Российская академия наук
Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления

Научный совет Российской академии наук по физике низкотемпературной плазмы

ОТЧЕТ
Научного совета за 2020 год

Председатель Научного совета РАН по
физике низкотемпературной плазмы
академик ***В.Е. Фортов***

МОСКВА 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы 3
ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА 3
МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА.....4
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2020 г. 5
Валенсийский политехнический университет (Испания).....5
ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ).....6
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Институт физических исследований и технологий 6
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» 8
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»..11
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ) 12
ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХСРАН) 15
ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) 16
ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН).....21
ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН) 22
ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).....22
ФГБУН Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) 27

ЗАДАЧИ
Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы

- Координация работ в области физики, техники и применений низкотемпературной плазмы.
- Организация и поддержка научных мероприятий в области физики, техники и применений низкотемпературной плазмы.
- Информационное обеспечение специалистов в области физики, техники и применений низкотемпературной плазмы.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА

Одним из важных направлений деятельности Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы является информационное обеспечение специалистов, работающих в области физики, техники и применения низкотемпературной плазмы. Специалисты в области физики, техники и применения низкотемпературной плазмы информируются по электронной почте о международных и российских мероприятиях в этой области. С 2018 года работает и обновляется сайт Научного совета: http://www.ihed.ras.ru/council/

МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА

1. XXXV International Conference on Equations of State for Matter., 1–6 марта 2020 г., п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, Россия.
2. XLVII Международная конференция по физике плазмы и УТС. 16–20 марта 2020 г., г. Звенигород, Московской обл., Россия.
3. XIX Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике. 15–17 сентября 2020 г., Россия, Москва.
4. III Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики». 19–23 октября 2020 г., Национальный исследовательский университет «МЭИ» Россия, Москва.
5. 9-й Международный Симпозиум по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям. 5–9 октября 2020 г., Россия, Сочи.
6. XI Всероссийская конференция по физической электронике (ФЭ-2020). 26–29 октября 2020 г., Россия, Махачкала.
7. Всероссийская (с международным участием) конференция "Физика низкотемпературной плазмы" (ФНТП – 2020). 9–13 ноября 2020 г., Россия, Казань.
8. XII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий». 10–12 ноября 2020 г., Россия, Казань.
9. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», 16–17 декабря 2020 г., Россия, Москва.
10. XII конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение». 16–18 декабря 2020 г., НИЯУ МИФИ, Москва.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2020 г.

Валенсийский политехнический университет (Испания)

Camino de Vera s/n 46022 Valencia) Spain

Департамент прикладной математики

Ткаченко Игорь Михайлович, профессор, д. ф.-м. н, доктор h.c. РАН

Определение динамических свойств неидеальной плазмы методом моментов

Разработанный в 2017 году модифицированный метод моментов [1] применен к исследованию отражательной способности сильно неидеальных кулоновских систем, таких как ударно-сжатая плотная плазма благородных газов [2] и динамических и коллективных свойств классических модельных однокомпонентных систем с кулоновским и юкавовским потенциалами парного межчастичного взаимодействия [3]. Метод основан на классической теории моментов и других точных соотношениях, которым должна удовлетворять диэлектрическая функция системы. Метод позволяет, с автоматическим учетом пяти правил сумм, выразить динамические характеристики системы (динамический структурный фактор, дисперсию и затухание коллективных мод, коэффициент отражения лазерного излучения) исключительно через её статический структурный фактор без привлечения экспериментальных данных. Проведено сравнение с результатами альтернативных теоретических подходов (приближение хаотических фаз, приближение квазилокализованного заряда и др.), удовлетворяющих указанным правилам сумм неполностью. При исследовании отражательной способности ударно-сжатой плазмы использованы формулы Френеля для коэффициентов отражения поляризованного монохроматического излучения от зеркальной поверхности. Получено полуколичественное согласие с реальными экспериментальными данными в отношении зависимости коэффициента отражения от угла падения, причём такое согласие улучшается при сравнении с данными на нулевом угле падения.

Изучение термодинамических свойств неидеальной плазмы

На основе интегрального уравнения жидкости Орнштейна–Цернике для многокомпонентной плазмы проведено исследование электростатического взаимодействия заряженных частиц в пылевой плазме [4]. Для самой неидеальной подсистемы плазмы выполнен переход к однокомпонентному приближению. Показано, что при значениях параметра неидеальности пылевой подсистемы, Γ, меньших единицы, потенциал взаимодействия заряженных частиц плазмы друг с другом достаточно хорошо описывается дебаевским потенциалом с полной постоянной экранирования. При $\Gamma > 1$ статическая диэлектрическая функция в области малых значений волнового числа становится отрицательной и эта область с ростом расширяется. При этом суммарное давление, изохорическая теплоемкость и изотермическая сжимаемость пылевой плазмы во всем исследованном диапазоне параметра неидеальности $\Gamma < 250$ остаются положительными, но изотермическая сжимаемость только пылевой, неидеальной подсистемы при $\Gamma \approx 2$ становится отрицательной.

1. Yu.V. Arkhipov, A. Askaruly, L. Conde, A.E. Davletov, Z. Donkó, D.Yu. Dubovtsev, P. Hartman, I. Korolov, And I.M. Tkachenko, Direct determination of dynamic properties of Coulomb and Yukawa classical one-component plasmas // Phys. Rev. Lett., **119** (2017) 045001. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.045001.
2. Ю. В. Архипов, Д. Ю. Дубовцев, С. А. Сызганбаева, И. М. Ткаченко, “Оптические свойства плотной плазмы”, Физика плазмы, **46**, 78–83 (2020). doi: 10.1134/S1063780X20010018.
3. Yu. V. Arkhipov, A. Ashikbayeva, A. Askaruly, A. E. Davletov, D. Yu. Dubovtsev, Kh. S. Santybayev, S. A. Syzganbayeva, L. Conde, I. M. Tkachenko, “Dynamic characteristics of

three-dimensional strongly coupled plasmas", Phys. Rev. E **102**, 053215 (2020). https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.053215
4. A.V. Filippov, V.E. Fortov, V.V. Reshetniak, A.N. Starostin, I.M. Tkachenko, "Electrostatic interactions and stability of dusty plasmas and the multicomponent Ornstein–Zernike equation", AIP Advances **10**, 045232 (2020); https://doi.org/10.1063/1.5144901.A.B.
5. Филиппов, В.В. Решетняк, А.Н. Старостин, И.М. Ткаченко, В.Е. Фортов, Исследование пылевой плазмы на основе интегрального уравнения Орнштейна–Цернике для многокомпонентной жидкости // Письма в ЖЭТФ, 110 (2019) 658 – 665. https://doi.org/10.1134/S0370274X19220041

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ)

Г.н.с, профессор, д.т.н. Ступицкий Е.Л., м.н.с. Моторин А.А.

Численное исследование работы взрывных плазменных генераторов в условиях верхней ионосферы и определение ионизационно-оптических характеристик возмущенных областей

Было выполнено всестороннее расширение численных возможностей программы расчета динамики плазменного сгустка в разреженной ионосфере и оптимизация начальных данных с целью увеличения дальности его распространения в ионосфере. Показано, что при определенном значении удельной энергии плазмы значительная её часть рекомбинирует. Это, во-первых, дает дополнительный вклад в её кинетическую энергию, во-вторых, на образующуюся в результате рекомбинации нейтральную составляющую не действует геомагнитное поле, что увеличивает дальность распространения сгустка и увеличивает его возможное практическое применение. Показано, что в области распространения сгустка существенно повышается ионизация среды, поэтому, учитывая мобильность плазменной пушки, можно использовать её для помехового сбоя локационного или радиолуча. Получены новые результаты по поверхностному разрушению оптических свойств аморфных и кристаллических тел.

Литература

1. Stupitsky E, Motorin A., Moiseeva D. "Numerical simulation of generation, distribution and impact of a high-specific energy plasma bunch on a barrier" // Applied Mathematics and Computational Mechanics for Smart Applications: Proceedings of AMMAI 2020.
2. Ступицкий Е.Л., Холодов А.С. Монография "Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов" //Издательский дом Интеллект"2019(РФФИ, 18-12-00030 Д).

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Институт физических исследований и технологий (ИФИТ РУДН)

г. Москва, ул. Орджоникидзе 3

Андреев В.В. (доцент, к.ф.-м.н.), Ильгисонис В.И. (проф., д.ф.-м.н., научный руководитель ИФИТ), Лахин В П. (внс, д.ф.-м.н.), Марусов Н.А. (мнс, к.ф.-м.н.), Сорокина Е.А. (нач. лаб., к.ф.-м.н.), Умнов А.М. (доцент, к.ф.-м.н.)

Работа выполнена совместно с НИЦ «Курчатовский институт», Университетом Саскачеван (Канада) и Принстонской лабораторией физики плазмы (США)

Устойчивость и нелинейная динамика плазменных течений в скрещенных электрическом и магнитном полях

Путём нелинейного PIC-моделирования исследована развитая стадия электронно-циклотронной дрейфовой турбулентности в ускорителе плазмы холловского типа и определены скейлинги сопутствующего аномального переноса электронов в зависимости

от величин электрического и магнитного полей и плотности плазмы. Показано, что аномальный ток пропорционален величине приложенного электрического поля, что соответствует постоянной подвижности электронов. При этом скейлинг плотности тока повторяет зависимость доминирующей резонансной длины волны от напряженностей электрического и магнитного полей [1].

В одномерной модельной конфигурации холловского ускорителя исследованы резистивные колебания плазмы с учётом эффектов ионизации. Определены области параметров, характеризующие устойчивое и неустойчивое состояния системы. Исследована роль граничных условий на характеристики нелинейных колебаний [2].

Исследованы особенности дрейфового движения нерелятивистской заряженной частицы в медленно меняющихся магнитном и сильном электрическом полях, для которых неприменимо традиционное предположение о малости скорости электрического дрейфа по отношению к полной скорости частицы. Вариационные принципы дрейфового движения распространены на случай сильного электрического поля; получен обобщённый лагранжиан Литтлджона. Показана возможность ускорения частицы за счет дрейфового движения вдоль сильного электрического поля [3].

Представлена трактовка формирования в плазменных потоках долгоживущих макроскопических структур, систематически наблюдаемых как в природных явлениях, так и в лабораторных плазмодинамических системах. Показано, что причиной крупномасштабных осцилляций разряда в ЭРД в виде так называемых спиц (spokes – в англоязычной литературе) может служить неустойчивость малых возмущений электростатического потенциала плазмы, вызванная протеканием холловского тока [4].

Литература

1. Смоляков А., Зинтель Т., Кёдель Л., Сидоренко Д., Умнов А., Сорокина Е., Марусов Н. (Smolyakov A., Zintel T., Couedel L., Sydorenko D., Umnov A., Sorokina E., Marusov N.) Аномальный перенос электронов в одномерной электронно-циклотронной дрейфовой турбулентности Физика плазмы (2020 г.), doi:10.31857/S036729212005008X
2. Ромаданов И.В., Смоляков А.И., Сорокина Е.А., Андреев В.В., Марусов Н.А. (Romadanov I.V., Smolyakov A.I., Sorokina E.A., Andreev V.V., Marusov N.A.) Устойчивость ионного потока и роль граничных условий в модели стационарного плазменного ускорителя с однородной подвижностью электронов Физика плазмы (2020 г.), doi: 10.31857/S0367292120040101
3. Марусов Н.А., Сорокина Е.А., Ильгисонис В.И. (Marusov N.A., Sorokina E.A., Ilgisonis V.I.) О дрейфовом движении заряженных частиц в неоднородном магнитном и сильном электрическом полях Физика плазмы (2020 г.), doi:10.31857/S0367292120070069
4. Ильгисонис В.И., Лахин В П., Марусов Н.А., Сорокина Е.А. (Ilgisonis V.I., Lakhin V.P., Marusov N.A., Sorokina E.A.) Крупномасштабные колебания в ЭРД холловского типа Известия РАН. Энергетика. 2020, № 5, с. 66–80, doi:10.31857/S0002331020050064

Андреев В.В. (доцент, к.ф.-м.н.), Ильгисонис В.И. (проф., д.ф.-м.н., научный руководитель ИФИТ), Милантьев В.П. (проф., д.ф.-м.н.), Умнов А.М. (доцент, к.ф.-м.н.)

Генерация плазменных сгустков с энергичной электронной компонентой в условиях авторезонансного взаимодействия

Экспериментально и на численной модели детально изучены особенности формирования плазменных сгустков с энергичной электронной компонентой в двух симметрично расположенных областях длинного пробкотрона в условиях авторезонансного взаимодействия [1]. Показано, что форма энергетического спектра захваченных электронов формируется на начальной стадии создания сгустков, а ширина

энергетических спектров увеличивается с ростом напряженности электрической составляющей СВЧ-поля. Продемонстрировано, что при сбросе сгустков в центральную область пробкотрона энергия ионов достигает значения свыше 3000 эВ, что соответствует данным численного расчёта.

Исследован спектральный состав рентгеновского излучения и динамика изменений его параметров в пределах импульса рабочего. Анализ спектров и квантового выхода излучения с газовой мишени показал, что электроны ускоренного плазменного сгустка удерживаются в минимуме пробочной ловушки и сконцентрированы в тонком цилиндрическом слое. Установлено, что спектр и характеристики (квантовый выход, максимальная энергия) рентгеновского излучения в продольном и поперечном направлениях имеют радикальные отличия.

Решена задача о движении электрона в комбинированной магнитной ловушке пробочного типа с прохождением области циклотронного резонанса. Синхронизм электрона со стоячей волной резонатора поддерживается с помощью медленного изменения со временем ведущего магнитного поля [2].

Литература

1. V. V. Andreev, V. I. Ilgisonis, A. A. Novitsky, and A. M. Umnov (В. В. Андреев, В. И. Ильгисонис, А. А. Новицкий, А. М. Умнов) Generation of Plasma Bunches under Conditions of Gyromagnetic Autoresonance in a Long Magnetic Mirror Machine: Computational Experiment// Plasma Physics Reports, 2020, Vol. 46, No. 8, pp. 756–764. doi:10.1134/S1063780X20080012
2. Milant'ev V. P. Theory of electron motion in combined magnetic trap under conditions of gyromagnetic autoresonance // J. Phys.: Conf. Ser. 1647, 2020. P.012008, doi:10.1088/1742-6596/1647/1/012008

Балмашнов А.А. (проф., д.т.н.), Умнов А.М. (доцент, к.ф.-м.н.)

Трансформация волн и ускорение частиц в плазме СВЧ-резонатора

На трехмерной численной модели, построенной по методу частиц в ячейке с учетом электростатических взаимодействий, исследованы условия формирования плазмы в узком коаксиальном резонаторе, помещенном в неоднородное аксиально-симметричное магнитное поле, создаваемое кольцеобразными постоянными магнитами. Показано, что в центральной части резонатора возникает избыточная концентрация ионов, в то время как на периферии доминирует концентрация электронов.

Создан стенд для изучения условий проникновения электромагнитной волны с продольно ориентированным осесимметричным электрическим полем (f = 2,45 ГГц) в радиально неоднородный плазменный столб с замагниченными электронами и условий её трансформации в электростатические волны. Сделан вывод о возможности использования такой системы для создания направленных потоков частиц плазмы большой мощности.

Экспериментально установлено, что открытый коаксиальный СВЧ-резонатор, дополненный кольцевым пристеночным электродом с регулируемым потенциалом, можно использовать для создания потока плазмы с ускоренными ионами [1].

Литература

1. Балмашнов А.А., Бутко Н.Б., Калашников А.В., Степин В.П., Степина С.П., Умнов А.М. (Balmashnov A.A., Butko N.B., Kalashnikov A.V., Stepin V.P., Stepina S.P., Umnov A.M.) Инжектор плазменного потока на основе открытого коаксиального СВЧ-резонатора // Прикладная физика 2020, №3, с. 17

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»
(Физический факультет)
367000, Махачкала, Россия, ул. М. Гаджиева 43-а
Научно-образовательный центр «Физика плазмы»

Ашурбеков Н.А., д.ф.-м.н., профессор

Разработка и исследование плазменного реактора на основе плазменно-пучкового разряда (ППР) с щелевым катодом для формирования широкоапертурных потоков низкоэнергетичных ионов для прецизионных плазма-стимулированных технологий атомно-слоевого травления поверхности материалов наноэлектроники

Разработан и исследован плазменный реактор на основе наносекундного плазменно-пучкового разряда для формирования низкоэнергетичных потоков ионов с энергией около 1 эВ для применения в прецизионных технологиях атомно-слоевого травления материалов наноэлектроники. Разработки основаны на наносекундных разрядах с протяженным щелевым катодом, в которых формируются ленточные электронные пучки с энергией около 1 кэВ и группа вторичных плазменных электронов с энергией около 1 эВ.

Выполнены экспериментальные исследования пространственно-временной динамики развития разряда, кинетики наработки плазменных электронов, возбужденных атомов, анизотропной части функции распределения электронов по скоростям, общих характеристик широкоапертурного «плазменного листа», полученного с помощью ленточного электронного пучка. Разработан способ управления энергией широкоапертурных низкоэнергетичных потоков ионов.

Построена численная модель плазмы исследуемого типа разряда и динамики формирования анизотропной части функции распределения электронов, полученные с использованием сомосогласованных моделей расчета кинетики плазмы в среде Comsol и ФРЭ в среде MathLab.

Исследование влияния низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления (CAP) в смеси воздуха и аргона на оптические показатели биотканей

Выполнены экспериментальные исследования спектрально-флуоресцентных и диффузно-оптических характеристик биотканей при воздействии на них CAP. Выявлены потенциальные флуорофоры и определены коэффициенты оптического поглощения и транспортного рассеяния биотканей. На основе проведенного анализа показано, что облучение биотканей низкотемпературной плазменной струей более 10 минут приводит к достоверному угнетению клеточного дыхания и развитию коагуляционных эффектов в биотканях.

Обобщая результаты исследования воздействия CAP на спектрально-оптические свойства биотканей, сделаны следующие выводы:

1. Спектры флуоресценции $\lambda)$ исследуемых биотканей сформированы свечением коферментов дегидрогеназ NAD(P)·H и FAD+, а также комплексом эндогенных порфиринов, на длинах волн излучения которых (475±3 нм, 531±2, 593±5 и 635±2 нм) наблюдаются экстремумы. При общем увеличении спектров $F(\lambda)$ до 1.5 раз, плазменное зондирование приводит к снижению интенсивности свечения флавиновых и порфириновых групп на 15 – 20%, что может быть связано с угнетением клеточного дыхания в биотканях.
2. Спектры коэффициента диффузного отражения $R_d\ \lambda)$ на фоне обратного рассеяния характеризуются наличием минимумов, образованных коэффициентом поглощения $\mu_a\ \lambda)$ гемоглобина на длинах волн 350±10, 418±5, 545±5 и 577±5 нм, билирубина и биливердина – 280±5, 410±5 и 630±15 нм, а также липидов и воды – 760±5 и 970±5 нм. При этом 1.5 кратный рост коэффициента $R_d(\lambda)$, наблюдающийся при плазменном воздействии, вызван, преимущественно, увеличением коэффициента транспортного рассеяния $\mu_s'(\lambda)$.
3. Анализ коэффициента транспортного рассеяния исследуемых биотканей указывает на изменение их структурно-морфологических свойств, вызванных воздействием CAP с экспозицией 10 минут, что может свидетельствовать пользу развития коагуляционных эффектов.

Литература

1. N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.S. Shakhsinov, M.Z. Zakaryaeva, K.M. Rabadanov. The dynamics of a nanosecond gas discharge development with an extended slot cathode in argon. 2020 Plasma Science and Technology, Volume 22, Number 12. 125403. 10.1088/2058-6272/abbb78
2. N.A. Ashurbekov, K.M. Giraev, G.Sh. Shakhsinov, E.Kh. Israpov, Z.M. Isaeva, A.A. Murtazaeva and K.M. Rabadanov. Interaction of low-temperature atmospheric pressure plasma jet mixed with argon and air with living tissues. Journal of Physics: Conference Series. Special Issue. 2020. Volume 1697, 012044 10.1088/1742-6596/1697/1/012044
3. N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.S. Shakhsinov and M.Z. Zakaryaeva. The dynamics of the spatiotemporal distribution of excited atoms in a nanosecond discharge with a slot cathode. Journal of Physics: Conference Series. Special Issue. 2020. Volume 1697, 012214 10.1088/1742-6596/1697/1/012214
4. Патент 2722690 Российская Федерация, МПК H01J 27/06, H01J 37/301. Устройство для получения широкоапертурного низкоэнергетичного потока ионов / Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Закарьяева М.З., Муртазаева А.К., Шахсинов Г.Ш.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Дагестанский государственный университет". – № 2019139000; заявл. 2019.11.29; опубл. 2020.06.03.
5. Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, М.З. Закарьяева. Исследование динамики формирования пространственного распределения основных параметров плазменного источника на основе наносекундного разряда с протяженным полым катодом в аргоне. Вестник Дагестанского государственного университета Серия 1. Естественные науки. 2020. Том 35. Вып. 3. С. 81-91. 10.21779/2542-0321-2020-35-3-81-91.
6. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Закарьяева М.З. Динамики пространственно-временного распределения возбужденных атомов в наносекундном плазменно-пучковом разряде с щелевым катодом. ФизикА.СПб: тезисы докладов международной конференции 19–23 октября 2020 г. — СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020 С. 434.
7. Ашурбеков Н.А., Шахсинов Г.Ш., Гираев К.М., Исрапов Э.Х., Исаева З.М., Муртазаева А.А., Рабаданов К.М. Воздействие низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления в смеси воздуха и аргона на оптические свойства биотканей. ФизикА.СПб: тезисы докладов международной конференции 19–23 октября 2020 г. — СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020 С. 73.
8. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Курбангаджиева М.Б., Закарьяева М.З. Нестационарные оптические спектры пропускания неоднородной плазмы наносекундного электрического разряда с щелевым катодом в неоне вблизи узких резонансов поглощения. ФизикА.СПб: тезисы докладов международной конференции 19–23 октября 2020 г. — СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020 С. 259.
9. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Закарьяева М.З., Шахсинов Г.Ш. Плазменные источники низкоэнергетичных потоков ионов для прецизионных технологий наноэлектроники. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 46.
10. Ашурбеков Н.А., Гираев К.М., Шахсинов Г.Ш., Исрапов Э.Х. Исследование спектрально-флуоресцентных и диффузно-оптических свойств биологической ткани при воздействии низкотемпературной плазменной струи. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 68.
11. Муртазаева А.А., Гираев К.М., Ашурбеков Н.А., Магомедов М.А., Исрапов Э.Х. Влияние хлорорганических пестицидов на оптические спектры клеток нервной

ткани. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 72.
12. Исрапов Э.Х., Гираев К.М., Ашурбеков Н.А., Джамалудинов М.Р. Влияние процессов лазерно-индуцированной гипертермии на динамику спектров флуоресценции и диффузного отражения биологических тканей in vivo. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 76.
13. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Закарьяева М.З. Численное моделирования динамики формирования ограниченного наносекундного разряда с протяженным полым катодом в аргоне. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 136.
14. Ашурбеков Н.А., Исаева З.М., Шахсинов Г.Ш., Рабаданов К.М. Исследование эмиссионных спектров молекулярного азота в струйной плазме атмосферного давления в смеси аргона и воздуха. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 139.
15. Ашурбеков Н.А., Курбангаджиева М.Б., Шахсинов Г.Ш. Нестационарные оптические спектры пропускания наносекундных разрядов в режиме формирования высокоскоростных волн ионизации в газоразрядной плазме неона вблизи узких резонансов поглощения. Материалы XI Всероссийской конференции ФЭ-2020 26–29 октября 2020 г. — Махачкала: Издательство ДГУ, 2020 С. 143.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультетеа МГУ

119991, Москва, Россия, Ленинские горы, 2

Знаменская Ирина Александровна, профессор, Мурсенкова Ирина Владимировна, доцент; Иванов Игорь Эдуардович, доцент.

Динамика поверхностного распределенного разряда, скользящего по поверхности диэлектрика

Экспериментально исследована динамика ударных волн, развивающихся из локализованного канала наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха за клином в ударной трубе с числами Маха 1,16–1,47 при плотности 0,02 кг / м3–0,20 кг /. м3. Показано, что полуцилиндрическая ударная волна взрывного типа формируется из разрядного канала в зоне вихря низкой плотности за клином. Теневые изображения ударных волн после разряда сравнивались с моделированием поля течения после подвода энергии у стенки в сверхзвуковом потоке. На основе сравнения результатов экспериментов и моделирования показано, что ударные волны образуются при выделении тепловой энергии 0,07 ± 0,04 Дж в канале локализованного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха. Импульсное напряжение 25 кВ; электрический ток составлял 1 кА. Концентрация электронов в канале локализованного разряда составляла (0,7-1,4) * 10-15 см ^ -3, а энергия электронов составляла 1,8-2,2 эВ из анализа спектров излучения. Высокоскоростная теневая съемка потока после разряда показала, что канал локализованного разряда генерирует сильную ударную волну, приводящую к перестройке ударно-волновой структуры потока в течении ~ 100 мкс и последующей релаксации к стационарной конфигурации.

Проведено численное моделирование наносекундного высоковольтного пробоя в азоте при напряжении 25–35 кВ в субсантиметровых разрядных промежутках. Рассчитывались характерные параметры и скорости распространения первичных и

вторичных стримеров. Установлено, что закон изменения давления в радиальном направлении сильно влияет на пространственную структуру отрицательного стримера.

Литература

1. Mursenkova I., Ivanov I.E., Ulanov P., Liao Yu, Sazonov A. Investigation on nanosecond surface sliding discharge in a supersonic airflow with oblique shock wave. Journal of Physics: Conference Series, V. 1698 (2020)
2. Ermakov E.A., Ivanov I.E., Kryukov I.A., Mursenkova I.V., Znamenskaya I.A. Numerical simulations of nanosecond discharge in gas-dynamic flows. Journal of Physics: Conference Series, издательство IOP Publishing, England), том 1647, с. 012015-1-012015-6 (2020)
3. Liao Yu, Mursenkova I.V., Ivanov I.E., Znamenskaya I.A., Sysoev N.N. Shock waves generated by a pulsed surface sliding discharge in a supersonic airflow past a wedge. Physics of Fluids, издательство AIP Publishing (United States), V. 32, № 10, с. 106108-1-106108-9 (2020)

Знаменская Ирина Александровна профессор, Кули-заде Тахир Аллахарович, ассистент, Коротеева Екатерина Юрьевна, старший научный сотрудник, Тимохин Максим Юрьевич, научный сотрудник.

Генерация разрывов при инициировании в газе наносекундного комбинированного разряда в локализованной форме

Экспериментально и численно исследовались высокоскоростные потока, индуцированные импульсным объемным разрядом в формате контракции и самолокализации - в форме цилиндрического плазменного канала длиной 24 мм при низком давлении. Время выделения энергии разряда анализируется на основе относительной динамики ударной полны и контактной поверхности. Теневая визуализация с временным разрешением выполняется для регистрации эволюции двух цилиндрических Сравнение экспериментальных данных с численными предсказаниями подтверждает, что нагрев газа импульсной плазмой происходит в течение одной микросекунды. Показано,что на участке газодинамического канала с уступом в форме параллелепипеда в потоке за фронтом ударной волны с числами Маха 2.8−3.5 в течение 2800 μs реализуются короткоживущие плазменные каналы в зонах отрыва около уступа. Объемный импульсный разряд с ультрафиолетовой предыонизацией также был использован для визуализации пограничного слоя в рабочей камере прямоугольного сечения.

Литература

1. I.A. Znamenskaya, E.Yu. Koroteeva, I.A. Doroshchenko. The effect of column-shaped discharge duration on induced high-speed flow dynamics. // Physics of Fluids. Vol. 32, no. 9. — P. 096103. (2020)
2. Знаменская И.А., Татаренкова Д.И., Кули-заде Т.А. Наносекундная ионизация области обтекания прямоугольного уступа высокоскоростным потоком // Письма в Журнал технической физики. Т. 46, № 1. — С. 5–7. (2020).
3. А. Дорощенко, И. А. Знаменская, Т. А. Кули-заде, Д. И. Татаренкова. Характеристики турбулентного пограничного слоя на стеклянной поверхности канала за ударной волной // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. № 5. — С. 16–20.. (2020).

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ)

199034, Санкт-Петербург, Россия, Университетская наб. 7-9

Группа Красева В.Ю.

1. Pavlov, S.I., Novikov, L.A., Dzlieva, E.S., Karasev, V.Y. Creation of stable dust structures in the glow discharge in magnetic fields of up to 15000 G. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1647(1), 012014
2. Kartasheva, A.A., Golubovskii, Y.B., Karasev, V.Y. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1556(1), 012079
3. Karasev, V.Y., Polischuk, V.A., Dzlieva, E.S., Pavlov, S.I., Gorbenko, A.P. About the mechanism of modification of melamine formaldehyde particles in dusty plasmas. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1556(1), 012080
4. Pavlov, S.I., Dzlieva, E.S., Ermolenko, M.A., Novikov, L.A., Karasev, V.Y. The influence of magnetic field on the geometrical dimensions of dusty structure in striations. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1556(1), 012081
5. Karasev, V.Y., Dzlieva, E.S., Pavlov, S.I., Novikov, L.A., Mashek, I.C. Dusty Plasma in a Strongly Inhomogeneous Magnetic Field. Technical Physics Letters, 2020, 46(4), стр. 371–373
6. Karasev, V.Y., Dzlieva, E.S., Pavlov, S.I., ...Eikhval'd, A.I., Mashek, I.C. Threshold Behavior of Volume Dust Cluster Untwisting in a Magnetic Field. Technical Physics, 2020, 65(2), стр. 190–193

Группа Голубовского Ю.Б., Иванова В.А., Иониха Ю.З.

1. Golubovskii, Yu.B., Siasko, A.V., Nekuchaev, V.O. Peculiarities of glow discharge constriction in helium. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(6), 065020
2. Ivanov, V.A. Superposition of low-pressure DBD and RF induction discharge for spectroscopic study of dissociative recombination in decaying plasma. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(4), 045022
3. Meshchanov, A.V., Ionikh, Y.Z., Akishev, Y.S. Effect of High-Voltage Electrode Potential Bias on the Breakdown Induced by Ionization Wave in Discharge Tube. Plasma Physics Reports, 2020, 46(11), стр. 1124–1136
4. Ionikh, Y.Z. Electric Breakdown in Long Discharge Tubes at Low Pressure (Review). Plasma Physics Reports, 2020, 46(10), стр. 1015–1044
5. Dyatko, N.A., Ionikh, Y.Z., Kalinin, S.A., Mityureva, A.A. Evaluation of the Electric Field Strength in a Pre-Breakdown Ionization Wave in a Long Discharge Tube from the Emission Spectrum. Plasma Physics Reports, 2020, 46(2), стр. 200–216

Группа Девдариани А.З.

1. Devdariani, A.Z., Kryukov, N.A., Zagrebin, A.L., Lednev, M.G., Timofeev, N.A. Spectra of diatomic quasimolecules in intermediate Hund's coupling cases. The UV continua produced by Hg(6 3P2) + Ar collisions. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 248, 106951
2. Devdariani, A.Z., Artamonova, A.O., Belyaev, A.K. Resonant Charge Exchange in an Electrostatic Field. Technical Physics Letters, 2020, 46(2), стр. 193–195
3. Devdariani, A.Z., Zagrebin, A.L., Lednev, M.G. Quasi-Molecular Optical Transitions near Resonance Lines of Kr and Xe Atoms in Helium. Optics and Spectroscopy, 2020, 128(2), стр. 167–171

Группа Сухомлинова В.С., Мустафаева А.С. и Тимофеева Н. А.

1. Sukhomlinov, V.S., Matveev, R.J., Mustafaev, A.S., Timofeev, N.A., Solihov, D.Q. Simultaneous generation of several waves in a rare gas low-voltage beam discharge. Physics of Plasmas, 2020, 27(8), 0011584
2. Sukhomlinov, V., Matveev, R., Mustafaev, A., Timofeev, N. Kinetic theory of low-voltage beam discharge instability in rare gases. Physics of Plasmas, 2020, 27(6), 062106
3. Mustafaev, A.S., Sukhomlinov, V.S. Indicatrix Determination of Electron Elastic Scattering by an Atom Based on Probe Measurements of Distribution Functions of Scattered Electrons in a Low-Voltage Beam Discharge in Inert Gases. Technical Physics, 2020, 65(4), стр. 560–567

4. Sukhomlinov, V.S., Mustafaev, A.S., Strakhova, A.A., Timofeev, N.A. Destruction of a Stationary Vortex in an Elastic Medium by Energy Deposition. Technical Physics, 2020, 65(4), стр. 548–554
5. Timofeev, N.A., Sukhomlinov, V.S., Zissis, G., Mustafaev, A.S., Solihov, D.Q. Comments about the Article 'On the Similarities of Lowerature Plasma Discharges'. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 596–601, 8907361

Группа Кудрявцева А.А.

1. Mandour, M.M., Astashkevich, S.A., Kudryavtsev, A.A. 2D simulation of solar/lamp two-chamber photoelectric converter with different sodium–noble gas mixtures. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(11), 115005
2. Yao, J., Yuan, C., Eliseev, S., Kudryavtsev, A., Zhou, Z. Longitudinal structure and plasma parameters of an entire DC glow discharge as obtained using a 1D fluid-based model with non-local ionization. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(7), 075003
3. Li, S., Yuan, C., Yao, J., ...Kudryavtsev, A.A., Zhou, Z. Evidence of effective local control of a plasma's nonlocal electron distribution function. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(7), 077001
4. Yuan, C., Yao, J., Demidov, V.I., ...Kudryavtsev, A.A., Zhou, Z. Measurement of the densities of plasma and ambient gas particles using a short direct current discharge. Physics of Plasmas, 2020, 27(5), 053508
5. Yuan, C., Yao, J., Bogdanov, E.A., Kudryavtsev, A.A., Zhou, Z. Formation of inverse electron distribution function and absolute negative conductivity in nonlocal plasma of a dc glow discharg Physical Review E, 2020, 101(3), 031202
6. Mandour, M.M., Astashkevich, S.A., Kudryavtsev, A.A. 2-D Simulation of Two-Chamber Photoplasma for Conversion of Light Radiation to Electrical Energy. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 394–401, 8931759
7. Mandour, M.M., Astashkevich, S.A., Kudryavtsev, A.A. Optimization of Photoelectric Converter Based on a Two-Chamber Na-Ar Gas Photoplasma. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 402–409, 8907498
8. Li, S., Bogdanov, D.V., Kudryavtsev, A.A., Yuan, C., Zhou, Z. Influence of the Spatial Distribution of the Dust Particle Density on the Radial Profile Formation of Particles and Fluxes in a Dusty Plasma of DC Glow Discharge. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 375–387, 8936557
9. Yao, J., Yu, Z., Yuan, C., ...Wang, X., Kudryavtsev, A.A. The Influence of Plasma Distribution on Microwave Reflection in a Plasma-Metal Model. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 359–363, 8859631
10. Li, J., Getmanov, I.K., Kudryavtsev, A.A., ...Wang, X., Zhou, Z. Conductivity and Permittivity in Plasma with Nonequilibrium Electron Distribution Function IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 388–393, 8941105
11. Li, J., Astafiev, A.M., Kudryavtsev, A.A., ...Zhou, Z., Wang, X. Monopole Antenna with Reconfigurable Quarter Wavelength Plasma Reflector. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(2), стр. 364–368, 8943297
12. Mandour, M.M., Astashkevich, S.A., Kudryavtsev, A.A. Influence of Vortex Electron Currents on Transport Processes in 2-D Photoplasma of Sodium-Noble Gas Mixtures. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020
13. Mandour, M.M., Astashkevich, S.A., Kudryavtsev, A.A. On the Validity of Two-Chamber Configuration for the Generation of Electromotive Force in Photoplasma. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020
14. Yao, J., Yuan, C., Yu, Z., Zhou, Z., Kudryavtsev, A. Measurements of plasma parameters in a hollow electrode AC glow discharge in helium. Plasma Science and Technology, 2020, 22(3), 034006 Gorin, V.V., Kudryavtsev, A.A., Yao, J., Yuan, C., Zhou,

Z. Boundary conditions for drift-diffusion equations in gas-discharge plasmas. Physics of Plasmas, 2020, 27(1), 5120613

ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХСРАН)

119991, Москва. Ленинский проспект , 29

Лаборатория плазмохимии и физикохимии импульсных процессов

Г.н.с., ИО зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Лебедев Юрий Анатольевич

Обнаружение излучения молекулярного комплекса C_5 в микроволновом разряде в жидких ароматических соединениях

Исследовано излучение СВЧ-разряда, генерируемого внутри жидких углеводородов различных классов (алканов, циклических и ароматических углеводородов), в диапазоне длин волн 200-700 нм при атмосферном давлении над поверхностью жидкостей. Спектры СВЧ-разряда во всех исследованных углеводородах, за исключением ароматических углеводородов, представлены полосами Свана (переходы $C_2\left(d^3\Pi_g \to a^3\Pi_u\right)$) последовательностями = 0, 1, -1 и полосой при 436,5 нм (= -2), которая перекрывается с полоса испускания 0-0 CH при 431,2 нм. Кроме того, наблюдается широкополосный спектр излучения твердых углеродсодержащих частиц. В спектрах, измеренных в ароматических углеводородах (толуол, орто-ксилол), секвенция полосы Свана с = 0 перекрывалась с молекулярной неизвестной полосой излучения с максимумом при 511 нм. Анализ литературных данных позволяет сделать вывод, что это излучение может быть вызвано излучением линейного углеродного кластера C_5 (переход $C_5\left({}^1\Pi_u \to X^1\Sigma_u^+\right)$). Этот кластер ранее наблюдался только в поглощении. Это означает, что СВЧ-разряд в жидких ароматических углеводородах создавал определенные условия для генерации C_5 и его испускания.

Моделирование микроволнового разряда в жидком н-гептане с учетом образования твердых частиц и их зарядке в плазме

Разработана нестационарная нульмерная модель СВЧ разряда в жидком *н*-гептане с учетом заряжения твердых частиц, образующихся из продуктов разложения *н*-гептана. Показано, что:

а) Образующиеся в плазме твердые частицы являются дополнительным стоком для заряженных частиц. Зарядка образующихся твердых частиц приводит к тому, квазинейтральность плазмы, в основном, обеспечивается отрицательным зарядом тяжелых частиц, а концентрация электронов на 1÷2 порядка меньше суммарной концентрации положительных ионов.

б) Показано, что заряжение частиц приводит к подавлению процесса коагуляции для крупных твердых частиц и, соответственно, к изменению распределения образовавшихся твердых частиц по размерам и ведет к образованию максимумов функции распределения твердых частиц по размерам в области частиц среднего размера.

в) Разработана схема кинетических процессов, приводящих к излечению полос Свана молекулы C_2.

Литература

1. Yu.A. Lebedev, V.A. Shakhatov, Optical emission spectra of microwave discharge in different liquid hydrocarbons, Plasma Process Polym. 2020; Vol. 17, issue 8, e2000003, DOI: 10.1002/ppap.202000003.
2. Lebedev Yu. A., Tatarinov A. V., Epshtein I. L. Effect of charging solid particles on their growth process and parameters of microwave discharge in liquid n-heptane. Plasma Sources Science and Technology, Volume 29, Number 6, 065013. https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab8f76

ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
634055, г. Томск, Россия, просп. Академический, д. 2/3
Лаборатория газовых лазеров
Панченко Юрий Николаевич, зав. лаб., д.ф.-м.н.; Пучикин Алексей Владимирович, вед. инженер; Ямпольская Софья Александровна, н.с., к.ф.-м.н.

Многоканальная диффузная плазма, как устойчивая форма горения разряда при высоких удельных мощностях накачки

Предложена и реализована новая форма горения диффузного разряда в плотных газовых смесях с электроотрицательными компонентами, состоящая из самоорганизующейся структуры множественных диффузных каналов. Применение такого разряда в плотных газовых средах, включающих в себя электроотрицательные добавки (галогены, кислород) позволило расширить диапазон устойчивого существования диффузной плазмы с концентрацией электронов до 8×10^{15} см$^{-3}$ при сохранении свойств активной среды в течение всей длительности импульса накачки. Формирование множественных равновесных диффузных каналов обеспечивалась за счет скорости роста плотности тока более 6×10^{10} А/(см$^2\times$с) и приведенной напряженности поля в момент пробоя разрядного промежутка не менее 3 кВ/см×атм. Выбор соотношения донора и акцептора электронов в составе газовой смеси позволяет реализовывать завершенную или незавершенную стадию развития множественных диффузных каналов в разряде.

Литература

1. S. A. Yampolskaya, A. G. Yastremskii, Y. N. Panchenko, A. V. Puchikin and S. M. Bobrovnikov. Numerical Study of the Discharge Spatial Characteristics Influence on the KrF Laser Generation // *IEEE Journal of Quantum Electronics.* 2020. Vol. 56, No. 2. PP. 1–9.

Лаборатория оптических излучений
Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лаб., к.ф.-м.н.; Белоплотов Дмитрий Викторович, н.с., к.ф.-м.н; Ломаев Михаил Иванович, в.н.с., д.ф.-м.н.; Тарасенко Виктор Федотович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Новые аспекты наносекундного и субнаносекундного пробоя газов в резко неоднородном электрическом поле

Проведены исследования формирования наносекундных разрядов в неоднородном электрическом поле при различном давлении газов. Показано, что движение стримера сопровождается протеканием тока в промежутке, а его диаметр может быть сопоставим с межэлектродным расстоянием. Величина тока пропорциональна скорости стримера. В неионизованной части промежутка этот ток представляет собой ток смещения, обусловленный перераспределением напряжённости электрического поля при формировании стримера (динамический ток смещения). Разработан метод измерения этого тока, позволяющий исследовать динамику формирования разряда в различных условиях, генерацию убегающих электронов с привязкой к динамике формирования стримера. В частности, показано, что генерация убегающих электронов происходит при старте стримера. В условиях субнаносекундного пробоя динамический ток смещения может составлять более половины амплитудного значения тока разряда. При этом спадает напряжение на промежутке. Поэтому момент пробоя можно ассоциировать с моментом старта стримера.

Литература

1. Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I. Features of streamer formation in a sharply non-uniform electric field // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 125, Issue. 14. 143301.
2. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. / Displacement current during the formation of positive streamers in atmospheric pressure air with a highly inhomogeneous electric field // Physics of Plasmas. 2020. Vol. 25. P. 083511.

Лаборатория плазменных источников
Окс Ефим Михайлович, зав. лаб., д.т.н.

Генерация пучков ионов дейтерия в ионном источнике на основе вакуумном дуги

Выполнен цикл экспериментальных исследований по генерации пучков ионов дейтерия в ионном источнике на основе вакуумном дуги с насыщенным дейтерием циркониевым катодом. На основе детального измерения углового распределения ионных потоков газового и металлического компонентов в дуговой плазме показано, что распределение дейтерия существенно шире, чем циркония. Функция распределения по энергиям ионов циркония различных зарядностей практически совпадают, а ее максимум достигается при энергиях уровня 100 эВ. При этом аналогичный показатель для ионов дейтерия составляет около 8 эВ. Установлено, что наиболее эффективная генерация ионов дейтерия, и соответственно максимальная доля дейтерия в ионном пучке, обеспечивается при остаточном давлении в разрядном промежутке ниже $1x10^{-6}$ Торр, токе дуги около 200 А и размещении катода на расстоянии (10-20) мм от эмиссионной поверхности. При этом доля ионов дейтерия в ионном пучке может достигает 80%, что в 2 раза выше процентного содержание атомов дейтерия в материале катода.

Литература

1. А.Г. Николаев, Е.М. Окс, В.П. Фролова, Г.Ю. Юшков. Генерация субмиллисекундных пучков ионов дейтерия на основе вакуумной дуги с газонасыщенным циркониевым катодом // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. 63 (10). С. 124-131.

Окс Ефим Михайлович, зав. лаб., д.т.н.; Визирь Алексей Вадимович, в.н.с., д.т.н.

Вакуумный планарный магнетронный разряд, инициируемый плазмой вакуумной дуги

Реализован вакуумный (безгазовый) планарный магнетронный разряд, инициируемый плазмой вакуумной дуги. Определены режимы работы разряда для различных материалов мишеней магнетрона. Измерен масс-зарядовый ионный состав плазмы и его эволюция во время импульса разрядного тока. Показано, что после переходных процессов дегазации и очистки катода ионная составляющая плазмы состоит в основном из однозарядных ионов материала магнетронной мишени. Измеренный полный ионный ток из плазмы разряда вакуумного магнетрона составляет до 7,5% от тока разряда Устройство может быть использовано как для создания металлических покрытий, так и для генерации ускоренных пучков ионов металлов. Отсутствие в таком разряде микрокапельной фракции делает вакуумный магнетрон реальной альтернативой вакуумно-дуговым системам.

Литература

1. A.V. Vizir, E.M. Oks, M.V.Shandrikov, G.Yu.Yushkov. Parameters and properties of a pulsed planar vacuum magnetron discharge // Vacuum. Vol. 178, August 2020, 109400.

Окс Ефим Михайлович, зав. лаб., д.т.н.; Гушенец Василий Иванович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Динамика электронного пучка в плазмонаполненной электронно-оптической системе с открытой границей анодной плазмы

Показано, что в процессе формирования и транспортировки широкоапертурного (диаметром несколько сантиметров) интенсивного (плотность тока 2–3 А/см^2) импульсного (длительностью 100 мкс) электронного пучка в плазмонаполненной электронно-оптической системе с открытой (бессеточной) подвижной границей анодной плазмы возникает высокочастотная модуляция тока пучка. Эта модуляция связана с колебаниями потенциала положительно заряженной прианодной плазмы, определяющего положение эмиссионной границы плазмы и величину тока эмиссии и ВЧ модуляция тока пучка, приводит к раскачке колебаний в цепях ускоряющего напряжения и может быть поддавлена введением в электрическую цепь индуктивности в несколько десятых долей микрогенри.

Литература

1. Gushenets, V., Bugaev, A., Oks, E. High-frequency electron beam modulation in an electron source with a plasma-filled optical system // Proc. 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020), pp. 170–173, 9242020.

Лаборатория низкотемпературной плазмы
Ахмадеев Юрий Халяфович, зав. лаб., к.т.н.; Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.

Электронно-ионная упрочняющая обработка поверхности материалов и изделий с одновременным использованием генераторов газовой и металлической плазмы

Экспериментально показана возможность реализации электронно-ионной упрочняющей обработки поверхности материалов и изделий с использованием, в том числе одновременным, генераторов газовой и металлической плазмы. Для характерных режимов совместной и раздельной работы были исследованы характеристики разрядов и параметры генерируемой плазмы. Показано, что электронный нагрев образцов происходит за счет ускорения электронов в положительном анодном падении потенциала (≈ 10 В), образующимся вблизи образца, играющего роль анода малой площади. При этом скорость нагрева образцов по сравнению с ионным нагревом, увеличивается в несколько раз. Показано, что разработанная система может использоваться для электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий как газовыми, так и металлическими ионами в случаях, когда выдвигаются специальные требования к пониженной (по сравнению с традиционными методами ионного нагрева) шероховатости поверхности материалов и изделий.

Литература

1. Y. Akhmadeev, I. Lopatin, Y. Ivanov, E. Petrikova, M. Rygina Complex Method of Structural Steel // IEEE2020, Proceedings 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, 2020, P. 572-575.
2. Y. Ivanov, I. Lopatin, Y. Denisova, E. Petrikova, O. Tolkachev Elion Method of Nitriding of High-Chromium Stainless Steel: Structure and Properties // IEEE2020, Proceedings 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, 2020, P. 783-787.

Ахмадеев Юрий Халяфович, зав. лаб., к.т.н.; Крысина Ольга Васильевна, с.н.с., к.т.н.

Управление элементным и фазовым составом нанокристаллических нитридных покрытий на основе молибдена, синтезируемых вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом

Показана принципиальная возможность варьирования элементного и фазового состава нанокристаллических нитридных покрытий на основе молибдена, синтезируемых вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом, за счет изменения тока разряда

ассистирующего плазмогенератора при постоянном давлении газовой смеси. Выявлено, что увеличение тока разряда в широком диапазоне 10–200 А приводит к увеличению плотности тока газовых ионов над металлическими до 3 раз, что приводит к росту концентрации азота в покрытии системы Mo-N до 2 раз. Выявлено, что с ростом тока разряда основная фаза в покрытии меняется с металлической (Mo) на нитридную с недостатком азота (Mo_2N), а затем на фазу стехиометрического состава MoN. Установлено, что при этом покрытия, полученные в режимах с плазменным ассистированием обладают нанокристаллической структурой, их нанотвердость увеличивается до 1,3 раза, износостойкость увеличивается до 2,4 раз по сравнению с параметрами покрытий, осажденных в режимах без плазменного ассистирования. Разработанные нитридные покрытия перспективны для использования в промышленности, как износостойкие.

Литература

1. Крысина О.В., Иванов Ю.Ф., Прокопенко Н.А., Шугуров В.В., Петрикова Е.А., Толкачев О.С. Однослойные покрытия на основе молибдена и его нитридов, формируемые вакуумно-дуговым методом: синтез, свойства, структура // Известия высших учебных заведений. Физика (в печати).

Лаборатория пучково-плазменной инженерии поверхности, лаборатория плазменной эмиссионной электроники

Денисов Владимир Викторович, зав. лаб., к.т.н.; Ковальский Сергей Сергеевич, м.н.с.;

Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Яковлев Владислав Викторович, н.с., Островерхов Евгений Владимирович, м.н.с.

Закономерности генерации пучково-плазменных образований с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом

В несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом диаметром 0,6 м и длиной 1 м в значительных (до 0,3 $м^3$) вакуумных объемах при низком (0,025–0,25 Па) давлении в режиме одиночных импульсов при импульсных токах до 800 А при напряжении горения разряда до 400 В и длительности импульсов 1 мс, что по совокупности основных параметров является уникальным для такого типа разрядов низкого давления, сформированы объемные пучково-плазменные образования с концентрацией плазмы около 10^{12} $см^{-3}$ степени ионизации до 16 % и однородности плотности не хуже ± 15 % от среднего значения. Высокая однородность обусловлена интенсификацией кулоновских взаимодействий при относительно высокой степени ионизации плазмы, что способствует более эффективной утилизации энергии быстрых электронов в плазме тлеющего разряда до их ухода на анод. Измеренные плотности электронного тока насыщения из плазмы на зонд в такой плазме при величине тока около 800 А достигают нескольких ампер на квадратный сантиметр, что указывает на перспективность использования импульсной плазмы сильноточного тлеющего разряда с полым катодом в устройствах генерации импульсных интенсивных электронных пучков большого сечения, используемых для возбуждения газовых лазеров, реализации плазмохимических процессов, стерилизации и других процессах, число которых растет по мере совершенствования плазменных источников электронов.

Литература

1. Яковлев В.В., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Ковальский С.С., Островерхов Е.В., Егоров А.О., Савчук М.В. Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. № 10. С. 109–116.

Лаборатория вакуумной электроники
Озур Григорий Евгеньевич, в.н.с., д.т.н.; Кизириди Павел Петрович, м.н.с.

Катодный узел сильноточной электронной пушки с многоканальным инициированием взрывной эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика

Впервые создан и успешно испытан катодный узел сильноточной электронной пушки, включающий взрывоэмиссионный катод и встроенные в него резистивно развязанные дуговые источники плазмы, инициируемые пробоем по поверхности диэлектрика. Отличительной особенностью нового катодного узла является его питание от одного генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего как параллельное срабатывание источников плазмы, так и ускорение электронов пучка к коллектору. Установлено, что такой катодный узел обладает в 1,5–1,7 раза большей эмиссионной способностью по сравнению с медно-оплеточным взрывоэмиссионным катодом, традиционно используемым в пушках с плазменным анодом. Перспективным является использование нового катодного узла в газонаполненном диоде. При этом отпадает необходимость в создании плазменного анода, а повышение первеанса электронного потока по сравнению с вакуумным диодом обеспечивается благодаря ионизации рабочего газа.

Литература

1. П.П. Кизириди, Г.Е. Озур. // Письма в ЖТФ. 2020. т. 46. Вып. 15. С. 47–50.

Лаборатория низкотемпературной плазмы
Ландль Николай Владимирович, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Распределение тока по поверхности катода для тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и полым анодом в воздухе и водороде

Проведены исследования тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и полым анодом в воздухе и водороде в условиях, когда глубина катодной полости сравнима с ее диаметром. Получены вольтамперные характеристики разряда и данные по распределению тока по поверхности катода с использованием секционированных электродов, измерен размер области катодного падения потенциала. Показано, что в режиме затрудненного тлеющего разряда основная доля тока замыкается на ближнюю к аноду катодную секцию. В режиме обычного тлеющего разряда ток разряда замыкается на всю поверхность катодной полости. Проведены оценки параметров разряда и размера области катодного падения потенциала с привлечением модели поддержания разряда с полым катодом для режима обычного тлеющего разряда. Показано хорошее согласие расчетных данных с экспериментом.

Литература

1. Н.В. Ландль, Ю.Д. Королев, О.Б. Франц, В.Г. Гейман, Г.А. Аргунов, В.О. Нехорошев, «Распределение тока по поверхности полого катода для тлеющего разряда низкого давления» // Известия высших учебных заведений. Физика. 2021 (в печати).

Ландль Николай Владимирович, зав. лаб., к.ф.-м.н.
Королев Юрий Дмитриевич, г.н.с., д.ф.-м.н.

Тлеющий разряд низкого давления в узле запуска тиратрона с холодным катодом

На разборном макете с внешним напуском газа (водород) проведены исследования тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и полым анодом в узле запуска тиратрона с холодным катодом. Получены вольтамперные характеристики разряда и дана их интерпретация. Показано, что в области низких давлений газа разряд в узле запуска поддерживается только в режиме затрудненного тлеющего разряда. С увеличением

давления газа разряд может поддерживаться в режиме обычного тлеющего разряда. Проведены оценки размера области катодного падения потенциала и концентрации плазмы в катодной полости для режима обычного тлеющего разряда. Изучены особенности зажигания сильноточного разряда запуска, возникающего при приложении импульса высокого напряжения к электродам узла запуска. Выявлен механизм переключения тока разряда запуска на основную катодную полость для различных смех запуска и различных режимов поддержания разряда. Определены условия, в которых обеспечивается время переключения тока на уровне 30 нс.

Литература

1. Korolev Y.D., Landl N.V., Frants O.B., Argunov G.A., Geyman V.G., Bolotov A.V. Low-pressure discharge in a trigger unit of pseudospark switch // Physics of Plasmas. 2020. V. 27. Art. No. 073510

Изданные монографии по тематике Совета

1. Громов В.Е., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Невский С.А., Сарычев В.Д., Будовских Е.А., Рубаникова Ю.А. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2020. – 285 с. (ISBN 978-5-7806-0552-42)
2. Сорокин Д.А., Белоплотов Д.В., Гришков А.А., Шкляев В.А., Тарасенко В.Ф., Беломытцев С.Я., Ломаев М.И.. Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. Серия «Излучение. Пучки. Плазма». Выпуск 3. STT: Томск, 2020, 286 с. (ISBN 978-5-93629-646-8)

Научные мероприятия по тематике Совета

Организован и проведен совместно с ФГБУН Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук и ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» 7-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2020, http://efre2020.hcei.tsc.ru), включая мероприятия: 21-й Международный симпозиум по сильноточной электронике (SHCE); 15-я Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (СММ); 19-я Международная конференция по радиационной физике и химии конденсированных сред (RPC); 4-я Международная конференция «Новые материалы и наукоёмкие технологии» (NMHT). Конгресс проведен режиме онлайн и привлек 695 участников из 37 городов России и 22 зарубежных стран; на мероприятии было сделано 618 научных докладов.

ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН)

125047, Москва, Россия, Миусская пл. 4

Отдел № 15

Шпатаковская Галина Васильевна, эксперт-советник, д.ф.-м.н.

Литература

1. Шпатаковская Г.В. Закономерности в измеренных первых потенциалах ионизации лантанидов и актинидов Письма в ЖЭТФ, **111**(8), 526–530 (2020) DOI:10.31857/S12345678920080121.
2. Шпатаковская Г.В. Энергии связи в электронных оболочках атомов редкоземельных элементов. ЖЭТФ, 2020, 158, вып.3, стр. 430-439 DOI:10.31857/S0044451020090023.
3. Shpatakovskaya G.V. X-ray *K* and *L* terms estimation in free many-electron atoms and ions. J.Phys.: Conf. Ser. , 2020, **1556** 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1556/1/012001

ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

г.Екатеринбург, ул.Амундсеца, д.l0б
Лаборатория Пучков Частиц
Гаврилов Николай Васильевич, г.н.с., член-корр. РАН

Определение концентрации атомарного кислорода в плазме сильноточного разряда

Развитие методики измерения концентрации атомарного кислорода в плазме методом каталитического зонда, основанное на предложенном способе выделения теплового вклада процесса гетерогенной рекомбинации атомов кислорода при высокой полной мощности нагрева каталитического зонда потоками частиц и излучения из плазмы, позволило измерить степень диссоциации кислорода (до 27% от содержания O_2) непосредственно в плазме дуги в Ar/O_2 смеси низкого давления (0.2 - 0.6 Pa) с током до 70 А и выявить определяющее влияние состояния поверхности стенок реактора на достижение высокой концентрации атомарного кислорода в объеме в процессе реактивного испарения алюминия.

Литература

1. A. Kamenetskikh, N. Gavrilov, S. Krivoshapko, P. Tretnikov. Application of the catalytic probe method for measuring the concentration of oxygen atoms in Ar/O2 plasma of a low-pressure arc. Plasma Sources Science and Technology (in press).

ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская д.13, стр.2
Лаборатория №1.1 – диагностики вещества в экстремальном состоянии ОИВТ РАН
Пикуз Сергей Алексеевич, зав. лабораторией (работа выполнена совместно с НИЯУ МИФИ и Лабораторией Резерфорда-Эпплтона, Университетом Йорка, Университетом Стратклайда (Великобритания)).

Обеспечение условий прямого изохорического нагрева и сверхвысокой плотности энергии в плазме, нагреваемой лазерными импульсами петаваттной мощности.

Изучен один из подходов к достижению режима изохорического нагрева вещества при прямом воздействии сверхмощных лазерных импульсов пикосекундной длительности. Для получения плазмы с околотвердотельной плотностью было предложено одновременно обеспечить сверхвысокий временной контраст лазерных имульсов и использовать специальные твердотельные мишени с тонким пластиковым покрытием.

Экспериментальная часть работы проводились с использованием петаваттной лазерной установки Vulcan PW (CLF, Великобритания) с характерной длительностью лазерного импульса порядка 1 пс, энергии в пучке порядка 300 Дж и плотностью потока энергии на мишени около 3×10^{20} Вт/см^2. Высокий лазерный контраст, не менее 10^{10} на 1 пс, был достигнут благодаря использованию технологии OPCPA и плазменного зеркала. В качестве мишеней использовались алюминиевые и кремниевые фольги толщиной от 0.5 до 30 мкм. Наружная поверхность некоторых из них была покрыта микронным слоем пластика (CH), прозрачным для лазерного излучения. Это приводило к образованию преплазмы во внутреннем слое мишени, при этом ее наружный пластиковый слой в значительной степени удерживал плазму от расширения до прихода основного импульса.

Для определения плотности и температуры плазмы применялись рентгеноспектральные способы диагностики. В результате, было показано, что при субпетаваттной мощности основного лазерного импульса достижимый ульравысокий временной контраст не может обеспечить плотность нагреваемой плазмы выше 30% от

твердотельно. В то же время, при использовании мишеней с пластиковыми обкладками было экспериментально подтверждено получение плазменного состояния с ионной и электронной плотностями до 4×10^{22} ион/см^3 и 5.5×10^{23} электрон/см^3 (то есть порядка 80% от твердотельной), температурой порядка 500 эВ и плотностью энергии до 5×10^7 Дж/см^3, представляющее наибольший интерес для дальнейшего изучения и анализа ранее предсказанных эффектов плотности, влияющих на атомную структуру и фазовые состояния плотного нагретого вещества.

Литература

1. Martynenko A.S., Pikuz S.A., Skobelev I.Yu., Ryazantsev S.N., Baird C., Booth N., Doehl L., Durey P., Faenov A.Ya., Farley D., Kodama R., Lancaster K., McKenna P., Murphy C.D., Spindloe C., Pikuz T.A., Woolsey N. Effect of plastic coating on the density of plasma formed in Si foil targets irradiated by ultra-high-contrast relativistic laser pulses // Phys. Rev. E 101, 043208 (2020)

Лаборатория №1.5. - экстремальных энергетических воздействий

Иосилевский Игорь Львович, г.н.с., д.ф.-м.н.; **Мартынова Инна Александровна,** с.н.с., к.ф.-м.н.
(работа выполнена совместно с МФТИ)

Автомодельность нелинейного экранирования в асимметричной комплексной плазме

В данной статье показано, что вся зависимость между эффективным зарядом макроиона Z* и его исходным зарядом Z с учетом эффекта нелинейного экранирования распадается на два режима (две ветви) изменения заряда Z* – режима слабого экранирования, когда $Z^* \approx Z$, и режима сильного экранирования («насыщения»), когда $Z^* \approx const.$, с плавным, но отчетливым переходом между двумя ветвями. Предложено условие, позволяющее оценить заряд, при котором один режим изменения эффективного заряда макроиона в зависимости от Z плавно переходит в другой.

Обнаружена единая автомодельная зависимость эффективного заряда макроиона Z^* от исходного Z, полученная в приближении Пуассона-Больцмана, для различных температур системы и радиусов макроиона при фиксированной концентрации макроионов (в более общем случае, для фиксированного параметра упаковки). Также, выявлена автомодельность зависимости эффективного заряда Z* от Z для различных температур системы и параметров упаковки.

Литература

1. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., *J. of Phys.: Conf. Ser.,* **1556**, 012070 (2020) Thermodynamics of complex plasmas with two different sorts of macroions.
2. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., *Contrib. Plasma Phys.* accepted, (2020) Macroion effective charge in complex plasmas with regard to microions correlations.

Иосилевский Игорь Львович, г.н.с., д.ф.-м.н.; **Чигвинцев Александр Юрьевич**
(работа выполнена совместно с МФТИ)

Фазовый переход в однокомпонентной модели плазмы и аномалии равновесного пространственного заряда в неоднородной плазме в рамках приближения локальной плотности

Решена задача о равновесном неоднородном профиле пространственного заряда системы классических зарядов одного знака в ловушке с учетом межчастичных корреляций зарядов. Показано, что несмотря на отталкивательный характер взаимодействия зарядов, учет индивидуальных корреляций зарядов в рамках приближения Локальной Плотности (ЛТР) приводит к эффективному дополнительному

притяжению и «укручению» профиля пространственного заряда по сравнению с бескорреляционным приближением Пуассона - Больцмана.

Более того, показано, что при достаточно низких температурах этот эффект становится существенным настолько, что от количественного приводит к драматическому *качественному* эффекту – решению задачи в виде разрывного профиля пространственного заряда. Параметры этого разрыва и температура его появления точно соответствуют параметрам фазового перехода в изучавшейся авторами ранее однокомпонентной модели плазмы заряженных твердых шаров на однородном электростатическом компенсирующем фоне.

Литература

1. Chigvintsev A.Yu., Iosilevskiy I.L., Noginova I.Yu., Zorina I.G., *Phase transitions in the local equation-of-state approximation and anomalies of spatial ion profiles in non-uniform plasma,* // XXXV International conference on Equations of States for Matter Elbrus-2020 March 1-6 // Book of Abstracts - http://www.ihed.ras.ru/elbrus20/program/section.php-section=1
2. Мартынова И. А., Иосилевский И. Л., Чигвинцев А. Ю. *Учет корреляций микроионов в явлении нелинейного экранирования макроионов в асимметричной комплексной плазме* // Сборник тезисов докладов 47 Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. г. Звенигород. Москва: 16-20 марта 2020 г. Сборник тезисов с.145.

Теоретический отдел № 7 им. Л.М. Бибермана,
лаборатория №7.2 – теплофизических и кинетических свойств веществ
Дьячков Лев Гавриилович, в.н.с., д.ф.-м.н.

Комплексная плазма в тлеющем разряде в сильном магнитном поле

Для объяснения экспериментальных результатов по вращению пылевых частиц в стратифицированных разрядах постоянного тока под действием сильных магнитных полей разработана аналитическая модель. Она применена для объяснения результатов эксперимента, выполненного в Санкт-Петербургском университете, по вращению пылевых кластеров в полях $B = (1.1–2.2)\times10^4$ Гс. Модель основана на представлениях, разработанных Цендиным Л.Д. и Недоспасовым А.В., о вихревых токах в стратах, возникающих вследствие наличия скрещенных градиентов температуры и плотности электронов. На длине страты возникает два вихря тока, вращающихся в противоположных направлениях и приводящих к вращению газа вокруг оси разряда также в противоположных направлениях. В модели приближенно учитывается модуляция электрического поля, температуры и плотности заряженных частиц, характерная для страты. Положение отрицательно заряженных пылевых частиц в вертикально расположенной разрядной трубке определяется балансом действующих на них сил и условием устойчивого равновесия. Основными силами являются силы тяжести, ионного увлечения и электростатическая. В магнитном поле вдоль оси разряда в области зависания пылевых частиц в страте вращение газа, а вместе с ним и пылевых частиц, происходит против часовой стрелки, если смотреть в направлении магнитного поля. При относительно больших магнитных полях $B \geq 10^3$ Гс этот механизм вращения пылевых частиц является основным. В модели учитывается также зависимость длины страты от магнитного поля. Результаты расчета по разработанной модели хорошо согласуются с данными эксперимента, хотя простая аналитическая модель, очевидно, не может точно их воспроизвести, что связанно, очевидно, с различными случайными процессами, происходящими в страте.

Литература

1. E S Dzlieva, L G D'yachkov, L A Novikov, S I Pavlov and V Yu Karasev. Complex plasma in a stratified glow discharge in a strong magnetic field. Plasma Sources Science and Technology. 2020. V. 29. N 8. 085020. DOI: 10.1088/1361-6595/aba8cd

Лаборатория №15.1 - электрофизики и плазменных процессов
Смирнов Борис Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Процессы с участием ионов в тропосфере

Атмосферное электричество определяется ионами, находящимися в атмосферном воздухе. Эти ионы а тропосферу приходят из тропопаузы, где они образуются под действием космических лучей. Рассмотрена кинетика процессов с участием ионов. Проникая в тропосферу, эти ионы растут в результате прилипания к ним молекул воды, а также примесных атмосферных молекул на основе окислов азота, окислов серы, как и химических соединений на их основе. Далее в основной части тропосферы положительные и отрицательные ионы рекомбинируют. Движение этих ионов под действием электрического поля Земли ведет к разрядке Земли. Ее зарядка происходит внутри кучевого облака, где концентрация атмосферной воды велика. Ионы прилипают к микрокаплям воды, причем в силу разной подвижности положительных и отрицательных ионов микрокапли имеют одинаковый знак заряда, обычно отрицательный. Падение микрокапель под действием силы тяжести приводит к разделению зарядов в атмосфере. Одновременно это ведет к зарядке Земли. При типичных параметрах ионов это приводит к структуре зарядов в кучевом облаке, подобно одеялу. Более подробно эти проблемы рассмотрены в представленной монографии [1].

Литература

1. Boris M. Smirnov. Global Atmospheric Phenomena Involving Water. Water Circulation, Atmospheric Electricity, and the Greenhouse Effect. (Springer Atmospheric Sciences). 2020. 219p. ISBN 978-3-030-58038-4. ISBN 978-3-030-58039-1 (eBook). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58039-1

Жуховицкий Дмитрий Игоревич, г.н.с., д.ф.-м.н.

Новый подход к теории границы войда для комплексной плазмы в радиочастотном разряде

Рассматривается трехмерное облако пылевых частиц, сформировавшееся в радиочастотном разряде низкого давления, в условиях микрогравитации. Войдом называется пространство вблизи центра разряда, свободное от пылевых частиц. В ранее проведенных исследованиях расположение границы войда связывалось с потерей баланса сил, действующих на пылевые частицы. Однако результаты как аналитических расчетов, так и численного моделирования плохо коррелируют с экспериментальными данными. В работе предложен новый подход, предполагающий развитие неустойчивости на границе войда. В гидродинамическом приближении динамика частиц определяется уравнением Эйлера, в котором учитываются градиент давления частиц, силы электрического и ионного увлечения, которые рассчитываются на основе ионизационного уравнения состояния, а также трение частиц о газ. Из анализа на устойчивость следует пороговое условие развития неустойчивости, выполнение которого ассоциируется с формированием границы войда. Предлагаемый подход впервые объясняет обнаруженные в эксперименте зависимости положения войда от давления газа и диаметра частиц.

Численное исследование термодинамики и структуры малых кластеров в плотных парах золота с использованием EAM-потенциала

С помощью атомистического моделирования исследованы кластеры, содержащие до 30 атомов, в плотных докритических парах золота. Для этого разработан новый EAM-

потенциал для золота, применимый как к легчайшим кластерам, так и к сплошному веществу. Для фазовой границы пар–жидкость в рамках двухпараметрической модели «горячих» кластеров найдены отношение длины Толмена к радиусу молекулярной ячейки в жидкости и толщина поверхностного слоя кластеров. Проведено сравнение с классической теорией нуклеации с поправкой Толмена. Двухпараметрическая модель хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Показано, что легчайшие кластеры имеют структуру, близкую к свободно-сочлененной цепи, т.е. их можно рассматривать как квазифракталы с фрактальной размерностью близкой к двум. Структурный переход кластера из компактного в квазицепочечное состояние является кроссовером при характерной температуре порядка 2500 К.

Литература

1. Липаев А.М., Молотков В.И., Жуховицкий Д.И., Наумкин В.Н., Усачев А.Д., Зобнин А.В., Петров О.Ф., Фортов В.Е. // ТВТ **58**, 485 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20040094
2. Жуховицкий Д.И., Наумкин В.Н., Хуснулгатин А.И., Молотков В.И., Липаев А.М. // ЖЭТФ **157**, 734 (2020). DOI: 10.1134/S1063776120020090
3. Zhukhovitskii D.I., Zhakhovsky V.V. // JCP **152**, 224705 (2020). DOI: 10.1063/5.0010156

Лаборатория №18 – плазменных технологий
Гаджиев Махач Хайрудинович, зав. лаб., с.н.с., к.ф.-м.н.

Механизм выброса массы с поверхности катода из чистого вольфрама при зажигании дуги постоянного тока

Проведены исследования механизма разрушения катода из чистого вольфрама при зажигании дуги постоянного тока, которые показывают, что катод находится в жидкой форме во время зажигания дуги, и процесс его разрушения происходит за счет выброса капель с его поверхности с последующим взрывом в самой тонкой точке растяжения (Пинч). Регистрировались средняя скорость выброса и температура в точках взрыва за микросекунды до взрыва. Было получено удовлетворительное согласие экспериментальных значений длины растяжения с расчетными данными, что дает характерную среднюю скорость выдвижения кончика катода ~ 1 м/с. Предложено объяснение возникающих взрывов, развитие МГД-неустойчивости (пинч-эффект), и сделаны соответствующие временные оценки [1].

Особенности строения области привязки дуги на поверхности торированного катода в аргоновой среде атмосферного давления

Экспериментально исследованы параметры дугового разряда постоянного тока атмосферного давления в аргоне, изучен химический состав поверхности катода в зоне привязки дуги. Измерения проводились для катодов из торированного вольфрама (W-2% ThO2) для токов 200 и 300 А. Определены температура и концентрация электронов в положительном столбе, и температура поверхности катода. Выполнен расчетно-теоретический анализ распределения плотности тока и напряженности электрического поля в зоне привязки дуги. В результате было выявлено три принципиально разные зоны привязки дуги, имеющие свою напряженность поля и соответственно свою отличную от других зон плотность тока, также были определены их площади, размеры и химические составы [2].

Эффективный генератор низкотемпературной плазмы аргона с расширяющимся каналом выходного электрода

Для исследования теплофизических, электрофизических и оптических свойств аргона, а также осуществления различных плазмохимических реакций создан генератор постоянного тока высокоэнтальпийной плазменной струи аргона с самоустанавливающейся длиной дуги и расширяющимся каналом выходного электрода.

Проведен сопоставительный анализ электрофизических характеристик (ВАХ, КПД) в расширяющемся и цилиндрическом каналах постоянного сечения. Электрические, калориметрические и спектральные исследования показали, что созданный генератор низкотемпературной плазмы обеспечивает формирование на выходе из газоразрядного канала слабо расходящуюся ($2\alpha=12^0$, α — угол полураствора) плазменную струю аргона диаметром 5÷8 мм с энтальпией 5÷10 кДж/г и среднемассовой температурой 5÷12 кК с концентрацией электронов в приосевой плазме 10^{17} см$^{-3}$, при полной электрической мощности дугового разряда 2÷10 кВт и расходе плазмообразующего газа 1.5÷3 г/с. В зависимости от начальных условий на расстоянии 0÷30 мм от среза сопла генератора низкотемпературной плазмы скорость потока плазмы меняется в пределах от 990 до 300 м/с [3].

Генератор низкотемпературной плазмы с прямой дугой для плазменного переплава

Разработан и исследован при прямой и обратной полярности эффективный генератор низкотемпературной плазмы с прямой дугой для плазменного переплава с расширяющимся каналом сопла, где в качестве второго электрода выступает переплавляемый металл, с КПД≈90% и высоким ресурсом работы при силе тока до 200 А. Показано, что при изменении угла раскрытия сопла от 0° до 20° при 12° повышается устойчивость дуги. Исследованиями установлена принципиальная возможность получения сверхравновесного содержания азота (до 0,22%) в переплавленном металле [4].

Литература

1. M. A. Sargsyan, D. V. Tereshonok, M. Kh. Gadzhiev and A. S. Tyuftyaev, Mechanism of mass expulsion from the surface of a pure tungsten cathode during dc arc initiation // EPL, 2020, Vol 131(4) 45002 http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/131/45002
2. M. A. Sargsyan, D. V. Tereshonok, G. E. Valyano, V. V. Scherbakov, P. A. Konovalov, and M. Kh. Gadzhiev, Features of the arc binding region structure on the surface of the thoriated cathode in atmospheric pressured argon // Physics of Plasmas, 2020, Vol.27, 023506 http://dx.doi.org/10.1063/1.5142800
3. Гаджиев М.Х., Куликов Ю.М., Сон Э.Е., Тюфтяев А.С., Саргсян М.А., Юсупов Д.И. Эффективный генератор низкотемпературной плазмы аргона с расширяющимся каналом выходного электрода // ТВТ. Т.58.№1. С.15-24. DOI: 10.31857/S0040364420010068.
4. Гаджиев М.Х., Ильичев М.В., Тюфтяев А.С., Саргсян М.А. Генератор низкотемпературной плазмы с прямой дугой для плазменного переплава // ТВТ. Т.58. .№4.С.594-589. DOI: 10.31857/S0040364420040031.
5. Сон Э.Е., Гаджиев М.Х., Куликов Ю.М. Плазменная утилизация в проблемах экологии // ТВТ. Т.58. .№4. С. 536–562. DOI: 10.31857/S0040364420040146.

ФГБУН Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

Отдел физической электроники ФИАН (ОФЭ ФИАН)

Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик; Яландин Михаил Иванович, зав. лаб., академик; Зубарев Николай Михайлович, в.н.с., чл.-корр. РАН (работа выполнена совместно с ИСЭ СО РАН и ИЭФ УрО РАН).

Динамика и кинетика убегания электронов в газах в резко неоднородном электрическом поле

Проведено теоретическое исследование динамики и кинетики убегания электронов в воздухе в резко неоднородном электрическом поле, обусловленном геометрией электродов. Разработана кинетическая модель, основанная на решении уравнении Больцмана, обеспечивающая количественное согласие с экспериментальными данными. В

ее рамках продемонстрирована ключевая роль убегающих электронов (УЭ) в развитии волны ионизации при радиальном пробое воздушной коаксиальной линии. При этом показано, что при длительности импульса ниже некоторого порога пробой не происходит даже в присутствии УЭ, что позволило сформулировать условие сохранения электрической прочности линии: длительность импульса не должна превышать времени распространения УЭ через промежуток. Кроме того, предложен механизм расщепления потока УЭ на два отдельных потока. Он основан на том, что вторичные УЭ, генерируемые на протяжении всего промежутка при его пересечении пикосекундным потоком первичных УЭ, эмитируемых из прикатодной области, достигают анода практически одновременно, но с отставанием от первичных УЭ.

Литература

1. N.M. Zubarev, V.Y. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, G.A. Mesyats, N.S. Semeniuk, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin Mechanism and dynamics of picosecond radial breakdown of a gas-filled coaxial line. // Plasma Sources Science and Technology **29** 125008 (2020).
2. M.I. Yalandin, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, O.V. Zubareva, N.M. Zubarev Features of the secondary runaway electron flow formed in an elongated, atmospheric pressure air gap. // Physics of Plasmas **10** 103505 (2020).

Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Баренгольц Сергей Александрович, гнс, д.ф.-м.н, Окс Ефим Михайлович, зав.лаб., д.т.н. (ИСЭ СО РАН), Юшков Георгий Юрьевич, гнс, д.т.н. (ИСЭ СО РАН), Уйманов Игорь Владимирович, снс, к.ф.-м.н (ИЭФ УрО РАН), Шмелев Дмитрий .Леонидович снс, к.ф.-м.н (ИЭФ УрО РАН)

(работа выполнена совместно с ИСЭ СО РАН, ИЭФ УрО РАН и ИОФ РАН).

Генерация ионов дейтерия в вакуумно-дуговых источниках нейтронов.

Определены оптимальные условия генерации ионов дейтерия (длительность импульса, ток разряда) в вакуумно-дуговых источниках нейтронов. Установлено, что при длительности разрядного импульса в единицы микросекунд и токе порядка килоампера, относительное содержание ионов дейтерия в дуговой плазме в два раза превышает содержание дейтерия в катоде. Показано, что при функционировании индивидуальной ячейки катодного пятна вакуумной дуги (эктона), непосредственно в плазменную струю ячейки поступает лишь небольшая часть от полного количества десорбируемых атомов дейтерия. Основная их часть десорбируется с катода при остывании кратера и из прилегающей к нему области. В найденных оптимальных условиях функционирования вакуумного дугового разряда весь десорбируемый дейтерий эффективно ионизуется в плазме группового катодного пятна, образованной при смешивании отдельных плазменных струй близко расположенных ячеек.

Литература

1. Uimanov I.V., Shmelev D.L., Oks E.M., Yushkov G.Y., Barengolts, S. A. Cathode and plasma phenomena in vacuum-arc sources of hydrogen isotope ions: I. Desorption of hydrogen isotopes during the operation of vacuum arc cathode spots. // Plasma Sources Science and Technology **29(1)** 015021 (2020).
2. Barengolts S.A., Frolova V.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P., Shmelev D. L., Uimanov I.V. Yushkov G. Y. (2020). Cathode and plasma phenomena in vacuum-arc sources of hydrogen isotope ions. II. Ionization processes in the arc plasma. // Plasma Sources Science and Technology **29(3)** 035004 (2020)

Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Баренгольц Сергей Александрович гнс, д.ф.-м.н, Цвентух Михаил Михайлович снс, к.ф.-м.н., Юшков Георгий Юрьевич, гнс, д.т.н. (ИСЭ СО РАН).
(Работа выполнена совместно с ИСЭ СО РАН, ИОФ РАН и Университетом г. Нагоя, Япония).

Эрозионные характеристики и параметры дуговой плазмы вольфрама, подвергнутого воздействию гелиевой плазмы

При инициировании униполярных дуг в ИТЭР наибольший интерес представляет поступление в реакторную плазму материала дивертора - вольфрама, атомы и ионы которого способны ионизоваться до высоких зарядовых состояний с соответствующим поглощением энергии реакторной плазмы. Установлено, что образование наноструктурированной поверхности на поверхности вольфрама (W-fuzz) при воздействии гелиевой плазмы (основного продукта термоядерной реакции) приводит к резкому росту скорости эрозии дивертора при функционировании дугового разряда. Показано, что причиной этого роста является изменение электро- и теплофизических характеристик, а также параметров взрывоэмиссионных процессов при образовании наноструктурированного поверхностного слоя. Эти изменения приводят также к снижению эффективности ионизационных процессов в дуговой плазме, поэтому в ней присутствуют только однозарядные ионы вольфрама

Литература

1. Barengolts S.A., Hwangbo D., Kajita S., Ohno N., Frolova V.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Tsventoukh M.M., Shmelev D.L., Yushkov, G. Y. Dynamics of the changes in the parameters of the arc plasma during the destruction of a helium-induced tungsten fuzz by arc pulses. // Nuclear Fusion, **60(4),** 044001 (2020).

Урюпин Сергей Александрович, гнс, д.ф.-м.н, Вагин Константин Юрьевич снс, к.ф.-м.н, Мамонтова Татьяна Вячеславовна м.н.с.

Влияние столкновений электронов на скин-эффект в фотоионизованной плазме инертных газов.

Изучено взаимодействие монохроматического электромагнитного излучения с фотоионизованной плазмой, образованной при многофотонной ионизации атомов инертных газов. Показано, как столкновения электронов с нейтральными атомами влияют на поверхностный импеданс и коэффициент поглощения. В режимах высокочастотного и нормального скин-эффектов выявлена возможность значительного увеличения коэффициента поглощения, что обусловлено проявлением эффекта Рамзауэра-Таундсена. Установлены условия, в которых взаимодействие пробного низкочастотного излучения с фотоионизованной плазмой инертных газов подобно взаимодействию с диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, имеющей малую мнимую часть.

Литература

4. Vagin K.Yu., Mamontova T.V., Uryupin S.A. . Impact of electron collisions on the skin effect in a photoionized inert gas plasma. // Physical Review A **102(2)** 023105 (1-10) (2020).
5. Vagin K.Yu., Mamontova T.V., Uryupin S.A. . High-frequency skin effect in a photoionized inert gas plasma. // Journal of Physics Conference **1692** 012005 (1-5) (2020).

Отдел оптики низкотемпературной плазмы
Очкин Владимир Николаевич, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

Новый подход к измерениям функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в плазме

С.Н. Андреев, А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин

Метод разработан для зондовых исследований ФРЭЭ в условиях низкой плотности тяжелых частиц, моделирующих плазму пристеночного слоя первой стенки термоядерных реакторов в областях соединения элементов стенки. Предложены и реализованы новые полходы к формированию вольт-амперных характеристик (ВАХ) зонда при наложении комбинаций циклических и шумовых форм напряжения с оптимальными соотношениями вкладов для различных областей энергий ФРЭЭ. Для повышения точности измерений в заданном интервале энергий возможно использование неравномерного распределения формирующих ВАХ сигналов. Для управления сигналами и восстановления ФРЭЭ из ВАХ применяются алгоритмы, учитывающие статистические погрешности. Это позволяет проводить измерения ФРЭЭ в диапазоне не менее 4 порядков величины при плотностях электронов 10^{11}-10^{12}см$^{-3}$. Последнее важно для спектрскопии неравновесной плазмы, поскольку излучающие возбужденные электронные состояния частиц возбуждаются, в основном, электронами с энергиями, в несколько раз превышающими средние. Измерения демонстрируют наличие особенностей ФРЭЭ в области больших энергий.

Литература

1. S.N. Andreev, et al., The Langmuir probe measurements in a low-pressure discharge supported by hollow cathode using the combined periodic and noise sweep signals, Vacuum, 180, 109616 (2020). https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616
2. S.N. Andreev, et al., Increasing the measurement range of plasma electron parameters in the single Langmuir probe method, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 47, 317 (2020) https://doi.org/10.3103/S1068335620100024

Влияние скорости перестройки частоты на спектр слабого поглощения частиц во внешнем резонаторе с не осевым вводом лазерного излучения

Лагунов В.В., Николаев И.В., Очкин В.Н

Исследовано влияние скорости записи спектра на вид контура линии поглощения молекулы H_2O 7180.37см$^{-1}$для перехода P(4) (000-200). При измерениях методом ДЛС с узкой (~10^{-4}см$^{-1}$) линией генерации во внешнем резонаторе. Измерения проводились при давлении газа ~ 1мбар, доплеровская ширина линии поглощения ~10^{-2}см$^{-1}$. Скорость перестройки частоты лазера варьировалась в диапазоне (1-8)$\cdot 10^2$ см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$. Обнаружено, что с увеличением скорости перестройки контур линии поглощения искажается. Использовались зеркала резонатора с коэффициентами отражения 99 и 99,98%. Эффект усиливается с увеличением добротности резонатора.

Эффект связан с «инерционностью» оптического резонатора, если оптический путь превышает длину когерентности излучения. Во время записи спектра может происходить многократный сбой фазы световой волны и при детектировании складываются не световые поля, а интенсивности. Поэтому измерения, например, температуры газа, при больших скоростях сканирования доплеровского контура приведут к ошибочным результатам. Значимые искажения наступают, если время записи спектра становится меньше времени жизни фотона в резонаторе. Характер искажений зависит от направления перестройки частоты (в большую или в меньшую сторону).

Построена модель явления, расчеты согласуются с наблюдениями. Оказалось, что интегральный коэффициент поглощения также не сохраняется при изменении скорости сканирования. Эффект носит фундаментальный и, одновременно, прикладной характер, поскольку вся абсорбционная спектроскопия основана на измерениях интегрального поглощения в соответствии с классическим интегральным соотношением Кравеца.

Практический вывод состоит в том, что при разработке спектральных абсорбционных методов анализа с большими оптическими длинами необходимо устанавливать компромисс между чувствительностью и быстротой измерений.

Литература

1. В.В. Лагунов, И.В. Николаев, В.Н. Очкин. Влияние скорости перестройки частоты на спектр слабого поглощения частиц во внешнем резонаторе с не осевым вводом лазерного излучения // Сборник тезисов IX Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики". Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2020. С. 73-74.