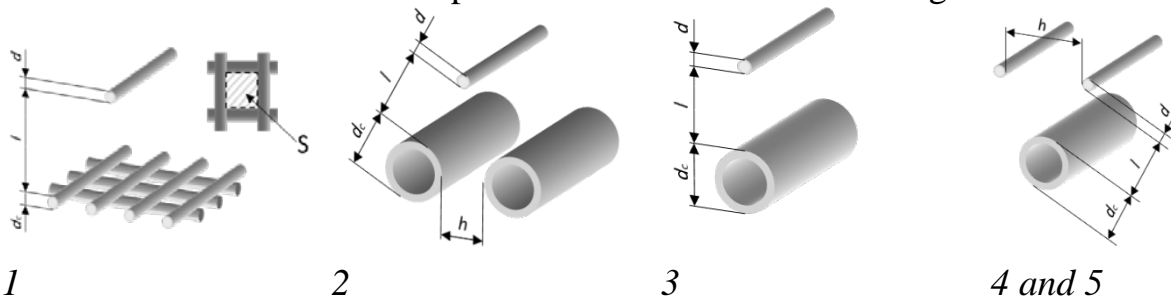


Fig 1. 1 – steel grid collector with mesh size of $S = 2 \times 2$ mm² and diameter $d_c = 0.42$ mm; 2 – double tube collector with distance $h = 10$ mm; 3 – single tube collector; 4,5 – double wire emitter with h equal 10 and 30 mm, single tube collector.

REFERENCES

1. S.I. Moshkunov et al. *Russian Physics Journal* **59** (2016) 9-2.
2. Д.В. Дремин, И.Е. Ребров. *Сборник трудов VI Всерос. молод. конф. по фунда. и инновац. вопросам современной физики*. **1** (2015) 137.
3. I.E. Rebrov et al. *Tech. Phys.* **61** (2016) 1130.
4. V.Yu. Khomich et al. *JOP: CS.* **652** (2015) 012036.
5. M.D. Gamirullin et al. *TsAGI Science Journal.* **46** (2015) 591.
6. S.L. Chernyshev et al. *Aerosp. Sc. and Tech.* **59** (2016) 155.
7. B.S. Aleshin et al. *Technical Physics Letters* **43** (2017) 45.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДУГОВОЙ КАМЕРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНА

EFFECT OF ARC CHAMBER GEOMETRY ON THE CHARACTERISTICS OF THE PLASMA GENERATOR

Даутов Г.Ю.¹, Кашапов Н.Ф.², Даутов И.Г.^{1,2}, Софроницкий А.О.^{1,2}

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

²Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань, 420008, ул. Кремлевская, 18.
E-mail: artempic8@mail.ru

Аннотация: В этой работе показана возможность существенного влияния на характеристики плазмотрона изменением диаметра дуговой камеры по ее длине.

Abstract: This article shows that the change of the diameter of arc chamber along its length significantly influences the characteristics of plasma generators.

Основными частями дуговой камеры исследуемого плазмотрона являются катод, анод и секционированная межэлектродная вставка (МЭВ). Плазмообразующий газ – воздух подается в дуговую камеру через межсекционные кольца закруток и в начале канала. Внутренний радиус МЭВ в направлении движения плазмы меняется линейно $R=R_0(1+k_1l x)$, где R_0 – радиус дуговой камеры при $x=0$ и l – длина МЭВ. В случае $k_1>0$ дуговая камера расширяется в направлении движения плазмы и $R_0=0,5$ см, а в случае $k_1<0$ $R_0=0,75$ см и дуговая камера сужается в направлении движения плазмы.

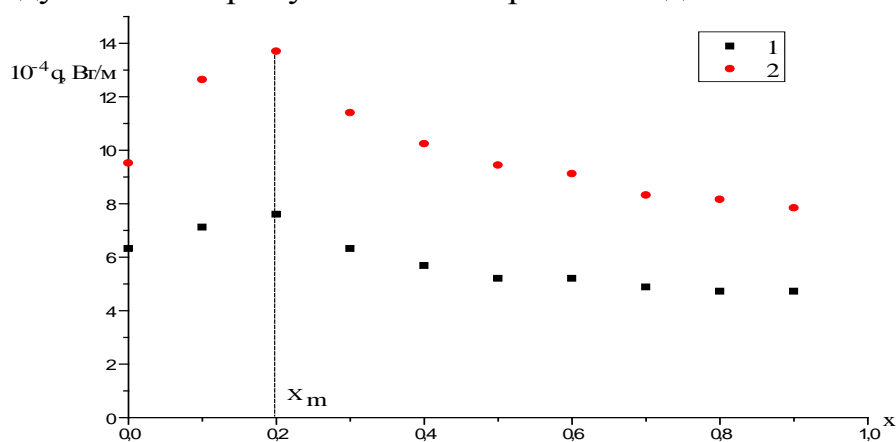


Рисунок 1. Графики распределения потери тепла через стенку дуговой камеры.

На рисунке 1 показаны графики распределения потери тепла через стенку дуговой камеры при $G_0=0,32$ гс⁻¹, $G_i=0,17$ гс⁻¹, $k_1l=5,25$. Графики 1 и 2 соответствуют силе тока 150 А и 200 А. Как видно, при больших x в направлении движения плазмы q уменьшается, что приводит к повышению КПД плазмотрона.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гайсин Ал.Ф. *Физика и химия обработки материалов*. 2016. № 3. С. 22-26.
2. Гайсин Ал.Ф., Абдуллин И.Ш., Басыров Р.Ш., Хазиев Р.М., Самитова Г.Т., Шакирова Э.Ф. *Физика плазмы*. 2014. Т. 40. № 12. С.1095.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ЗАТУХАНИЯ АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ В ДИССИПАТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BREMSSTRAHLUNG ON THE PROCESS OF ALPHEN WAVE ABSORPTION IN DISSIPATIVE PLASMA

Гавриков М.Б., Таюрский А.А.

ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д.4, tayurskiy2001@mail.ru

В работе рассмотрена задача о затухании альфвеновской волны, падающей на границу диссипативной плазмы, учитывающей гидродинамические вязкости и теплопроводности электронов и ионов, магнитную вязкость, релаксацию температур, тормозное излучение.

The problem of absorption of Alfvén wave falling on a boundary with a dissipative plasma is considered in the paper, where take into account hydrodynamic viscosities and thermal conductivities of electrons and ions, magnetic viscosity, temperature relaxation, bremsstrahlung.

Как известно из работы [1], за разогрев солнечной короны до нескольких миллионов градусов ответственны затухающие альфвеновской волны, которые генерируются в нижних значительно более холодных солнечных слоях. Как показали наши исследования [2], затухание происходит на длинах порядка скин-слоев, на которых МГД уравнения не применимы, поэтому в основу исследований положены уравнения двухжидкостной электромагнитной гидродинамики с полным учётом инерции электронов. Предложена неявная разностная схема численного расчёта плоских течений двухжидкостной плазмы. Проведённые исследования позволили установить зависимость затухания от частоты альфвеновской волны и электронной теплопроводности и вязкости. Выполненные исследования учитывали как тормозное, так и синхротронное излучение. Обнаружены такие эффекты, как установление процесса затухания альфвеновской волны и эффект запираания альфвеновской волны в диссипативной плазме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-03085, 16-31-00302).

ЛИТЕРАТУРА

1. Scott W. McIntosh, Bart Pe Pontien, Marts Carlsson, Viggo Hansteen, Paul Voerner & Marsel Goossens. *Nature*, 2011, v.475, p.478-480.
2. Гавриков М.Б., Таюрский А.А. *Математическое моделирование*, 2013, т.25, №8, с.65-79.

О ВЛИЯНИИ СТРУКТУРЫ МИШЕНИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

ABOUT INFLUENCE OF TARGET STRUCTURE ON LASER PLASMA GENERATION EFFICIENCY

Loktionov E.Yu., Telekh V.D.

*Bauman Moscow State Technical University, Russia, 105005, Moscow,
2nd Baumanskaya str. 5-1, stcpe@bmstu.ru*

Пространственные ограничения, накладываемые на теплоперенос в мишени при использовании фольги или спекания из порошка, показали на примере титана не только существенное увеличение эффективности генерации газово-плазменных потоков по сравнению с массивными мишенями (особенно при низких плотностях энергии), но и изменение характера зависимости удельного механического импульса отдачи C_m от плотности энергии лазерного излучения F – с выпуклой на вогнутую. Минимальная разница между значениями C_m для массивной мишени и фольги составила 1,68 раз, максимальная – 1,5 порядка, всегда в пользу последней. При воздействии на спеченные из порошка пористые мишени удельный механический импульс отдачи был меньше, чем при воздействии на фольгу из того же материала (характер зависимости $C_m(F)$ был идентичным), но при нормировании на плотность результаты выравнились, что, на наш взгляд, подтверждает роль процессов рассеяния тепла в снижении эффективности воздействия на массивные мишени.

Spatial restrictions on heat transfer imposed in foil and sintered powder titanium targets have resulted not only in sufficient efficiency of gas-plasma flows generation increase as compared to bulk Ti targets (especially at low laser fluences), but also in change of the pattern of momentum coupling coefficient C_m dependency on laser fluence F from convex to concave. Minimum difference C_m in values for bulk and foil targets was 1.68 times, maximum – 1.5 orders of magnitude (always higher for foil). At the impact on sintered porous targets momentum coupling coefficient was lower than for foil of the same Ti ($C_m(F)$ dependency pattern was identical), but normalised by mass density, the results became about equal. To our mind, this confirms the role of heat dissipation processes in decrease of efficiency at the impact on bulk targets.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF LASER IGNITION OF NATURAL GAS AT ELEVATED PRESSURES

Loktionov E.Yu., Pasechnikov N.A., Telekh V.D.

*Bauman Moscow State Technical University, Russia, 105005, Moscow,
2nd Baumanskaya str. 5-1, stepe@bmstu.ru*

Недавние разработки лазерных свечей зажигания для двигателей внутреннего сгорания показали недостаток данных по лазерному иницированию топливных смесей при давлениях в несколько атмосфер, необходимых для оптимизации энергии и фокусировки лазерных импульсов. Как известно, пороги оптического пробоя в газах уменьшаются с ростом давления до примерно 100 бар. Однако преодоление порога оптического пробоя не является достаточным условием для иницирования горения, поэтому минимальная энергия иницирования (МЭИ) становится более важной величиной для установления ядра горения. В отличие от порога пробоя, она слабо зависит от длительности для наносекундных и более длинных лазерных импульсов. Мы предположили, что воздействие ультракороткими лазерными импульсами может привести к существенному снижению МЭИ за счет нелинейных эффектов. Поэтому мы исследовали поджиг смесей на основе природного газа 71 пс лазерными импульсами и сравнили полученные результаты с результатами воздействия 12 нс импульсами.

Recent development of laser spark plugs for internal combustion engines have shown lack of data on laser ignition of fuel mixtures at multi-bar pressures needed for laser pulse energy and focusing optimisation. It's well known that optical breakdown thresholds in gases decrease with pressure increase up to ca. 100 bar. However, breakdown is not a sufficient condition for combustion ignition, so minimum ignition energy (MIE) becomes more important for combustion core onset. The latter, unlike breakdown threshold, is poorly dependent on laser pulse length in nanosecond and longer range. We suggested, that irradiation by ultrashort laser pulses may lead to significant MIE decrease due to non-linear effects. So we have investigated ignition of natural gas – air mixtures by 71 ps laser pulses and compared the results with those obtained for 12 ns pulses.

Секция 8

ПЛАЗМА В СИНТЕЗЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ

HIGH PRESSURE ICP/RF PLASMA SYSTEMS FOR NANO-MATERIALS PRODUCTION

Igor Matveev¹, Svetlana Matveyeva¹, Sergei Zverev²

¹Applied Plasma Technologies, McLean, Virginia, USA

²Peter the Great Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

To investigate some promising plasma assisted processes at the elevated pressures Applied Plasma Technologies, Corp. has developed an inductively coupled (ICP) or radio frequency (RF) plasma system APT-60 with input power up to 60 kW and APT-100 with input power 100 kW.

General view of APT-100-2 is depicted in Fig.1.

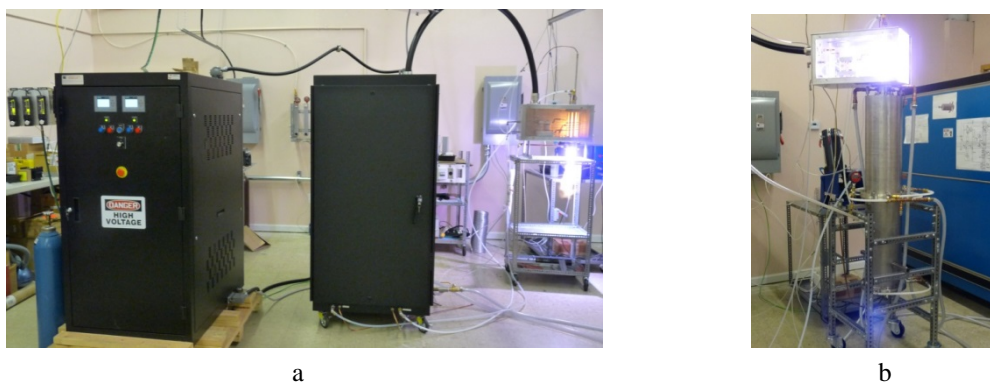


Fig.1. APT-100-2: a) two-modular power supply with coaxial cable and capacitor bank combined with torch, b) high pressure reactor for boron nitride nano-tubes production with top mounted torch.

Among advantages of the newly developed systems are:

- High pressure operation (tested up to 7 bar) means higher plasma enthalpy, smaller reactors, high pressure output (no need in compression);
- Portable design and low gravimetric parameters. Total weight of the APT-100 power supply is 1,100 kg;
- Wide range of operation frequency – from 4 MHz to 7 MHz, what provides stable operation on different gases, including N₂, at elevated pressures;
- Remote ignition;
- Patented torch with direct and reverse plasma stabilization;
- Advanced control system with customer friendly data visualization;
- Contemporary and portable gas supply system - 190 x 190 x 200 mm for 3 gases;
- High thermal efficiency - up to 60%;
- Low cooling water flow – 30-40 liters per minute (over 120 l/min for TEKNA same power system).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ДЕНДРИТОВ В БАРЬЕРНОМ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ CARBON DENDRITES FEATURES FORMATION IN THE BARRIER GAS DISCHARGE AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Данилаев М.П., Богослов Е.А., Польский Ю.Е.

КНИТУ КАИ, Россия, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса 10. E-mail: danilaev@mail.ru

В статье впервые приводятся оригинальные результаты экспериментальных исследований формирования углеродных дендритов в плазме барьерного газового разряда. Показана возможность образования клатрат атомов инертных газов на зародышах, которыми являются молекулы эксимера ArC.

The original experimental studies results of carbon dendrites formation in the barrier gas discharge are considered in that paper. The possibility of inert gases atoms clathrate formation on the embryos, which are molecules excimer ArC is showing.

Получение углеродных дендритов, состоящих из частиц графена возможно в диапазоне температур от 800 °С до 3000 °С, наблюдаемых в дуговых разрядах атмосферного давления. Значение энергии электронов в таких разрядах оказывается достаточной для инициирования образования молекул эксимеров, которые могут являться зародышами роста конгломератов частиц графена в разрядном объеме. При этом если характерное время роста конгломерата углеродных частиц меньше характерного времени жизни молекулы эксимера возможно образование клатратов атомов инертных газов, в которых зажигают разряд [1,2]. Целью данной работы является определение условий роста углеродных дендритов, с клатратами атомов инертных газов. В работе обсуждаются условия получения клатратов атомов инертных газов в углеродных дендритах. Показано, что в оже-спектрах, полученных из центральной области дендрита, присутствует аргон. Амплитуда соответствующего пика не изменялась после выдержки образца при давлениях $\sim 10^{-9}$ торр в течении трех суток. Это свидетельствует о наличии упорядоченной структуры углерода в центре дендрита. По мере удаления от центра дендрита растет доля аморфного углерода, который уже не способен удерживать атомы аргона. Наличие аргона в центральной части дендритов наблюдалось только в случае их формирования из пропилена. Это связано с более высокой плотностью тока разряда (45 mA/cm^2), чем при формировании дендритов из стирола (25 mA/cm^2), акрилонитрила (28 mA/cm^2), метилметакрилата (35 mA/cm^2).

ЛИТЕРАТУРА

1. М.П.Данилаев, Е.А.Богослов, Ю.Е.Польский, А.Р.Насыбуллин, М.С.Пудовкин, А.Р.Хадиев Структура углеродных дендритов, полученных в газовом разряде атмосферного давления// Журнал технической физики, 2017, т.87, вып. 2, с.68-73
2. М.П.Данилаев, Е.А.Богослов, О.Г.Морозов, А.Р.Насыбуллин, Д.М.Пашин, Ю.Е.Польский Получение углеродных дендритов из продуктов переработки полимерных материалов// Инженерно-физический журнал. – 2015. - №2. С.748-753.

СВЕРХГЛАДКАЯ ПОЛИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УСКОРЕННОГО ИОННО-КЛАСТЕРНОГО ПУЧКА АРГОНА

ULTRA-SMOOTH POLISHING THE SURFACE OF MATERIALS BY AN ACCELERATED ARGON CLUSTER ION BEAM

Коробейщиков Н.Г., Роечко М.А., Николаев И.В.

*Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск,
ул. Пирогова, 2, E-mail: korobei@ci.nsu.ru*

Проведено экспериментальное исследование влияния ускоренного ионно-кластерного пучка аргона на морфологию поверхности различных материалов: нержавеющая сталь, плавный кварц. Получены зависимости основных параметров амплитудной (среднеквадратичная шероховатость R_a) и латеральной (функция спектральной плотности шероховатости, PSD) шероховатости от дозы облучения и среднего размера кластеров. Показана возможность получения сверхгладких поверхностей с субнанометровой шероховатостью.

An experimental investigation of the effect of accelerated argon cluster ion beam on the surface morphology of various materials (stainless steel, fused quartz) has been carried out. The dependencies of the main parameters of the amplitude (root-mean-square roughness, R_a) and lateral (the function of the spectral density of roughness, PSD) roughness on the irradiation dose and the average cluster size were obtained. The possibility of obtaining super-smooth surface with subnanometer roughness is shown.

В последнее десятилетие было показано, что, по сравнению с традиционными ионными пучками, пучки высокоэнергетичных газовых кластерных ионов обладают уникальными преимуществами для исследования и модификации поверхности материалов [1]. В данной работе выполнены экспериментальные исследования изменения морфологии поверхности нержавеющей стали и плавленого кварца при обработке кластерами аргона с различными средними размерами $N=150\div 1200$ атомов/кластер и энергией $E_{\text{clust}}=5\div 25$ кэВ, сформированных газоструйным методом [2]. Параметры поверхности до и после облучения разными дозами измерялись с использованием атомно-силовой микроскопии. Зарегистрировано значительное понижение шероховатости поверхности на различных пространственных частотах. Определены коэффициенты распыления кластерами SiO_2 . Показано, что обработка материалов ускоренным ионно-кластерным пучком позволяет получать сверхгладкие поверхности с шероховатостью до 0,5 нм. Минимальная достижимая шероховатость ограничивается физико-химической анизотропией обрабатываемого материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 11.1402.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Yamada, e.a. *Curr. Opin. Solid St. Mat. Sci.* **19** (2015) 12.
2. N.G. Korobeishchikov, e.a. *Vacuum* **119** (2015) 256.

SYNTHESIS OF ULTRADISPERSE CDO POWDERS IN A PLASMA-SOLUTION SYSTEM

Rybkina V.V., Shutov D.A., Ivanov A.A., Smirnova K.V., Gromov M.V.

ISUCT, Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Ave. 7, E-mail: smirnovakv1@gmail.com

Abstract: Ultrafine powders of cadmium oxide were obtained from the plasma-solution system. The powders obtained were examined with SEM, XRF, and TGA.

CdO are widely used in electronics and it has prospects in the future. One of the promising methods of obtaining this substance is plasma-solution synthesis.

A method for the synthesis of CdO powders using a plasma-solution system is proposed. Aqueous solutions of $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ with a concentration of 0.05 mol/l, a volume of 200ml were placed in an H-shaped glass cell. The voltage on the titanium electrodes located above the solution was sufficient to ignite the discharge. The discharge current was 40 mA, the discharge burning time was 10min. At the action of a discharge in the anode part of the cell a suspension (hereinafter precursor A) is formed and precipitation of deposit (precursor B). The synthesized powder was taken separately from the bottom and from the near-surface layer, centrifuged and dried at a temperature of 60°C for 24 hours.

X-ray was carried out using a DRON 3M X-ray diffractometer (CuK α radiation). On the basis of these data the quantitative phase composition of the powders were determined. Thermogravimetric (TGA) analysis and scanning differential calorimetry were used to study samples. Analyzes were performed on a STA 449 F1 Jupiter (Netzsch, Germany) instrument in the temperature range of (30-600)°C at a heating rate of 5°C/min. The surface images of the powders and their EDX were obtained with a SEM Tescan VEGA3.

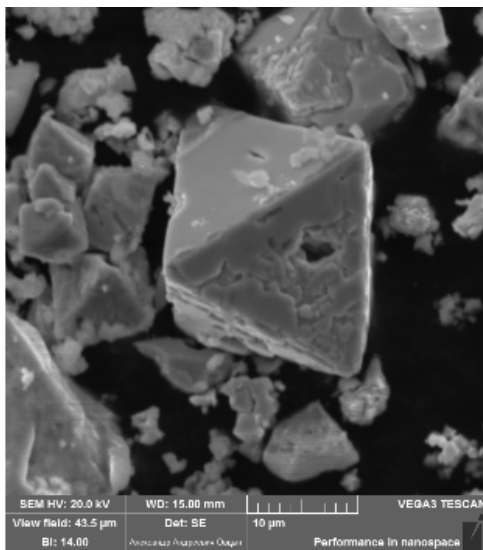


Fig. 1. Images of SEM CdO (precursor-A after calcination).

structures of CdO are clearly visible (Fig. 1).

Given study was carry out at financial support of RF Ministry of Education and Science (project 3.137171/ПЧ)

X-ray showed the presence of a large number of reflexes indicating the crystallinity of synthesized substances. The composition of precursor A and B is different. The composition of A is: $\text{Cd}(\text{OH})(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 38.2%, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ – 50%, $\text{Cd}_3(\text{OH})_5(\text{NO}_3)$ – 11.8%. The composition of B is: $\text{Cd}(\text{OH})(\text{NO}_3) \text{H}_2\text{O}$ – 34.2%, $\text{Cd}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 53.5%, $\text{Cd}_3(\text{OH})_5(\text{NO}_3)$ – 12.3%. The TGA and DTG confirm that A and B differ in composition. DTG after calcination demonstrates the absence of extremums, that is, we are dealing with a stable anhydrous compound. Annealing A and B at 500°C for 2 hours leads to the formation of CdO powders. In the Images of the powders obtained after calcination, crystal

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ЧАСТИЦ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

STRUCTURE AND PROPERTIES OF PARTICLES DRAINED FROM ARC DISCHARGE

Смоланов Н. А.

ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва"

Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68, 430005

E-mail.: smolanovna@yandex.ru

Аннотация. Исследованы осажденные частицы и пленки из плазмы дугового разряда. Пленки и порошки обладают свойствами нанокристаллических материалов. Рассмотрены возможные механизмы их образования.

Abstract. Precipitated particles and films from an arc discharge plasma are investigated. Films and powders have the properties of nanocrystalline materials. Possible mechanisms of their formation are considered.

Частицы из катодного пятна в дуговом разряде дают информацию о процессах их взаимодействия в плазме [1-2]. Кроме того, неравновесные условия получения приводят к образованию новых соединений и структур, в том числе нанокристаллических размеров. В работе приведены данные о структуре и свойствах таких частиц, осажденных вблизи катода и на подложке в виде тонких пленок, а также стенках вакуумной камеры. Особое внимание уделено поведению капельной фракции плазмы и ее взаимодействию с азотом и ацетиленом в межэлектродном пространстве в присутствии электрического и магнитного полей. В структурах материала, осажденного на стенках вакуумной камеры дугового разряда (установка ННВ-6), нами были обнаружены частицы, неизвестных в базах данных ASTM структур. Кроме того, одна из полученных фаз соответствует точечной пространственной группе $Fd\bar{3}m$ (алмаз).

Для исследования структур и свойств микрочастиц и пленок был использован комплекс методов и оборудования. Это дифрактометры ДРОН-6 и Necus S3-MICRO, электронный микроскоп Quanta 200 i 3D FEI, анализатор размеров частиц Shimadzu SALD – 3101, анализатор TGA/SDTA851e, инфракрасный спектрофотометр IRAffinity-1, ЭПР - спектрометр PS 100.X. Магнитные свойства исследовались при комнатной и азотной температурах. Это дало возможность в полной мере изучить строение и свойства полученного материала [3].

ЛИТЕРАТУРА

3. Anders A. *Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation*. Berkeley: Springer Science, 2008. 540 p.
4. Любимов Г.А., Раховский В.И., *УФН*. **125** (1978) 665.
5. N.A.Smolanov. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. **11** (2017) 353.

СИНТЕЗ N-ДОПИРОВАННЫХ ГРАФЕНОВ В ПЛАЗМОСТРУЙНОМ РЕАКТОРЕ

ONE-STEP SYNTHESIS OF N-DOPED GRAPHENE IN A PLASMA JET REACTOR

Шавелкина М.Б.¹, Амиров Р.Х.¹, Канашенко С.Л.², Наумкин А.Н.³,
Вахитов И.Р.⁴, Гумаров А.И.⁴, Янилкин И.В.⁴, Тагиров Л.Р.⁴
¹Shavelkina M.B., ¹Amirov R.Kh., ²Kanashenko S.L., ³Naumkin A.N.,
⁴Vakhitov I.R., ⁴Gumarov A.I., ⁴Yanilkin I.V., ⁴Tagirov L.R.

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, Ул. Ижорская 13, строение 2, e-mail: mshavelkina@gmail.com

² Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича, Россия, 119121, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр.8, e-mail: serkanash@mail.ru

³ Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова РАН, Россия, 119991, ГСП-1, Москва, 119334, ул. Вавилова, 28. e-mail: naumkin@ineos.ac.ru

⁴ Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия 420008, Казань, ул. Кремлевская, 16а. e-mail: iskvakhitov@gmail.com

Исследована возможность контроля легирования графена азотом при его синтезе в плазмоструйном реакторе. С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показано, что при разложении углеводородов (пропан-бутановой смеси, метана, ацетилена) в струе азотной плазмы в графеновых структурах образуются различные связи C-N, которые вносят структурную неустойчивость.

The possibility of controlling doping of graphene with nitrogen during its synthesis in a plasma jet reactor has been studied. Using X-ray photoelectron spectroscopy, it has been shown that in the decomposition of hydrocarbons (propane-butane mixture, methane, acetylene) in a jet of nitrogen plasma, different C-N bonds are formed in graphene structures, and they introduce structural instability.

Плазменная обработка является одним из простых способов структурирования графена. Проведенное с помощью плазмы химическое легирование является эффективным способом приготовления графена с контролируруемыми оптическими, химическими и электронными свойствами. При функциональной модификации графена азотом могут быть сформированы участки с высокой каталитической активностью, что важно для различных применений в области энергетики. Основная цель настоящей работы – определение экспериментальных условий, при которых происходит образование связей C-N с заданными относительными концентрациями. Идентификация химических связей осуществлялась методом РФЭС основных уровней, валентной зоны и оже-спектроскопии с рентгеновским возбуждением. На основании анализа спектров, полученных в безазотной атмосфере и в азотной плазме при 350 торр, определены степень sp^2 -гибридизации и функционализации графеновых структур. Это позволяет установить корреляцию оптимальных условий синтеза графенов с их структурой. Показана избирательность и управляемость плазменных технологий для крупномасштабной быстрой функционализации графена для современных применений.

СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК Pd_{1-x}Fe_x, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

MAGNETIC PROPERTIES OF Pd_{1-x}Fe_x THIN FILMS SYNTHESIZED BY MAGNETRON SPUTTERING AND MOLECULAR BEAM EPITAXY

A. Esmaeili¹, Н.П. Никитин¹, И.В. Янилкин¹, И.Р. Вахитов¹, А.И. Гумаров¹,
М.Н. Алиев³, Р.В. Юсупов¹, Л.Р. Тагиров^{1,2,4}

¹Казанский федеральный университет, 420008 Казань, ул. Кремлевская 18

²Казанский физико-технический институт РАН, 420029 Казань, ул. Сибирский тракт 10/7

³Baku State University, Z. Khalilov 23, AZ- 1148 Baku, Azerbaijan

⁴Институт перспективных исследований АН РТ, 420111 Казань, ул. Левобулачная 36А
yanilkin-igor@yandex.ru

Сверхтонкие (20 нм) пленки сплава палладий-железо Pd_{1-x}Fe_x (x=0.01-0.2) были выращены методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) и магнетронного ко-испарения (MS) мишеней из палладия и железа в сверхвысоковакуумной установке (SPECS, BESTEC). В качестве подложек использовались монокристаллы кремния и оксида магния. Установлено, что намагниченность и температура Кюри пленок систематически возрастают с увеличением в них концентрации железа.

Ultrathin (20 nm) Pd_{1-x}Fe_x films with x = 0.01 - 0.2 were synthesized by means of the molecular beam epitaxy (MBE) and magnetron sputtering (MS) techniques under ultra-high vacuum conditions (SPECS, BESTEC). Magnesium oxide (MgO) and silicon single crystals were used as the substrates for MBE and MS depositions, respectively. It was found that the magnetization and Curie temperature of the films grew systematically with an increase of iron concentration.

Для исследования кристалличности поверхности подложек и пленок использовалась методика дифракции медленных электронов (SPECS Er-LEED-3000-D). Содержание Fe в синтезированных сплавах определялось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС, SPECS), толщина пленок контролировалась стилусным профилометром *Dektak XT* (BRUKER). Исследования магнитных свойств образцов проводились на вибрационном магнетометре (Quantum Design PPMS-9) в диапазоне температур 2.5-300 К.

Коэрцитивное поле эпитаксиальных пленок, полученных методом МВЕ, в несколько раз меньше по сравнению с пленками, полученными методом MS. Низкотемпературные магнитные измерения (при 5К) эпитаксиально-выращенных пленок показали значение коэрцитивного поля равное 7 эрстед.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (14-02-00793_a) и ФЦКП ФХИ КФУ.

УПОРЯДОЧЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ МИКРОЧАСТИЦ В ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ С КОРОНИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

ORDERED STRUCTURES OF MICROPARTICLES IN THE LINEAR ELECTRODYNAMIC TRAP WITH THE CORONA DISCHARGE

Владимиров В.И., Василяк Л.М., Депутатова Л.В., Лапицкий Д.С.,
Печеркин В.Я., Сыроватка Р.А., Филинов В.С.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Россия, 125412,
vld@ihed.ras.ru*

В работе впервые продемонстрирована возможность удержания частиц в электродинамической ловушке с коронирующими электродами. Незаряженные частицы Al_2O_3 инжектировались в электродинамическую ловушку, где захватывались и удерживались в течении продолжительного времени. Концентрация ионов в ловушке составляла порядка 10^7 см^{-3} .

The possibility of confinement of microparticles in the linear electrodynamic trap with the corona discharge was demonstrated for the first time. Uncharged Al_2O_3 particles were injected into the trap, where they were confined for a long time. The concentration of the ions in the trap was about 10^7 см^{-3} .

В работе исследовалась возможность удержания частиц микронного размера в линейной электродинамической ловушке с коронирующими электродами. Ловушка состояла из четырех электродов из вольфрамовой проволоки диаметром 300 мкм и длиной 10 см. Расстояние между соседними электродами составляло 1 см. На электроды ловушки подавалось переменное напряжение. Коронный разряд зажигался при амплитудном значении напряжения $U_A = 5 \text{ кВ}$. Частота переменного напряжения $f = 50 \text{ Гц}$. Концентрация ионов в области ловушки составляла порядка 10^7 см^{-3} .

Незаряженный полидисперсный порошок Al_2O_3 инжектировался в ловушку с верхней стороны. Кулоновская структура, состоящая примерно из пятидесяти частиц, удерживались области оси симметрии ловушки (рисунок 1).

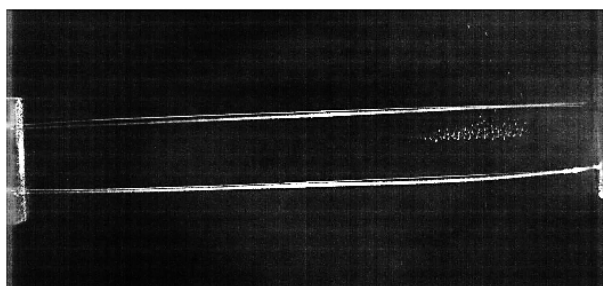


Рисунок 1. Кулоновская структура в электродинамической ловушке с коронирующими электродами. $U_A = 6 \text{ кВ}$.

В работе впервые была продемонстрирована возможность удержания частиц в электродинамической ловушке с коронирующими электродами.

ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ

PLASMA SYNTHESIS OF NANOMATERIALS

Попов В.Е., Дудник Ю. Д., Забоева Е.А., Изотова С. Г., Кузнецов В.Е.,
Мартинсон К. Д., Наконечный Г. В., Образцов Н.В., Попков В. И., Сербя Е. О.,
Субботин Д. И.

Институт Электрофизики и электроэнергетики РАН, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург 191186, Россия, vld.kuznetsov@gmail.com

В докладе рассмотрен синтез магнетита из водного раствора нитрата железа III с использованием однофазного воздушного плазмотрона переменного тока

The report considers the synthesis of magnetite from an aqueous solution of iron nitrate III using a single-phase AC plasma torch

Наноматериалы активно применяются в химической, атомной промышленности, в электронике и других сферах. Традиционно они получают различными низкотемпературными химическими или физико-химическими методами. Однако в настоящее время возрос интерес к плазменным методам [1] [2], т.к. они позволяют производить тонкодисперсные порошки в непрерывном цикле.

В работе рассматривается термическое разложение нитрата железа III при нагреве его с помощью воздушной плазмы, полученной в высоковольтном плазмотроне переменного тока. Плазма смешивается с диспергированным раствором нитрата железа при температуре от 600 до 1500 К, полученные частицы собирались на охлаждаемой металлической поверхности. Состав частиц определен энергодисперсионным анализом представлен в таблице.

Таблица Состав полученного материала

Элемент	Мольная доля, %
O	58,43
Cr	0,77
Fe	39,39
Ni	0,49
Cu	0,92

Из таблицы видно, что мольное соотношение O/Fe~1.5, что свидетельствует об образовании оксида железа III. Кроме того частицы проявляют магнитные свойства, характерные для магнетита.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Farbod, A. Movahed, I. Kazeminezhad. *Materials Letters*. **89** (2012) 140.
2. A.R. Mohammadian, S. Hajarpour, Kh. Gheisari, M. Farbod. *Materials Letters* **133** (2014) 91.

**ОЧИСТКА ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ ГАЗОВ В
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ**
**CLEANING OF HETEROGENEOUS GAS FLOWS IN GAS DYNAMIC
ELECTROFILTER**

Лелевкин В.М., Богданов А.С., Токарев А.В., Виноградов В.В.

*Кыргызско - Российский Славянский Университет им. Б.Н.Ельцина, 720000,
Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская, 44, dedushka79@mail.ru*

Рассматривается технология извлечения нано-размерного золота из продуктов горения угля Кара-Кече. Приведено общее описание процессов: подготовки угля к экспериментам, метода искусственного введения нано-размерного золота в его состав, температурные и временные характеристики горения, устройство и работа экспериментальной установки, процесс газоочистки потока газа.

The technology of extraction of nano-sized gold from combustion products of Kara-Keche coal is considered. The general description of the processes: the preparation of coal for experiments, the method of artificial introduction of nano-sized gold into its composition, the temperature and time characteristics of combustion, the design and operation of the experimental setup, the process of gas purification of the gas stream

В настоящее время уголь рассматривается как носитель полезных элементов: редкоземов и платиноидов [1]. Поэтому актуальным является, как установление золотоносности углей, так и разработка технологий извлечения золота из продуктов горения бурых углей на базе современных газоочистительные технологии способных улавливать субмикронные и нано-размерные частицы полезных элементов [2,3].

Целью работы является разработка технологии попутного улавливания, осаждения и химического восстановления золота из продуктов горения бурого угля разреза Кара-Кече. Предварительно измельченный уголь с фракцией 2 – 4 мм и массой 1кг, в состав которого путем оптимального сорбирования, введено нано-размерное золото (0,02 г/кг), сжигается во встречном потоке кислорода. Гетерогенный газовый поток предварительно охлаждается в цилиндрическом теплообменнике и подается в газодинамический электрофильтр. При конденсации усиленной действием коронного разряда продукты горения под действием электрического поля оседают на внутренней поверхности электрофильтра. Образующийся конденсат содержащий твердые частицы подвергается анализу на содержание золота. По балансу введенного и выделенного золота определяется эффективность технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.И. Гамов, Н.В. Грановская, С.В. Левченко. *Металлы в углях*. Изд. Южный Федеральный Университет, Ростов на дону – 2013, стр. 65.
2. Л.В. Чекалов. *Экотехника*. Ярославль, “Русь”, 2004, 424 стр.
3. А.В. Токарев. *Коронный разряд и его применение*, Изд. КРСУ, Бишкек-2009, стр. 42-45.

LAYERED COMPOSITE STRUCTURES SYNTHESIS β -SiC - DIAMOND BY MICROWAVE PLASMA CVD IN H_2 - CH_4 - SiH_4 GAS MIXTURES

Martyanov A.K., Sedov V.S., Ralchenko V.G., Khomich A.A.

General Physics Institute RAS, Russia, Moscow, Vavilov Str., 38, art.martyanov@gmail.com

In this work we present the synthesis of a composite structure: diamond on a cubic polytype silicon carbide layer (β -SiC).

Diamond is widely used in electronics, optics, biology and medicine [1]. Silicon impurities in diamond tend to form «silicon-vacancy» color centers (SiV), which can be used for optical biomarkers in medicine and single photons sources in quantum optics [2]. Higher concentrations of silicon allow the formation silicon carbide (SiC), which has excellent semiconducting properties for high temperature applications. Formation of a composite material «Diamond – SiC» is an important task for electronics and quantum optics.

Single crystalline silicon substrate (100) was spin-coated with diamond nanoparticles. Diamond growth was performed with chemical vapor deposition technique in a microwave reactor ARDIS-100 (2.45 GHz) in the "methane-hydrogen-silane" mixtures at flow ratio SiH_4 / CH_4 from 0 % to 50 %. The change in the growth regime allowed us to first obtain a layer of β -SiC with individual crystallites of diamond, and then a layer of solid diamond (Fig.1a).

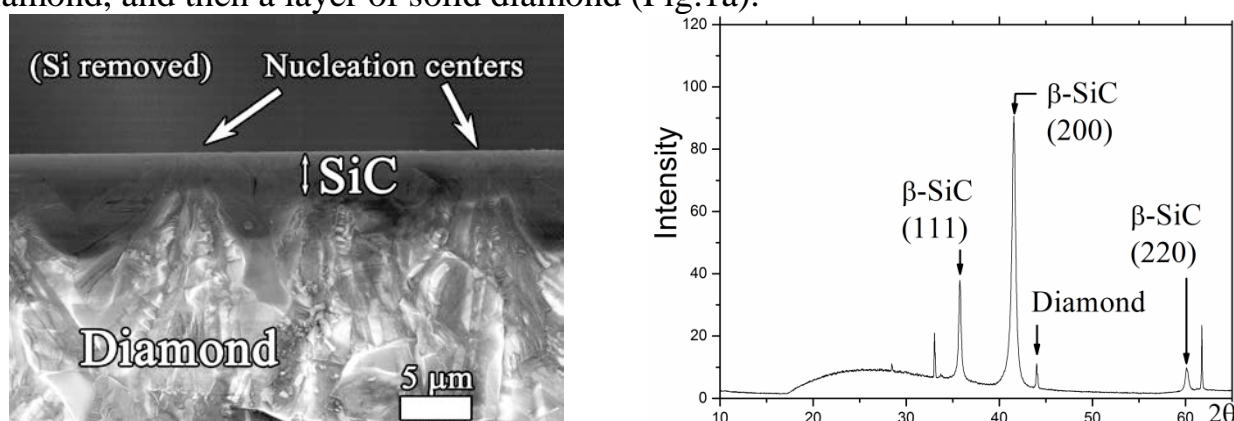


Fig. 1 (a, b). (a) SEM images chip of the sample: the composite structure of " β -SiC-diamond"; (b) Diffractogram of the composite " β -SiC-diamond".

This study was supported by the RFBR (grants № 14-02-31772_mol_a and 15-52-04073_Bel_mol), BRFFR (grants No. F15RM-046) and the grant of the President of the Russian Federation (No. SP-2575.2015.5).

REFERENCES

1. R. S. Sussmann. *CVD diamond for electronic devices and sensors*. John Wiley & Sons, 2009.
2. V.S. Sedov et al. *Growth of Si-Doped Polycrystalline Diamond Films on AlN Substrates by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition*. Journal of Coating Science and Technology. **2** (2015) 38.

ELECTRICAL PROPERTIES OF TITANIUM NITRIDE FILMS SYNTHESIZED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING

Mohammed W.M., Gumarov A.I., Vakhitov I.R., Yanilkin I.V.,

Nikitin S.I., Tagirov L.R., Yusupov R.V.

Kazan Federal University, Kremlevskaya str. 16a, 420008 Kazan, Russia

e-mail: waelmohammed88@yahoo.com

A use of the four-probe resistance measurements as a tool for characterization of a quality of titanium nitride thin films deposited by the reactive dc magnetron sputtering will be discussed in the report. Few series of ~ 50 nm thick films on various substrates as fused silica, monocrystalline silicon and magnesium oxide have been deposited with several degrees of freedom (substrate temperature, magnetron chamber atmosphere and working pressure etc.) varied in a wide range. Electrical resistivity correlation with the films properties will be reported.

Titanium nitride (TiN) is a material that for a long time is used in many technological, medical and scientific fields due to its outstanding properties. Recently, it has been found that TiN thin films may serve also as the plasmonic materials that can hold the temperatures much higher than the classic plasmonic elementary compounds like gold, silver or copper [1].

Titanium nitride (TiN) films were deposited by the reactive dc magnetron sputtering with the power of 150 W on the cleaned silicon, fused silica and crystalline magnesium oxide substrates at room temperature. Titanium metal target with a purity of 99.99% was used for deposition. Before the deposition the pressure was set to $5 \cdot 10^{-3}$ mbar inside the chamber with argon and nitrogen gas partial pressures of Ar: N₂ = 0:10, 2:8, 4:6, 6:4 and 8:2. The film compositions were tested with X-ray photoemission spectroscopy both before the samples were taken out of the deposition setup and after leaving them for some time in the air.

The resistivity measurements were performed using the van der Pauw four-point probe system. One of the problems that had to be solved was a development of the way to create the resistive connection which was not the case for, e.g., aluminium or gold wire ultrasound bonding. We have found that the best choice is the indium/gallium alloy.

Results of the correlation study between the structure, composition, deposition conditions with the resistivity value of the films will be reported and discussed.

REFERENCES

1. G.V. Naik et al. *Optical Materials Express* **2** (2012) 478.

**ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА,
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ МАГНЕТРОННОЙ
РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**
**PLASMA MODIFICATION OF SILVER NANOPARTICLES PRODUCED BY
GAS AGGREGATION CLUSTER SOURCE**

Никитин Д.И.^{1,2}, Титов В.А.¹, Шукуров А.Л.², Вайдулич М.², Гануш Я.²,
Веселы Й.², Бидерман Х.²

¹ ИХР РАН, ул. Академическая 1, Иваново, Россия, 153045 daniilnikitin92@gmail.com

² Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, V Holesovickach 2, Prague 8, Czech Republic, 18000

Сферические наночастицы серебра были получены при помощи источника, основанного на магнетронном распылении. В результате плазмохимического окисления получены наночастицы оксида серебра меньшего диаметра. Образцы охарактеризованы при помощи спектrophотометрии и РФЭС.

Spherical nanoparticles of metallic silver were produced by gas aggregation cluster source. Silver oxide nanoparticles of lower diameter were synthesized by plasma oxidation. Samples were characterized by UV-Vis spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy.

Высокая антибактериальная активность наночастиц серебра определяет перспективы их биомедицинских приложений. Важной характеристикой является выход ионов серебра, которые разрушают клеточную мембрану бактерий. Увеличить выход ионов и эффективность действия наночастиц можно, заменив металлическое серебро на его оксид. Хаберланд разработал источник, основанный на магнетронном распылении металлической мишени с последующей агрегацией наночастиц в атмосфере охлаждённого инертного газа (gas aggregation cluster source, GAS). Эта технология обеспечивает высокие скорости осаждения с достаточно однородным распределением частиц по размерам. Цель данной работы - получение наночастиц серебра в источнике Хаберланда с их последующим окислением и дальнейшей характеристикой. Использованный источник подробно описан в [1]. Магнетронное распыление производили на постоянном токе 150 мА при давлении аргона 100 Па. На подложках из стекла и кремния (1×1 см²) осаждались сферические наночастицы серебра со средним диаметром 25 нм. Окисление в плазме кислорода (ВЧ-разряд, мощность 15 Вт, давление 2,5 Па) приводило к уменьшению среднего диаметра частиц до <10 нм. При этом исчезал характерный пик плазмонного резонанса на 337 нм в спектре поглощения. Смещение в сторону большей энергии связи пика Ag 3d_{3/2} в РФЭС-спектре также свидетельствует об образовании оксида. Структура наночастиц меняется с поли- на монокристаллическую, что может говорить о повторном распылении с самоорганизацией в малые кластеры.

БЛАГОДАРНОСТИ

The study was supported by the Charles University, project GA UK No. 1186217.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Vaidulych, J. Hanush. *WDS'15 Proceedings of Contributed Papers*. (2015) 77-83.

**СТЕЛЮЩИЙСЯ РАЗРЯД В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ
НАНОМАТЕРИАЛОВ
DISCHARGE CREEPING ALONG THE SURFACE IN THE PROCESS FOR
PRODUCING NANOMATERIALS**

Тимеркаев Б.А.¹, Софроницкий А.О.^{1,2}, Андреева А.А.^{1,2}

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

²*Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань, 420008, ул. Кремлевская, 18.
E-mail: artempic8@mail.ru*

Аннотация: В данной работе предложен новый принцип сборки углеродных наночастиц в плазме стелющегося по поверхности тлеющего разряда.

Abstract: In this paper, we propose a new principle of assembling carbon nanoparticles in the plasma of a glow discharge creeping along the surface.

Организация взаимодействия тлеющего разряда с диэлектрическими жидкостями вызывает определенные трудности, связанные с тем, что плазма тлеющего разряда всегда отклоняется вверх, а жидкость всегда находится внизу. Поэтому должна присутствовать сила другой природы, которая превосходит силу Архимеда и прижимает плазму к поверхности жидкости. В качестве такой силы может выступить сила Ампера, которая действует на ток тлеющего разряда в магнитном поле. При наличии магнитного поля соответствующего направления, плазма тлеющего разряда может быть прижата к поверхности жидкости. Так как направления движения электронов и ионов в плазме тлеющего разряда противоположны, то направления действия на них силы Лоренца будут иметь одно и то же направление. Разряд будет стелиться у поверхности. В работе изучены характеристики такого разряда, которого мы назвали «стелющимся по поверхности разрядом».

В работе так же предложен новый принцип сборки углеродных наночастиц в плазме стелющегося тлеющего разряда. Электроны, ускоренные в сильном электрическом поле и направленные за счет действия силы Лоренца к поверхности углеводородного сырья, способны разбивать молекулы углеводородов на составные элементы. Таким образом, после воздействия высокоэнергетичными электронами на молекулы жидких углеводородов появляются как атомарный углерод, водород, а также большое многообразие результатов их синтеза. В том числе летучие и легкие углеводороды. Пробираясь сквозь плазму тлеющего разряда они и дальше подвергаются бомбардировке электронами, обогащая элементный состав продуктов разложения углеводородов. В то же время атомы углерода в тлеющем разряде приобретают заряд и направляются к электродам, где, в основном, и происходит синтез углеродных наноматериалов.

Проведенные исследования полученных углеродистых образований масс спектроскопическим методом и методом ИКС показали наличие в образовавшейся саже фуллеренов C₆₀, C₇₀ и высших фуллеренов.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

PRESSURE WAVE FORMATION BY PULSED DISCHARGE FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

Снетов В.Н., Пинчук М.Э., Коликов В.А., Лекс А.Г., Субботин Д.И.

Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук (ИЭЭ РАН)
Россия, 191186, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург,
E-mail: pinchme@mail.ru

Определены оптимальные параметры электрических импульсов и генерируемых ими ударных волн для «мягкого» разрушения оболочек вирусов и дрожжей без нарушения структуры антигенных поверхностных белков и морфологии самих клеток для использования их при производстве антивирусных вакцин и в биотехнологии. Исследованы импульсные электрические разряды в воде, различающиеся амплитудой, длительностью и скоростью нарастания тока.

Parameters of electric pulsed discharge has been determined for the "soft" breaking the shells of viruses and yeasts without disturbing the structure of the antigenic surface proteins and morphology of the cells themselves for manufacture of antiviral vaccines. Pulsed discharges in water was researched with different current amplitudes, pulse duration and current rise of rate.

Возможной областью применения импульсного электрического разряда в воде, как источника ударных волн [1], может стать биотехнология [2], для «мягкого» разрушения оболочек вирусов и дрожжей без нарушения структуры антигенных поверхностных белков и морфологии самих клеток для использования их при производстве антивирусных вакцин. Достоинствами данного метода являются непрерывность процесса разрушения, отсутствие химических загрязнителей. Представлены исследования импульсных электрических разрядов в воде, различающиеся амплитудой, длительностью и скоростью нарастания тока с относительно малым энерговыделением (~1 Дж). Согласно [3] для разрушения оболочки вируса градиент давления должен составлять $\sim 3 \times 10^{13}$ Па/м, что соответствует механическому напряжению в стенке оболочки вируса $\sim 3 \times 10^7$ Па. Интенсивность УВ, образующихся в процессе расширения канала разряда, зависит от скорости нарастания импульса тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ph.G.Rutberg, M.E.Pinchuk, V.A.Kolikov et al. *J. Phys.: Conf. Ser.* **406** (2012) 012034
2. V.Kolikov, Ph.Rutberg, *Pulsed Electric Discharges for Medicine and Biology. Techniques, Processes, Application.* Springer, 2015.
3. S.Li, *Atomic force microscopy study on the mechanics of influenza viruses and liposomes.* Dissertation for the award of the degree "Doctor rerum naturalium", Gottingen, 2012.

МАЛОБЮДЖЕТНЫЕ СВЧ ПЛАЗМОТРОНЫ ДЛЯ НАУКИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

THE LOW-COST MICROWAVE-PLASMA SOURCES FOR SCIENCE AND INDUSTRY APPLICATIONS

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

Всероссийский научно-исследовательский институт радиационной агроэкологии, 249032, Россия, Калужская обл., г.Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, v.n.tihonov@yandex.ru

Мы отошли от классической схемы микроволнового плазмотрона и максимально упростили конструкцию волноводного тракта. В сочетании с малобюджетным генератором можем поставлять источники микроволновой плазмы по цене от 150 тыс.руб.

We have changed the classical scheme of the microwave plasmathrone and optimised design of the waveguide channel. Therefor in combination with low cost generator, we can supply microwave plasma sources at price from \$2700.

Предлагаемые на мировом рынке микроволновые плазмотроны построены по так называемой классической схеме: блок питания магнетрона – магнетрон–циркулятор с поглощающей нагрузкой – измеритель падающей/отраженной волны – устройство согласования – собственно плазмотрон – устройство подстройки. При этом суммарная стоимость только трех позиций из этого перечня, а именно: устройства согласования, направленного ответвителя и циркулятора с нагрузкой, в исполнении, например, фирмы UIY Tecnology Co., Ltd, China, составляет порядка \$7800.

Продолжая и развивая принцип минимальной бюджетности наших разработок, мы оптимизировали классическую схему, оставив только самые необходимые компоненты: блок питания – магнетрон – волноводный тракт – плазмотрон – водяная нагрузка и максимально упростили конструкцию самого волноводного тракта. Последний представляет собой неразборную цельносварную конструкцию из нержавеющей стали на основе стандартного прямоугольного профиля 100*50*2 мм. В результате мы можем осуществлять поставку простых и надежных источников микроволновой плазмы (в комплекте с нашим малобюджетным СВЧ генератором [1] мощностью до 3 кВт и простым плазмотроном атмосферного давления) по цене от 150 тыс.руб. (~\$2700).

В настоящее время мы поставляем наши СВЧ плазменные установки с плазмотронами, построенными на базе стандартных резьбовых фитингов для металлических трубопроводов. Наличие их в широкой продаже, по весьма доступной цене и в огромном ассортименте позволяет достаточно легко подобрать конфигурацию завихрителя под конкретную задачу. В ходе работы пользователь вполне может сам, на основании накапливаемого опыта, совершенствовать и оптимизировать конструкцию своего СВЧ плазмотрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов В.Н., Иванов И.А., Крюков А.Е., Тихонов А.В. // Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов. *Прикладная физика*, 2015, № 5, С.102-106.

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

MODIFICATION OF SURFACE PROPERTIES OF ULTRAHIGH-MOLECULAR-WEIGHT POLYETHYLENE FILMS BY DIRECT CURRENT DISCHARGE

Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.А., Озерин А.Н.

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Россия,
117393, Москва, Профсоюзная ул. 70
E-mail: mikhailpiskarev@gmail.com*

Рассмотрены методы модифицирования поверхности и изменение свойств пленок сверхвысокомолекулярного полиэтилена в низкотемпературной плазме. Приведены экспериментальные результаты, полученные для пленок полимера после обработки в разряде постоянного тока.

The methods of surface modification and changes in film properties of ultrahigh-molecular-weight polyethylene by low-temperature plasma are considered. The experimental results obtained for the polymer films after direct current discharge treatment are given.

В работе рассмотрены основные методики модифицирования пленок сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с использованием низкотемпературной плазмы, а также методы изучения изменения контактных и адгезионных свойств, состава и структуры поверхности [1].

Проведены экспериментальные исследования процесса модификации пленок СВМПЭ в разряде постоянного тока пониженного давления на установке и согласно методике, описанной авторами ранее [2]. В работе использовали пленки отечественного СВМПЭ толщиной 100 мкм. Изучены кинетические закономерности изменения величины краевого угла смачивания пленок от времени обработки в плазме и тока разряда. На основании полученных результатов проведены расчеты полной поверхностной энергии, полярного и дисперсионного компонентов. Существенное улучшение адгезионных свойств установлено с помощью разработанного авторами метода Т-теста с лентой Scotch®810 [3] и с различными адгезивами по стандарту ASTM 1876-01. Изменения химической структуры пленок и морфологии поверхности показаны с использованием методов Фурье-ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Б. Гильман, М.С. Пискарев, А.А. Кузнецов, А.Н. Озерин. *Химия высоких энергий*. **51** (2017) 147.
2. T. Demina, D. Zaytseva-Zotova, A. Gilman, T. Akopova, E. Markvicheva, A. Zelenetskii. *Surf. Coat. Techn.* **207** (2012) 508.
3. М.Ю. Яблоков, А.С. Кечекьян, С.Л. Баженов, А.Б. Гильман, М.С. Пискарев, А.А. Кузнецов. *Химия высоких энергий*. **43** (2009) 569.

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ АТОМИЗАТОР ДЛЯ ОБЕССЕРИВАНИЯ ВЫСОКОСЕРНИСТОЙ НЕФТИ

GAS-DISCHARGE PULVERIZER FOR DESULPHURATION OF HIGH- SULPHUROUS NAPHTHA

Саубанов Руз.Р., Карих Ф.Г., Вахитов Р.Ф., Саубанов Русл.Р., Батталова Л.Ф.

Казанский федеральный университет, saubanov@mail.ru

В основе исследования по очистки нефти от серы используется эффект активного взаимодействия атомов серы с атомами алюминия, получаемыми в плазменном атомизаторе в защитной газовой среде реактора.

At the heart of a research on oil refining from sulfur the effect of the fissile interaction of atoms of sulfur with the aluminum atoms received in a plasma pulverizer in a shielding gaseous fluid of the reactor is used.

Атомизированный в газовой защитной среде пары алюминия транспортируется создаваемым потоком газа в основной реактор, представляющей собой цилиндрическую камеру роторным устройством в виде шнека. Высокосернистый нефть смачивается в реакторе и вступает в химическую реакцию с ионами алюминия диффузионно проникающий в нефтяную плёнку.

Проблема освобождения паров алюминия от окисной плёнки, наличие которой не позволяет эффективно реализовать реакцию соединения алюминия с серой не решена. В качестве меры эффективности получения сульфида алюминия, использована степень помутнения нефти, скорость подачи которой осуществляют синхронно со скоростью подачи электродов, учитывая величину концентрации серы в нефти [1-3].



Рисунок 1 – Структурная схема десульфуризатора нефтепродуктов

Вывод. Данный способ позволяет очищать высокосернистый нефть от серы без применения дорогостоящих катализаторов и получать в виде пасты ценный материал с перспективой его использования в качестве присадки к жидким топливам.

Литература.

1. Патент №2000139 РФ. Катализатор для окисления сернистых соединений / А.М. Мазгаров и др. // Бюл. №33. – 1992.
2. Большаков, Г.Ф. Сераорганические соединения нефти. Новосибирск: Наука, 1986. 243с.
3. Харлампыди, Х.Э. Сераорганические соединения нефти, методы очистки и модификации Соросовский образовательный журнал, Том 6, №7, 2000. С.42-46.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ВСЕРОССИЙСКАЯ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)
КОНФЕРЕНЦИЯ
«ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»
ФНТП-2017

Ответственный за выпуск – *Н.Ф. Кашанов*

Компьютерная верстка – *И.И. Файрушин*