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

Научный совет Российской академии наук по физике низкотемпературной плазмы

ОТЧЕТ
Научного совета за 2025 год

Председатель Научного совета РАН
по физике низкотемпературной плазмы,
академик РАН Петров О.Ф.

МОСКВА 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы 3
ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА.....3
МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА 4
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2025 г. 5
АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») 5
ФГБУН «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН).....7
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» 8
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» 10
ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН) 11
ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН) 12
ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).....12
ФГУФИЦ Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН) 16
ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).....17
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).....25

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

Заседания

1. 13 ноября – Заседание бюро Научного совета.
2. 23 декабря – Заседание Научного совета

Основные конференции с участием Совета в 2025 г.:

1. XL Fortov International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (IIEFM 2025), March 1–6, 2025, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia.
2. LII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 17 – 21 марта 2025 г., г. Звенигород Московской обл., Россия.
3. Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике (WSMPA 2025), 20 – 22 мая, 2025 г., Москва.
4. 11-я Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (PPPT-11), 15 – 19 сентября 2025 г., Минск, Беларусь.
5. XVII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», 1 – 4 октября 2025 г., Казань, Россия.
6. VI Международная конференция "Газоразрядная плазма и синтез наноструктур" (GDP-NANO 2025), 25 – 27 ноября 2005 г. Казань, Россия.
7. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», 26 – 27 ноября 2025 г., Москва, Россия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2025 г.

АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»
(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)
108840, Москва, Троицк, ул. Пушковых, владение 12
Лаборатория кинетики слабоионизированной плазмы
Акишев Юрий Семенович, начальник лаборатории, д.ф.-м.н., профессор

Irradiation of Mesenchymal Stem Cells with an Argon Plasma Jet with Various Oxygen Admixtures

The usage of a low-temperature plasma (LTP) jet to activate the nutrient liquid medium αMEM containing mesenchymal stem cells (MSCs) isolated from the bone marrow of Wistar rats is investigated. The LTP jet had been created by an axially symmetric barrier discharge with a thin rod electrode located inside a quartz tube along its axis. The tube has been purged with argon at a flow rate of about 25 m/s at the tube output. The conditions under which LTP activation of the αMEM medium can accelerate MSC proliferation have been studied. It turns out that the final effect of the activated liquid medium on cells strongly depends on the purity of argon used to form the plasma jet. A small admixture of oxygen in argon at a level of 700 ppm leads to the formation of active oxygen species in the discharge and in the plasma jet, as well as ozone at a fairly high concentration. Ozone supplied by a jet into a liquid medium dissolves well in it and, as a strong oxidizer, can have a detrimental effect on stem cells. The results on the difference in the composition of active particles in plasma jets in pure argon and in argon with a small admixture of oxygen are presented, as well as the results of microbiological studies on the effect of two types of plasma jets on mesenchymal stem cells.

Литература

1. A. E. Zakharchenko, P. A. Domnin, E. V. Kalinin, A. G. Grosheva, A. V. Petryakov, M. A. Medvedev, E. A. Fefelova, K. Hajisharific, E. Heydaric, H. Mehdian, E. Robert, A. Stancampiano, S. A. Ermolaeva, and Yu. S. Akishev // *Plasma Physics Reports*, 2025, Vol. **51**, No. 2, pp. 133–147.

Coaxial barrier discharge in argon flow excited by pulse groups of periodic voltage: Plasma structures formation in the discharge zone and plasma jet

A coaxial barrier discharge in an argon flow at atmospheric pressure was studied. The discharge was excited by short pulses of sinusoidal voltage, the repetition frequency of which varied. This article presents the results of experimental studies on the dynamics of plasma structures created inside a discharge tube and in a plasma jet. The influence of the previous pulse group on the discharge and plasma jet structures in the subsequent pulse group was established by varying the repetition frequency of the pulse groups. It was found that at a low repetition frequency, streamers in the jet have a snake shape, and at a high frequency, streamers propagate in the jet in a straight line along its axis. Using high-speed and multi-frame imaging of the discharge, the formation of diffuse and constricted plasma structures inside the discharge zone and in plasma jet has been established. It is shown that the diffuse and constricted plasma structures inside a discharge tube, in fact, are the surface ionization waves identical to both the ionization waves propagating inside long capillary tube and along flat dielectric barrier in a surface barrier discharge.

Литература

1. Yu. Akishev, S. Ermolaeva, M. Medvedev, A. Petryakov, K. Hajisharifi, H. Mehdian, and E. Robert. // *Phys. Plasmas* **32**, 073501 (2025); doi: 10.1063/5.0272401

Отделение физики токамаков-реакторов и токонесущей плазмы
Клочков Иван Дмитриевич, заместитель директора отделения-начальник отдела
Блок главного конструктора
Пискарев Павел Юрьевич, главный конструктор

Разработка, изготовление опытных образцов и испытания ключевых систем комплекса ТРТ

Целью научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы является разработка, изготовление и испытания опытных и экспериментальных образцов систем и компонентов ТРТ в период 2025-2026 годов (системы управления плазмой; системы криогенного обеспечения; комплекса электромагнитной системы удержания плазмы; комплекса компонентов, обращенных к плазме).

Выполнена разработка расчетно-конструкторской и текстовой документации, опытное изготовление и испытания элементов опытных образцов ряда ключевых систем комплекса ТРТ, позволяющих уточнить заложенные в технический проект ТРТ параметры и характеристики отдельных компонентов систем и внести корректировки в материалы технического проекта на этапе актуализации. Создан рабочий проект программно-аппаратного комплекса для полунатурных испытаний системы управления плазмой ТРТ, а также изготовлена аппаратная часть комплекса, позволяющая на последующих этапах работы провести полноценные испытания разработанной для проекта ТРТ системы управления плазмой с использованием реальной аппаратной части и плазмы, заданной виртуальной моделью.

Впервые разработана конструкция обращенных к плазме элементов первой стенки ТРТ с бериллиевой облицовкой, рассчитанная на работу в условиях пиковых тепловых нагрузок до 4 МВт/м^2 в условиях взаимодействия с жидким/парообразным литием. Наличие лития внутри вакуумной камеры ТРТ является ключевым фактором, ограничивающим возможности применения конструкторских решений первой стенки, разработанных и испытанных в рамках проекта ИТЭР. Для проекта ТРТ разработана конструкция элементов первой стенки, имеющая повышенную стойкость в литии за счет применения защитных покрытий/плакировки и более стойких к литию материалов. Это, в свою очередь, потребовало разработки новых технологий: технологии наплавки бронзы в стальной кожух; технологии пайки стойким в литии припоем. Разработана конструкция и способ изготовления методом литья под флюсом, а также изготовлены опытные образцы биметаллического водоохлаждаемого основания элементов первой стенки, имеющих наружный слой из коррозионностойкой стали, обладающей более высокой стойкостью в литии. Проведенные гидравлические (при давлении до 7,15 МПа) и вакуумные испытания (с нагревом до 200 °С и давлении гелия до 4 МПа) изготовленных образцов подтвердили достижение необходимой герметичности всех сварных соединений и биметаллической композиции.

Впервые разработана конструкция малого макета наиболее энергонапряженной диверторной мишени, рассчитанной на длительную эксплуатацию (до 5000 циклов) при пиковой тепловой нагрузке 15 МВт/м^2 и ограниченную эксплуатацию (300 циклов) при пиковой нагрузке 25 МВт/м^2 (переходные процессы). Проведенные предварительные термоциклические испытания позволили подобрать и обосновать конструктивные параметры макета (размер плиток вольфрамовой облицовки, размер и конфигурация канала охлаждения), что позволило на этапе окончательных испытаний подтвердить достижение необходимого ресурса (5000 циклов и 300 циклов на разном уровне нагрузки) без существенных повреждений макетов.

Разработка технического проекта комплекса токамак с реакторными технологиями

Целью научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы является разработка технического проекта комплекса токамак с реакторными технологиями (ТП

ТРТ) в части всех ключевых подсистем установки и инфраструктурных систем комплекса в период 2025-2026 годов.

Впервые выполнена проработка компоновки, конструкции общего вида и принципиальных схем основных и вспомогательных систем комплекса установки ТРТ, позволяющая интегрировать все системы в общий единый комплекс, проанализировать и согласовать сопряжение и взаимные интерфейсы систем, выработать рекомендации, требования и исходные данные для последующих уточнений, актуализации конструкции и технических параметров систем. Комплекс ТРТ включает в себя вакуумную камеру (диаметр - 6,7 м, высота - 3,9 м) и набор обмоток электромагнитной системы из 16 катушек обмотки тороидального поля, 4 обмоток индуктора, 6 обмоток управления, 3 обмоток корректирующих катушек, обмотки горизонтального управляющего поля, обеспечивающих формирование плазменного шнура с параметрами: R = 2,15 м; r = 0,57 м; a = 1,8 м; B = 8 Тл; I_p = 5 МА. Три системы дополнительного нагрева плазмы: система нейтральной инжекции, система электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева, система ионно-циклотронного резонансного (ИЦР) нагрева обеспечивают ввод в плазму не менее 40 МВт мощности, а также дополнительное увлечение тока плазмы, с целью получения длительности разряда не менее 100 секунд.

Впервые определена компоновка, расположение относительно токамака, конструкции основных узлов гиротронного комплекса, включающего 16 гиротронов, размещаемых на втором этаже отдельного здания на расстоянии не менее 70 метров от оси токамака, излучение от которых передается по волноводным линиям в два соседних экваториальных патрубка вакуумной камеры. Указанная дистанция между токамаком и гиротронным комплексом необходима для исключения негативного влияния магнитного поля рассеяния электромагнитной системы токамака на работу гиротронов. С учетом ожидаемого значения КПД гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц, а также потерь мощности при передаче излучения, система из 16 гиротронов сможет обеспечить ввод не менее 12 МВт мощности в плазму за счет ЭЦР нагрева.

По результатам работ в 2025 году и проведенного анализа разработанных материалов сформулированы рекомендации, требования и предварительные исходные данные для инициации и проведения работ, результаты которых позволят провести дальнейшую актуализацию разработанных материалов ТП, включая актуализацию функционально-технологических, конструктивных и инженерно-технических решений комплекса ТРТ, что позволит обеспечить согласованность решений всех материалов технического проекта и осуществить выпуск ТП комплекса ТРТ.

ФГБУН «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН)

119991, Москва. Ленинский проспект , 29

Кашапов Наиль Фаикович, д.т.н., профессор, зам. руководителя ИММ ФИЦ КазНЦ РАН

Исследование теплового баланса в системе «металлический электрод – плазменная парогазовая оболочка – электролит»

Электролитно-плазменная обработка металлов и сплавов (ЭПО) – перспективный метод поверхностной обработки, сочетающий электрохимическое воздействие и локальный высокотемпературный разряд в электролите.

При изучении распределения тепловых потоков в межэлектродном пространстве баланс тепла можно записать следующим уравнением:

$$+ \quad _{\text{r ac}} = \quad _{a} + \quad _{k} + \quad _{\text{sol}} + \quad _{vap} + \quad _{rad} \qquad (1)$$

где количество теплоты, выделяемое током в плазме и электролите; $Q_{\text{r ac}}$ теплота химических реакций (например, окисления анода); $_a$ и $_k$ тепло, переданное, соответственно, аноду (детали) и катоду; Q_{sol} - теплота, ушедшая на нагрев жидкого электролита; $_{vap}$ – тепловой поток, унесенный образующимся паром; $_{rad}$ – потери на излучение в окружающую среду. Левая часть уравнения (1) характеризует приход энергии, правая – ее распределение между компонентами системы.

Расчеты показывают, что до ~50–55 % энергии тока поглощается электролитом и уносится в виде нагревающейся жидкости. Около 10–15 % уносится испаряющейся влагой и излучением в окружающую среду. На нагрев самих электродов расходуется сравнительно меньшая доля энергии: порядка 30–35 % уходит в массивный катодный модуль и лишь 3–5 % – непосредственно в обрабатываемый металлический анод. Электропроводность плазмы, коэффициенты теплоотдачи и др. подбираются согласно данным литературы и результатам собственных экспериментов [1]. Существует оптимальный диапазон U, в котором локальный тепловой режим наиболее интенсивен.

Усредненные результаты баланса хорошо описывают общие тенденции, позволяющие оптимизировать режимы обработки.

В межэлектродном промежутке gадение потенциала на электролите составило 26 В, на разряде 124 В при напряжении 150 В и токе 1.8 А для 5% раствора NaOH. Падение напряжения в основном происходит на паровоздушной оболочке, напряженность поля в оболочке составила 4·103В/см. Позволило получить порошок цинка применимый для 3D печати [2-5].

Литература

1. Кашапов Н.Ф., Кашапов Л.Н., Чебакова В.Ю., Кашапов Р.Н.// Современные наукоемкие технологии. 2025. № 12. С. 84-88; DOI: https://doi.org/10.17513/snt.40608
2. Kashapov N.F., Kashapov L.N., Chebakova V.Yu. // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2026. Т. 19. № 1. С. 92-105.
3. Chebakova V., Kashapov L., Kashapov N., Dmitriev M.//Match: Communications in Ma h ma ical and Compu r Ch mis ry. 2026. Т. 95. № 2. С. 441-456. DOI: 10.46793/match.95-2.11925
4. Шустова Е.П., Шустова К.П., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю., Минабутдинов Д.К. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025692387, 21.11.2025.
5. Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю., Кашапов Л.Н., Хафизова А.Д., Гильман Д.М.//Современные наукоемкие технологии. 2025. № 11. С. 66-72. DOI: 10.17513/snt.40568

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» (ДГУ)

367001, Махачкала. М.Гаджиева, 43а

Научно-образовательный Центр «Физика плазмы»

Ашурбеков Назир Ашурбекович,

научный руководитель НОЦ «Физика плазмы», заведующий кафедрой физической электроники, д.ф.-м.н., профессор

Разработка и исследование широкоапертурного источника потоков низкоэнергетичных ионов для прецизионных технологий атомно-слоевого травления материалов микро- и наноэлектроники

Представлены результаты экспериментального исследования по разработке и тестированию плазменного реактора, который может быть использован для контролируемого атомно-слоевого травления сверхтонких слоев материалов микро- и наноэлектроники с помощью потоков низкоэнергетичных ионов аргона [1-3]. Для генерации таких потоков ионов использовался ленточный электронный пучок,

генерируемый импульсно-периодическим разрядом с протяженным полым катодом и сетчатым анодом в диапазоне давлений газа 0.05–0.5 Торр, с амплитудой импульсов напряжения до 1.5 кВ. Катод представлял собой цилиндрический стержень из нержавеющей стали длиной 25 мм и диаметром 12 мм с прямоугольной полостью (щелью) шириной 3, 4 или 5 мм и глубиной 6 мм. Сеточный анод из нихрома расположен на расстоянии 6 мм от катода. Размер ячейки сетки составлял 25×25 мкм, толщина проволоки – 25 мкм, а геометрическая прозрачность – около 70%. Электронный пучок вытягивается ускоряющим напряжением на электроде, расположенном в 1 мм от сетчатого анода. Далее электронный пучок транспортируется на 15 мм к коллектору, формируя “плазменный лист” площадью 15×25 мм², который выступает в роли эмиттера широкоапертурных потоков ионов, бомбардирующих поверхность подложки. Плазменный источник ионных потоков, состоящий из протяженного полого катода, электродной системы формирования «плазменного листа» и системы формирования ионного потока на поверхность подложки. Для подачи напряжения на электроды плазменного источника использовался фланец стандарта CF2.75 с электрическими вакуумными вводами.

Экспериментально определены зависимости однородности “плазменного листа” от характеристик полого катода, давления газа и потенциала на коллекторе. Показано, что в полом катоде формируются электроны ленточного пучка с концентрацией около 10^{12} $см^{-3}$, с энергией электронов пучка до 1.1 кэВ. Плотность электронов и ионов в «плазменном листе» достигает в максимуме величины 10^{11} $см^{2}$, энергия ионов вблизи поверхности подложки регулируется в диапазоне 1-50 эВ. Экспериментально установлено, что при энергии пучка свыше 1 кэВ достигается высокая пространственная однородность свечения плазмы в «плазменном листе», что является необходимым условием для формирования однородного ионного потока по большой площади.

Разработана кинетическая модель плазменного источника ионов аргона для данной геометрии реактора. Выполнены расчеты функции распределения электронов по энергиям в плазменном столбе наносекундного разряда в аргоне с протяженным полым катодом методом Монте-Карло на различных стадиях развития разряда. Приведены результаты расчетов ФРЭЭ для разных стадий развития разряда на различных расстояниях от дна полости в катоде [4].

Литература

1. N.A.Ashurbekov, M.Z. Zakaryaeva, K. O. Iminov, K. M. Rabadanov, G. S. Shakhsinov, H.Sh.Hizriev./ Wide-aperture source of low-energy ion beams for precision additive manufacturing // Journal of Surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2025. Vol. 12, Issue 6.
2. Н. А. Ашурбеков, М. З. Закарьяева, К. О. Иминов, К. М. Рабаданов, Г. Ш. Шахсинов, Х.Ш. Хизриев. Широкоапертурный источник потоков низкоэнергетичных ионов для прецизионных аддитивных технологий.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2025. Т.19, №12.
3. N.A. Ashurbekov, M.Z. Zakaryaeva, K.O. Iminov, K.M. Rabadanov, G.S. Shakhsinov, H.SH. Hizriev. Wide-aperture source of low-energy ion beams for precision additive manufacturing.// 17TH International Conference "gas discharge plasmas and their applications" GDP 2025 (Ekaterinburg, September 8–12, 2025): ABSTRACTS. – Ekaterinburg: IEP UB RAS, 2025. P.141.
4. Н.А.Ашурбеков, К.О. Иминов, М.З. Закарьяева, А.А Муртазаева, К.М.Рабаданов, Г.Ш.Шахсинов, Х.Ш. Хизриев. Плазменный реактор для прецизионных аддитивных технологий на основе протяженного полого катода. //В сборнике материалов международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала, ДФИЦ РАН. 2025.
5. N. A. Ashurbekova, M. Z. Zakaryaevaa, K. O. Iminova , K. M. Rabadanova, G. S. Shakhsinova and A. A. Murtazaevaa. Kinetic Monte Carlo Simulation of the Electron Energy Distribution Function Formation in a High-Voltage Pulsed Discharge with an

Extended Hollow Cathode in Argon.// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2025, Vol. 89, No. 10, pp. 1990–1995. DOI: 10.1134/S106287382571284X.

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

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1.

Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества

Группа плазменной газодинамики и визуализации потоков

Знаменская Ирина Александровна, профессор, д.ф.-м.н.

Проведены экспериментальные исследования на стенде УТРО-3 пространственного распределения 1) видимого 2) инфракрасного (1,5-5,1 мкм) излучения наносекундных разрядов: поверхностного скользящего разряда и комбинированного объемного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с обтекаемым осесимметричным телом в канале – конусом, затупленным по сфере.

Сверхзвуковые потоки с числами Маха 1.36–1.60 создавались за плоскими ударными волнами с числами Маха 3.0-4.4 в канале ударной трубы прямоугольного сечения. Стационарное газодинамическое течение в рабочей (разрядной) камере включало ударные волны, генерируемые при обтекании тела, и отраженные от стенок канала. Структура потока визуализировалась прямым теневым методом, путем регистрации свечения разрядов фотокамерами, электронно-оптической камерой, тепловизором.

Импульсные разряды реализовались при импульсном напряжении 25 кВ на поверхности или в объеме канала стенда протяженностью 100 мм по направлении потока. Проанализированы пространственно-временные характеристики излучения разрядов, инициированных на различных стадиях газодинамического течения. Проведены цифровая обработка и анализ изображений излучения, полученных при развитии разрядов, а также их сравнение с теневыми изображениями поля течения. Показана связь распределения свечения объемного разряда в сверхзвуковых потоках с характером и состоянием пограничного слоя на стенках канала, включая окна разрядной камеры.

Участие в работе 1) XXIV Международного Совещания по магнитоплазменной аэродинамике (Оргкомитет, 4 доклада, 1 пленарный); 2) LII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (2 доклада).

Литература

1. Diffracted shock wave propagation in a pulsed volume discharge plasma / A. Ivanova, I. Mursenkova, I. Kryukov et al. // Physics of Fluids. — 2025. — Vol. 37, no. 3. — P. 036136. https://doi.org/10.1063/5.0258844
2. Znamenskaya I., Muratov M., Dolbnya D. Ir-thermography studies of high-speed gas-dynamic flows // International Journal of Thermal Sciences. — 2025. — Vol. 214. — P. 109827. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.109827
3. Экспериментальное исследование локализации импульсного комбинированного разряда в структурированном потоке за ударной волной / Д. Татаренкова, И. А. Знаменская, Т. А. Кули-Заде, Н. Н. Сысоев // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2025. — Т. 26, № 8. [DOI]
4. Evolution of thermal fields on a streamlined surface heated by a shock wave and plasma of a pulsed surface discharge / I. A. Znamenskaya, M. I. Muratov, M. A. Bogdanova et al. // Fluid Dynamics. — 2025. — Vol. 60, no. 61. [DOI]
5. Эволюция тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и плазмой импульсного поверхностного разряда / И. А. Знаменская, М. И. Муратов, М. А. Богданова и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2024. — Т. 25, № 6. — С. 1150. [DOI]

6. Исследование наносекундного поверхностного скользящего разряда в нестационарном сверхзвуковом потоке воздуха в канале / И. В. Мурсенкова, И. Э. Иванов, А. С. Сазонов, Н. Н. Сысоев // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2025. — № 1. — С. 202–213.

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

119991, Москва. Ленинский проспект , 29

Лаборатория плазмохимии и физикохимии импульсных процессов

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

Тлеющий разряд атмосферного давления в смеси метана и углекислого газа

В связи с ростом проблем антропогенных выбросов CO2 использование углекислого газа в качестве сырья стало темой особой важности. Перспективным для решения этой проблемы представляется использование низкотемпературной плазмы и для этого используются разные типы электрических разрядов. Во многом это связано с тем, что плазма проявляет каталитические свойства и для реализации химических процессов нет необходимости использования катализаторов.

Большое место в этих исследованиях занимает процесс углекислотного риформинга метана. В нем, с одной стороны, происходит разложение парниковых газов. С другой стороны, в результате процесса получается синтез-газ (смесь H_2 и CO), который является основой многочисленных химических синтезов.

В настоящем исследовании на основе проведенных экспериментов анализируются возможности использования тлеющего разряда постоянного тока и разряда на промышленной частоте в смеси CH_4 и CO_2 при атмосферном давлении для получения синтез-газа.

Показано, что при соотношении скоростей входного потока $F(CO_2)/F(CH_4)=1$ в разряде происходит образование сажи, сопровождающееся искрением электродов и появлением токовых скачков. В этом режиме наблюдается интенсивное излучение полос Свана. При $F(CO_2)/F(CH_4)=2$ и 3 образование сажи не наблюдается, полосы Свана исчезают, и появляется интенсивная полоса излучения радикала OH. Наблюдаемые полосы излучения используются для определения вращательных и колебательных температур молекул C_2 и OH в разряде.

Хроматографический анализ продуктов показал, что основными продуктами на выходе из разряда являются H_2, CO и неразложившийся CO_2. Эффективность разложения CH_4 и CO_2 в разряде постоянного тока зависит от расположения катода относительно места ввода газовой смеси. Сравнение с результатами, полученными при возбуждении разряда на частоте 50 Гц, показало, что разряд постоянного тока в месте расположения катода в противоположной от места ввода газа области является предпочтительным подходом как для получения синтез-газа, так и для разложения CO_2. Так, степень разложения метана достигает 95 %, максимальная концентрация водорода в смеси на выходе из разряда постоянного тока достигает 55 %, а максимальная степень разложения CO_2 составляет около 90 %. Отношение потоков CH_4 и CO_2 на входе в разряд является определяющим параметром, который определяет как состав смеси на выходе из разряда, так и степень разложения компонентов смеси.

Максимальная энергетическая эффективность образования H_2 составляет 100 л/кВт·ч, минимальное энергопотребление при разложении CO_2 — 55 л/кВт·ч.

Литература

1. Timur Batukaev, Irene Epstein, Yuri Lebedev, Atmospheric pressure glow discharge in a mixture of carbon dioxide and methane, Plasma Processes and polymers, 2025, e70043 https://doi.org/10.1002/ppap.70043

2. Т.С. Батукаев, Ю.А. Лебедев. Углекислотный риформинг метана в тлеющем разряде на частоте 50 гц при атмосферном давлении, Физика плазмы, 2025, том 51, №3, с. 342–348 DOI: 10.31857/S0367292125030095

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

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
Лаборатория физической электроники
Уйманов Игорь Владимирович,с.н.с., к.ф.-м.н.

ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)
119333, Москва. Ленинский проспект, 53
Лаборатория плазменной электроники
Отдел физики плазмы
Баренгольц Сергей Александрович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Пространственно-временные параметры формирования кратера на катоде при функционировании ячейки катодного пятна вакуумной дуги

Разработана модель процессов формирования микрократеров на катоде при функционировании ячейки катодного пятна вакуумной дуги. Модель включает в себя систему уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью и уравнение теплопроводности с учетом конвективного переноса тепла. Выбор параметров взаимодействия плазмы катодного пятна с поверхностью катода осуществлялся на основе анализа экспериментальных данных о параметрах и механизме формирования кратеров. С момента образования расплава, в модели проводился расчет изменения формы катода за счет движения жидкометаллической фазы под действием плазменного давления. Получены расчетные данные по основным геометрическим параметрам кратеров (диаметр, глубина), а также времени их формирования в зависимости от времени жизни ячейки катодного пятна.

Литература

1. Uimanov I.V., Zemskov Yu.A., Muzyukin I.L., Mikhailov P.S., Barengolts S.A., Shmelev D.L. Space-time parameters of the formation of a cathode crater during the operation of a cathode spot cell in a vacuum arc // Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 137. – art. no.243302. https://doi.org/10.1063/5.0275388

ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

634055, г. Томск, Академический проспект, д. 2/3
Лаборатория низкотемпературной плазмы
Ландль Николай Владимирович зав. лабораторией, к.ф.-м.н.; Королев Юрий Дмитриевич, г.н.с., д.ф.-м.н.; Франц Олег Борисович, н.с.;
Болотов Александр Владимирович, вед. электроник

Методы запуска псевдоискрового разрядника с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда

На разработанном в ИСЭ СО РАН отпаянном псевдоискровом разряднике с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда выявлены физические причины формирования паразитного тока, протекающего из узла запуска на основную заземленную катодную полость разрядника. Показано, что паразитный ток обусловлен наличием разности потенциалов между плазмой в узле запуска и катодной полостью. Для условий, когда паразитный ток формируется ионами из плазмы отрицательного свечения или

положительного столба, величина этого тока не превышает 50 мкА. В условиях, когда паразитный ток формируется электронами из плазмы положительного столба, величина паразитного тока может превышать 100 мкА, но для данной конструкции разрядника этот ток не приводит к снижению пробивного напряжения основного промежутка разрядника.

Проведены анализ и испытания 16 возможных методов запуска при различных полярностях напряжения источника питания разряда вспомогательного разряда. Выявлены методы запуска и режимы поддержания вспомогательного разряда, при которых обеспечиваются минимальные времена запаздывания срабатывания разрядника менее 100 нс и стабильность срабатывания разрядника с разбросом не хуже ± 1 нс. Данные параметры достигаются в условиях, когда паразитный ток формируется электронами, а метод запуска основан на переключении тока вспомогательного разряда на основную катодную полость разрядника.

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники
Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Прокопенко Никита Андреевич, м.н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.; Толкачев Олег Сергеевич, м.н.с.; Ахмадеев Юрий Халяфович, зав. лабораторией, к.т.н.; Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Крысина Ольга Васильевна, с.н.с., к.т.н.

Дифракционное исследование в режиме реального времени электродугового плазменно-ассистированного метода формирования многоэлементных высокоэнтропийных пленок

Используя источник синхротронного излучения – накопитель электронов ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН), были выполнены *in situ* рентгенофазовые исследования процесса формирования фазового состава высокоэнтропийной пленки толщиной 2.5 мкм.

Установлено, что, варьируя ток испарителя с медным катодом (I_{Cu}) в пределах от 80 А до 30 А, можно, управляя элементным составом, формировать многослойное многофазное состояние, структура которого изменяется от аморфной до столбчатой нанокристаллической. Показано, что добавление в покрытие HfNbTaTiZr атомов меди способствует формированию аморфно-кристаллической пленки, прочностные характеристики которой в ≈1,6 раза превосходят прочностные характеристики пленки без добавления меди. Одновременно, износостойкость пленки состава HfNbTaTiZrCu в ≈2 раз выше износостойкости пленки без меди. Полученные пленки состава HfNbTaTiZrCu, находящиеся в аморфном состоянии, будут перспективны для применений в условиях повышенного износа, например, для покрытий в парах трения и, в том числе, для биомедицинских применений.

Литература

1. В.В. Шугуров, Н.А. Прокопенко, Е.А. Петрикова, Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Ю.Х. Ахмадеев, М.С. Воробьев. Электронно-микроскопический и дифракционный in si u анализ процесса формирования структуры и фазового состава пленок TiNbZrTaHfCu при вакуумно-дуговом плазменно ассистированном напылении. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2025 (в печати)

Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.

Бессеточная система генерации ионного потока на основе магнетронного разряда

Система включает два плазмофизических устройства: генератор газовой плазмы с накаленным катодом «ПИНК» и систему бессеточного формирования потока (плотностью до 10 мА/см^2) низкоэнергетических (до 200 эВ) ионов, извлеченных из плазмы несамостоятельного магнетронного разряда с плотностью мощности и тока на мишени до 115 Вт/см^2 и до 250 мА/см^2, соответственно. Система предназначена для генерации низкоэнергетического ионного потока при формировании функциональных и

декоративных покрытий (в том числе непроводящих), на различных подложках, включая диэлектрические. Степень готовности разработки к практическому применению – готов действующий образец. Система позволяет синтезировать функциональные и декоративные слои как чистых проводящих немагнитных материалов, так и их оксидов/нитридов, в условиях постоянной и контролируемой ионной бомбардировки растущего покрытия вне зависимости от его и подложки электрических свойств. По совокупности параметров (производительность/независимая регулировка энергии и плотности ионного потока/отсутствие микрокапельной фракции) аналогов в мире не обнаружено. Аналоги системы не обнаружены, поэтому разработка патентоспособна на территории Российской Федерации.

Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.; Рыгина Мария Евгеньевна, м.н.с.

Получение однофазного покрытия α-Al_2O_3 в системе бессеточного формирования ионного потока на основе несамостоятельного магнетронного разряда

В экспериментах по синтезу диэлектрического покрытия, при рекордно низкой температуре подложки 350°C, с использованием низкоэнергетического (≈ 70 эВ) потока ионов, генерируемого в бессеточной электродной системе из несамостоятельного магнетронного разряда получено однофазное покрытие из оксида алюминия в термостабильной альфа модификации (температура равновесного образования ~1200°C) без примесей не окисленного алюминия и без его оксидов иных (метастабильных) модификаций. За два часа осаждения на подложку из твердого сплава ВК8 (WC - 92%, Co - 8%) без осаждения переходного подслоя, был получен слой α-Al_2O_3 толщиной 7,4 мкм, что показывает приемлемую скорость осаждения для получения толстых (десятки мкм) функциональных слоев, перспективных для применений в науке и технологиях.

Лаборатория оптических излучений
Панченко Алексей Николаевич, с.н.с., д.ф.-м.н.; Белоплотов Дмитрий Викторович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Панарин Виктор Александрович, н.с., к.ф.-м.н.; Скакун Виктор Семенович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Соснин Эдуард Анатольевич, в.н.с., д.ф.-м.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н.

ВУФ излучение атомарного азота в импульсных самостоятельных разрядах атмосферного давления

В настоящее время исследования плазменных струй, формирующих холодную неравновесную плазму в смесях различных атомарных и молекулярных газов атмосферного давления, привлекают большое внимание благодаря широкому применению таких струй в различных областях науки и технологии. Например, плазменные струи, формируемые в смесях аргона с азотом, являются источниками высокоактивных частиц и широко используются в медицинских приложениях для ускорения заживление ран, стерилизации медицинских инструментов, дезактивации вирусов и бактерий и т.д. Однако исследования спектрального состава излучения таких источников плазмы зачастую ограничивалось видимой и УФ областями спектра.

В экспериментах для нескольких типов возбуждения, обеспечивающих формирование неравновесной низкотемпературной плазмы, в том числе в виде струи, исследовались спектральные характеристики плазмы в диапазоне от ВУФ до видимого.

В спектре плазменной струи аргона Ar и гелия He обнаружены две ВУФ линии, интенсивность которых в зависимости от расстояния до входного окна монохроматора могла превышать в 5–10 раз интенсивность полос второй положительной системы азота. Данные линии соответствуют переходам $3s^2P$-$2p^2P^0$ и $3s^2P$-$2p^2D^0$ атомарного азота с

длинами волн 174.3 и 149.3 нм, соответственно. Очевидно, что появление данных линий обусловлено взаимодействием компонентов плазмы с молекулами азота при прохождении струи через воздух. Составы газовых смесей с Ar и He для получения максимальной мощности ВУФ излучения заметно отличались.

Мощное ВУФ изучение на указанных переходах также было получено из плазмы высоковольтного наносекундного разряда в широком диапазоне параметров импульсов накачки и различных смесях азота с H и Ar.

В результате исследований предложен способ получения мощного вакуумного ультрафиолетового излучения, обеспечивающий повышение интенсивности излучения на объекте и удешевляющий процесс получения данного ВУФ-излучения.

Литература

1. Панченко А.Н., Белоплотов Д.В., Панарин В.А., Скакун В.С., Сорокин Д.А. Вакуумное ультрафиолетовое излучение атомарного азота в импульсных самостоятельных разрядах атмосферного давления // Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133. Вып. 7. С. 719-726. DOI: 10.61011/OS.2025.07.61103.7802-25
2. Соснин Э.А., Панарин В.А., Панченко А.Н., Скакун В.С., Сорокин Д.А. Способ получения вакуумного ультрафиолетового излучения // Патент № RU 2844454 C1. Приоритет: 10.07.2024 г. Опубликовано 30.07.2025 г. Бюл. № 22. Патентообладатель: ИСЭ СО РАН.

Лаборатория плазменных источников
Шандриков Максим Валентинович, с.н.с., к.т.н.; Окс Ефим Михайлович, зав. лабораторией, д.т.н.; Черкасов Александр Алексеевич, м.н.с., к.т.н.; Денис Борисович Золотухин с.н.с., д.ф.-м.н.

Вакуумный (безгазовый) режим функционирования планарной магнетронной распылительной системы с композитным катодом-мишенью

Показано, что использование композитного катода-мишени, в составе которого присутствует материал с относительно высоким коэффициентом ионного распыления k_i, обеспечивает поддержание стабильного функционирования вакуумной планарной магнетронной распылительной системы даже если в составе композитной мишени имеется материал с относительно низким коэффициентом распыления. В эксперименте катод-мишень магнетрона был выполнен в виде мозаичной структуры, при которой в медную основу с $k_i > 1$ были запрессованы вставки алюминия или титана, для которых $k_i < 1$ Экспериментально показано, что при этом в плазме магнетронного разряда долевой состав ионов материала мишени коррелирует с долевым соотношением композитов мишени с учетом коэффициентов их распыления. Полученный результат открывает возможность реализации магнетронного разряда и осаждения покрытий в непрерывном вакуумном режиме функционирования на композитных мишенях, включающих материалы с относительно низким коэффициентом распыления, для которых вакуумный режим на чистых мишенях практически нереализуем.

Литература

1. M.V. Shandrikov, A.A. Cherkasov, E.M. Oks, D.B. Zolotukhin, Reducing the self-sputtering threshold of a gasless (vacuum) magnetron in DC mode. // Vacuum. 2025. V.241. P. 114656. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114656

Лаборатория пучково-плазменной инженерии поверхности, лаборатория плазменной эмиссионной электроники
Денисов Владимир Викторович, зав. лабораторией, д.т.н.;
Игнатов Даниил Юрьевич, м.н.с.; Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.;
Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.

Устройство для ионно-плазменной обработки внутренней поверхности протяженных трубчатых изделий и изделий сложной формы

Устройство для генерации в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления (≈ 1 Па) с полым катодом объемно-однородных пучково-плазменных образований внутри протяженных (> 0,5 м) трубчатых изделий и изделий сложной формы ионно-плазменными методами (ионная очистка поверхности, нагрев, химико-термическая обработка). Устройство представляет собой двухразрядную систему, состоящую из трубчатого изделия (полого катода), внутри которого зажигается основной тлеющий разряд, и системы генерации вспомогательного разряда, из плазмы которого производится инжекция электронов в тлеющий разряд. Тлеющий разряд горит между полым катодом (внутренняя поверхность изделия) и плоским анодом, установленным с одного из торцов катода через изолятор, при этом инжекция электронов осуществляется с противоположного торца полого катода через мелкоструктурную сетку. Использование дополнительной мелкоструктурной сетки, закреплённой на торце трубчатого изделия вблизи плоского анода тлеющего разряда, позволяет снизить в несколько раз ток вспомогательного разряда, с (50-120) А до (2-10) А (в зависимости от геометрической формы трубчатого изделия), при котором стабильно зажигается и горит разряд внутри трубчатого изделия.

Технические характеристики: внутренний диаметр и длина трубчатых изделий – D (5..300) мм × L (10..1000) мм; материал трубчатого изделия – стали, титановые, циркониевые и другие металлы и сплавы; температура обработки – до 800 °С; методы ионно-плазменной обработки внутренней поверхности – ионное травление, ионный нагрев, ионно-плазменное азотирование, другие химико-термические методы насыщения поверхности; количество изделий в садке – ограничено размерами рабочей зоны - D 400 мм × L 1000 мм; диапазон рабочих давлений (N_2, Ar и другие газы) – ($5 \cdot 10^{-2}$ – 2) Па.

Область возможного применения. нефтегазовая промышленность (скваженные штанговые насосы, обсадные колонны, резьбовые соединения бурильных труб), химическая промышленность (металлические трубопроводы для химически агрессивных сред как прямой, так и сложной формы), машиностроение (матрицы для штамповки протяжённых изделий, детали пар трения с внутренней протяжённой рабочей поверхностью) и др.

Устройство апробировано и готово к применению. Техническим результатом разработки является возможность обработки внутренней поверхности протяженных трубчатых изделий широкой номенклатуры и изделий сложной формы ионно-плазменным методом. Не имеет аналогов в России по возможности обработки протяженных изделий сложной, в том числе криволинейной формы. Подана заявка на патент на изобретение, регистрационный номер № 2025120997 от 30.07.2025.

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

125047, Москва, Миусская пл., д.4

Отдел № 15

Шпатаковская Галина Васильевна, в.н.с., д.ф.-м.н.

Атомные характеристики лантаноидов и актиноидов [1]

Для двух групп гомологов, лантаноидов и актиноидов, рассмотрены имеющиеся экспериментальные и теоретические данные по статической поляризуемости, атомным объемам и потенциалам ионизации, необходимые для численного моделирования различных задач химии и физики, в частности, проектов ядерной энергетики. Проверены установленные в квазиклассическом приближении связи этих характеристик друг с другом, исследованы их зависимости от атомного номера. Показано, что при

последовательном водородоподобном заполнении электронных f-оболочек эта зависимость в обеих группах носит регулярный характер, что позволяет получить простые достаточно точные аппроксимации исследуемых величин, а также предсказать величины атомных объемов тяжелых актиноидов, данные по которым отсутствуют.

Квазиклассическая физика электронной компоненты вещества [2]

Монография посвящена развитию квазиклассического метода и его применению в различных разделах физической науки: атомной физике, физике плазмы, физике атомных кластеров и других нанообъектов, физике вещества с высокой плотностью энергии. Метод позволяет почти аналитически описывать характеристики квантовых систем, в том числе термодинамические свойства, на языке классической механики, а его точность растет с ростом числа частиц в системе. Во многих случаях квазиклассические результаты количественно почти не отличаются от квантовомеханических и при этом дают физически наглядную интерпретацию и объяснение наблюдаемым зависимостям.

Книга будет полезна специалистам в названных выше областях, а также может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов физических специальностей.

Литература

1. Математическое моделирование, 2025, том 37, номер 2, сс. 16-28. ISSN 2070-0482/ Mathematical Models and Computer Simulations, 2025, Vol. 17, No. 4, pp. 384–392. https://doi.org/10.1134/S2070048225700127
2. Шпатаковская Г.В. Квазиклассическая физика электронной компоненты вещества. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2025 – с. 198. ISBN 978-5-98354-076-7.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Лаборатория №1.4. - лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы
Зеленер Борис Борисович, г.н.с., зав. лабораторией

Спектроскопия с переносом модуляции на линии D_1 ^{7}Li.

Впервые реализована спектроскопия с переносом модуляции (MTS) на линии D_1 ^{7}Li, выполненная в ячейке открытого типа с холодными окнами типа тепловая труба (h a - pip) . Изменяя интенсивность лазера накачки и пробного лазера, а также конфигурацию поляризации лазерных пучков, мы измерили амплитуду сигнала ошибки MTS, эффективную ширину линии и наклон для резонанса перехода. В результате измерений мы определили оптимальные условия для стабилизации частоты лазера с общей мощностью менее 1 мВт. Оптимальная конфигурация поляризации лазерных пучков (две взаимно ортогональных линейных поляризаций) дает четкий, симметричный, высококонтрастный сигнал ошибки с максимальным наклоном. Наши результаты позволяют использовать спектр MTS переходов линии D_1 ^{7}Li как репер частот для экспериментов с ультрахолодной плазмой, особенно в сценариях, где стабилизация частоты должна быть достигнута при низкой оптической мощности лазера.

Литература

1. Khalutornykh L. et al. Modulation transfer spectroscopy of $^ 7$ Li D1 line // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2025. – Т. 346. – С. 109594. (Q1 WoS), https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2025.109594

Лаборатория №2.3. – плазмы
Амиров Равиль Хабибулович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Самойлов Игорь Сергеевич, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Лаборатория теории неидеальной плазмы
Тимофеев Алексей Владимирович, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Исследование эволюции пылевой плазмы в режиме непрерывного изменения температуры в диапазоне 5–295 К.

Экспериментально исследованы структуры пылевой плазмы в гелиевом разряде постоянного тока. В известных работах температурный режим соответствовал постоянным значениям температуры. В работе осуществлено непрерывное изменение температуры стенки разрядной трубки от 5 до 300 К. Была определена структурная диаграмма системы пылевой плазмы в этой области температур. Установлено, что ток разряда, давление и температура являются достаточными параметрами для различения различных структур, появляющихся во время эксперимента. Приведены их значения для трех наблюдаемых случаев структурных переходов пылевой плазмы.

При наблюдении частиц выявлено немаксвелловские распределение их скоростей с увеличением числа частиц при больших скоростях, аналогичное тем, которые наблюдаются в активных системах частиц Януса. При этом исключаются альтернативные объяснения этого неравновесного поведения, включая вращение по всей системе и полидисперсность масс.

В наблюдаемых структурах в диапазоне температур 9–295 К измерены межатомные расстояния. Зависимость среднего межчастичного расстояния от температуры нейтрального газа определена для диапазона концентраций нейтрального газа $(2{,}4{-}242)\cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Обнаружен эффект увеличения межчастичного расстояния при низких температурах для определенных наборов параметров.

Литература

1. I.S. Samoylov, R.Kh. Amirov, V.S. Nikolaev, D.D. Tiubaev and A.V. Timofeev Physical Review E (sent to print)

Шумова Валерия Валерьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.

Поляков Дмитрий Николаевич, с.н.с.

Василяк Леонид Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Температура микрочастиц в криогенной газоразрядной плазме

Проведен численный анализ нагрева микрочастиц в плотных облаках микрочастиц, наблюдавшихся в плазме тлеющего разряда в неоне при криогенной температуре. Показана связь температуры поверхности микрочастиц с параметрами облака – концентрацией микрочастиц и его размером. Обнаружено, что за счет коллективного влияния облака на плазму нагрев микрочастиц в облаке меньше, чем нагрев одиночной микрочастицы в разряде с теми же значениями тока разряда и давления газа. Обнаружено, что температура микрочастицы зависит от ее координаты внутри облака, и на периферии облака он может быть выше, чем в его центре. Получено, что в более плотных облаках профиль температуры микрочастиц выравнивается. Обнаружено, что с увеличением концентрации микрочастиц в облаке их нагрев уменьшается, а концентрация ионов внутри облака увеличивается и превышает концентрацию ионов в плазме без частиц.

Литература

1. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. Температура микрочастиц в криогенной газоразрядной плазме // Химическая физика, 2025, том 44, № 4, с. 106—114 DOI:10.31857/S0207401X25040127 https://journals.rcsi.science/0207-401X/article/view/288419

Эффективность ионной ловушки в облаке микрочастиц в электрическом разряде

Проведен численный анализ эффективности накопления ионов в облаке микрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока. Получены состояния ловушки ионов с эффективным накоплением ионов и с интенсивностью накопления ионов ниже, чем в разряде без микрочастиц. Показано, что комплексная плазма электрического разряда представляет собой более эффективный инструмент для создания необходимой концентраций холодных ионов, чем плазма разряда без микрочастиц. Ионная ловушка в комплексной плазме, образованная облаком заряженных микрочастиц и плазмой электрического разряда может представлять интерес для плазменных технологий при низких и криогенных температурах, так как, характеризуясь высокой концентрацией удерживаемых ионов, она рассеивает меньше тепла, чем плазма электрического разряда без микрочастиц.

Литература

1. Поляков Д.Н., Шумова В.В., Василяк Л.М. Накопление ионов в плазменной электростатической ловушке внутри облака заряженных микрочастиц в электрическом разряде // Прикладная физика, 2025, № 4, с. 37—44 DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-37-44 http://applphys.orion-ir.ru/appl-25/25-4/PF-25-4-037_RU.pdf

Эффективность ионной ловушки в облаке микрочастиц в электрическом разряде

Проведен численный анализ эффективности накопления ионов в облаке микрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока. Получены состояния ловушки ионов с эффективным накоплением ионов и с интенсивностью накопления ионов ниже, чем в разряде без микрочастиц. Показано, что комплексная плазма электрического разряда представляет собой более эффективный инструмент для создания необходимой концентраций холодных ионов, чем плазма разряда без микрочастиц. Ионная ловушка в комплексной плазме, образованная облаком заряженных микрочастиц и плазмой электрического разряда может представлять интерес для плазменных технологий при низких и криогенных температурах, так как, характеризуясь высокой концентрацией удерживаемых ионов, она рассеивает меньше тепла, чем плазма электрического разряда без микрочастиц.

Литература

1. Поляков Д.Н., Шумова В.В., Василяк Л.М. Накопление ионов в плазменной электростатической ловушке внутри облака заряженных микрочастиц в электрическом разряде // Прикладная физика, 2025, № 4, с. 37—44 DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-37-44 http://applphys.orion-ir.ru/appl-25/25-4/PF-25-4-037_RU.pdf

Эффективность накопления ионов сферическими облаками микрочастиц в ионизованной атмосфере

Для электрического разряда низкого давления в неоне с микрочастицами рассчитаны параметры плазмы, при которых экспериментально получены облака сферической формы из заряженных микрочастиц. Сформулированы показатели, определяющие эффективность накопления ионов сферическими облаками, и определен характер изменения этих показателей для микрочастиц разного размера в зависимости от концентраций газа и микрочастиц. Сопоставлены параметры образования сферических облаков по давлению и температуре экспериментальной среды с параметрами стандартной атмосферы на разной высоте.

Литература

1. Поляков Д.Н., Шумова В.В., Василяк Л.М. Накопление ионов сферическими облаками микрочастиц в ионизованной атмосфере // Химическая физика, 2025, том 44, № 10, с. 70—80 DOI: 10.7868/S3034612625100079 https://journals.rcsi.science/0207-401X/article/view/318560

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.

Механизм вращения индивидуальной пылевой частицы вокруг оси, проходящей через ее цент

После открытия пылевой плазмы в лаборатории около 30 лет назад было обнаружено вращение пылевых частиц вокруг собственной оси с достаточно большой скоростью, достигающей 10^3 рад/с. Это происходит в любом газе, вращение обусловлено дефектностью поверхности частицы, а скорость ее вращения зависит главным образом от степени этой дефектности и в значительно меньшей степени от размера частицы и рода газа. Частиц с идеальной поверхностью не бывает, поэтому все они вращаются, одни быстрее, другие медленнее. Интерес к этому вопросу связан с рядом обстоятельств. Во-первых, это важно для контроля за работой энергетических установок с магнитным полем, где пылевые частицы оказывают нежелательное влияние, способствующее срывам плазмы. Во-вторых, это важно для описания космической пыли, частицы которой, как правило, неправильной формы. Следует заметить, что ряд предложенных физических моделей собственного вращения дают оценку чрезмерно высокой скорости вращения частиц. В данной работе предложена простая физическая модель, отражающая преобразование энергии плазменных частиц в «направленную» энергию вращения пылевой частицы, которое непрерывно происходит в процессе ее зарядки и связано с неизбежными дефектами, возникающими при ее изготовлении. Скорость вращения практически не изменяется при смещении частицы с оси разряда на периферию, а вектор скорости не имеет преимущественного направления и при неизменных условиях и отсутствии внешних воздействий сохраняет свое направление. Предложенная модель вращения уточняет предыдущий подход к решению задачи и наглядно показывает механизм раскручивания частиц в процессе поддержания постоянного заряда на поверхности частиц. Наиболее существенными факторами, влияющими на скорость вращения, являются дефекты поверхности частиц и плотность плазмы. Оценки скорости собственного вращения частиц хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. В.Ю. Карасев. Е.С. Дзлиева, Л.А. Новиков, Л.Г. Дьячков, М.А. Гасилов, С.И. Павлов. Механизм собственного вращения индивидуальных пылевых частиц. ТВТ. 2025. Т. 63. № 6 или Дополнительный.

Лаборатория теплофизических и кинетических свойств веществ
Жуховицкий Дмитрий Игоревич, г.н.с., д.ф.-м.н.

Численное моделирование стационарной нуклеации с учетом тепловых эффектов в широком диапазоне пересыщений

Ввод высокой плотности энергии в конденсированное вещество приводит к формированию быстро расширяющихся плазменных областей. Их остывание приводит к нуклеации с образованием жидких или твердых микрочастиц. Наличие в плазме центров, притягивающих мономеры конденсирующегося пара, в частности, ионов, приводит к усложнению картины процесса по сравнению со случаем гомогенной нуклеации, протекающей при отсутствии примесей. Однако даже в гомогенной системе ее неизотермичность оказывает большое влияние на процесс нуклеации. В данной работе методом молекулярной динамики решается задача о стационарной нуклеации пар‑жидкость при постоянном числе частиц, взаимодействующих посредством потенциала Леннард-Джонса, для случаев изотермической и неизотермической нуклеации в широком диапазоне пересыщений пара с применением специального метода моделирования

стационарной нуклеации, при котором кластеры, достигшие определенного размера, удаляются из системы, а составляющие их частицы возвращаются в виде мономеров. Определено распределение температуры по размерам кластеров. Установлено, что температура, начиная с ее значения для мономеров, несколько снижается, но при приближении размера кластера к критическому вновь достигает этого значения, после чего быстро возрастает. Распределение температуры по размерам кластеров определяет распределение их числовых плотностей и контролирует неидеальность пара, что существенно влияет на скорость нуклеации. Продемонстрирована критическая важность знания температуры кластеров для аналитических моделей, позволяющая точно определять пересыщение пара и фактическую неизотермическую скорость нуклеации. Определенные скорости нуклеации и критические размеры кластеров для изотермического и неизотермического случаев показали удовлетворительное согласие с теоретической моделью, предсказывающей снижение скорости нуклеации в неизотермическом случае.

Литература

1. Е.Е. Перевощиков, Д.И. Жуховицкий // Коллоидный журнал. 2025. Т. 87. №4. С.387.

Лаборатория №15.1. - электрофизики и плазменных процессов

Бабаева Наталья Юрьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.
Найдис Георгий Вениаминович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Каталитические свойства диэлектрических структур в барьерных разрядах

Предложен метод управления потоками химически активных частиц к поверхностям в барьерных разрядах с помощью каталитических структур, встроенных в диэлектрик. Такие структуры усиливают или ослабляют электрическое поле вблизи поверхности диэлектрика вследствие поляризации при воздействии газоразрядной плазмы, что приводит к увеличению или уменьшению потоков наработанных в разряде активных частиц к поверхности. Методом численного моделирования исследована динамика плазмы в барьерном разряде с каталитическими структурами, стержнями и полостями сферического и эллипсоидального сечения. Показано, что путем выбора комбинаций этих структур можно контролировать значения потоков активных частиц к поверхности.

Положительные стримеры в воздухе, генерируемые на фронте импульса приложенного напряжения

Представлен новый метод оценки средней скорости и радиуса стримеров, генерируемых в наносекундных разрядах на фронтах импульсов приложенного напряжения. Показано, что полученная в рамках этого метода зависимость усредненных параметров стримера от величины среднего приложенного электрического поля согласуется с результатами численного моделирования динамики стримеров.

Область устойчивости отрицательных коронных разрядов

Исследованы условия возникновения стационарного (безимпульсного) отрицательного коронного разряда в геометрии «игла-плоскость». Показано, что после потери устойчивости в разряде возникают регулярные импульсы, которые развиваются посредством формирования стоячих или ионизационных волн. Результаты моделирования согласуются с имеющимися экспериментальными данными как для вольт-амперных характеристик, так и для предела устойчивости безимпульсного разряда. Представлен анализ наблюдавшихся в экспериментах стохастических импульсов.

Динамика стримеров-спрайтов

Представлена модель, описывающая динамику распространения в верхней атмосфере стримеров-спрайтов. Показано, в соответствии с результатами высокоскоростных видеонаблюдений, что на начальной стадии распространения стримера его скорость увеличивается со временем примерно пропорционально длине стримера.

Получено приближенное выражение для скорости стримера как функция высоты, внешнего электрического поля на данной высоте и электрического поля во фронте стримера.

Литература

1. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, Effects produced in dielectric barrier discharges by dielectric structures not in contact with plasma: 2D modelling approach. *Journal of Applied Physics* 2025, v.138, n.21, paper 213301. DOI: 10.1063/5.0300941 (отмечена редакцией журнала как featured article).
2. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, Positive streamers in air: Effect of the average applied field. *Physics of Plasmas* 2025, v.32, paper 104501. DOI: 10.1063/5.0292765
3. N.G.C. Ferreira, P.G.C. Almeida, A. Eivazpour Taher, G.V. Naidis, M.S. Benilov, Numerical investigation of stability of low-current needle-to-plane negative corona discharges in air. *Plasma Sources Science and Technology* 2025, v.34, paper 085002. DOI: 10.1088/1361-6595/adf5e5
4. G.V. Naidis, Evaluating growth rates of sprite streamers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2025, v.270, paper 106506. DOI: 10.1016/j.jastp.2025.106506

Лаборатория 17.2 - диагностики пылевой плазмы

Петров Олег Федорович, г.н.с., проф., д.ф.-м.н., академик РАН
Лисин Евгений Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Разработка теории движения полностью инерционной активной броуновской частицы в гармонической ловушке для описания экспериментов с газоразрядной коллоидной плазмой

Эксперименты с активными броуновскими частицами в газовом разряде имеют большой потенциал с точки зрения изучения фундаментальных свойств так называемой активной материи. Активная материя – особая форма «мягкого» конденсированного вещества, которая представляет собой дисперсионную среду, содержащую мелкодисперсные активные частицы. Несмотря на свою простоту и отсутствие подвижных частей, такие частицы (также называемые нано- и микромоторами) способны автономно преобразовывать доступную в окружающей среде энергию в собственное направленное движение. Системы таких частиц представляют большой интерес для статистической механики и материаловедения, имеют множество перспективных приложений: от чисто технических до биомедицинских.

Несмотря на интенсивные исследования активных броуновских частиц, проводимые с 1990-х годов, полная теория их инерционного движения в ограничивающем силовом поле остается все еще не разработанной. Сотрудниками ОИВТ РАН получены точные аналитические формулы для автокорреляционных функций положения и скорости активной (самоходной) броуновской частицы с поступательной и вращательной инерцией в двумерной гармонической ловушке. Показано, что хорошо известная инерционная модель активной частицы Орнштейна-Уленбека может быть использована в качестве приближенного описания динамики полностью инерционной активной броуновской частицы в ловушке, но только в относительно небольшом диапазоне параметров системы. За пределами этого диапазона вращательная инерция играет значительную роль в динамике частицы. В частности, для достаточно сильной ловушки теория предсказывает новый режим динамики активной частицы, который радикально отличается от всех известных динамических режимов активных и пассивных броуновских частиц в ловушке. В этом случае вращательная инерция подавляет колебательное поведение функции эволюции среднеквадратичного смещения, что приводит к дополнительному квазибаллистическому движению. Подходящие условия для наблюдения такого динамического режима могут быть достигнуты в экспериментах с микрочастицами,

оптически удерживаемыми в камере высокого вакуума, а также в экспериментах с заряженными микрочастицами, взвешенными в газоразрядной плазме.

Экспериментальные исследования коллоидной плазмы на борту Международной космической станции в условиях микрогравитации

В 2025 году продолжились исследования коллоидной плазмы на научной аппаратуре "Плазменный кристалл-4" в условиях микрогравитации на борту МКС. Был проведен анализ спектров решеточных волн в трехмерной структуре пылевой плазмы, образованной в газовом разряде постоянного тока с переменной полярностью в условиях микрогравитации. Спектры определяются с помощью преобразования Фурье скоростей микрочастиц, измеренных путем отслеживания микрочастиц с субпиксельным разрешением. Обнаружены и проанализированы как продольные, так и поперечные моды. Измеренные продольные и поперечные скорости звука позволяют оценить модули упругости компонента частиц. Они довольно малы по абсолютной величине, но при нормировании по плотности частиц и энергии взаимодействия напоминают показатели обычного вещества.

Исследована сильно нелинейная волна плотности, переходящая в ударную волну, в трехмерной комплексной плазме газового разряда постоянного тока на научной аппаратуре "Плазменный кристалл-4" в условиях микрогравитации. Перепад давления плазменно-пылевой структуры в волне доминировал над трением о нейтральный газ при выбранных условиях эксперимента. Найдена скорость распространения ударной волны. Определены скорости индивидуальных микрочастиц. Восстановлены профили скорости и концентрации микрочастиц в развивающейся ударной волне. Получено хорошее соответствие экспериментальных профилей и результатов численного моделирования методом молекулярной динамики. Оценки также показали, что число Маха в набегающем потоке составило 4.3.

В коллоидной плазме частицы размером в микроны приобретают значительный отрицательный заряд. Одной из основных сил, действующих на эти частицы, является сила ионного увлечения. На установке "Плазменный кристалл-4" на борту Международной космической станции была исследована сила ионного увлечения, действующая на микрочастицы меламина-формальдегида размером 3,4 мкм в аргоновой и неоновой плазме в диапазоне давлений от 10 до 120 Па. Обнаружено заметное увеличение силы ионного увлечения, измеренной при низких давлениях (ниже 30 Па), особенно в неоне, где столкновения ионов и скорости дрейфа значительно влияют на динамику частиц. Эти результаты подчеркивают роль столкновений ионов с нейтральными частицами и состава плазмы во взаимодействии пыли и плазмы, а также требуют введения дополнительных ограничений для существующих теоретических моделей и необходимости их уточнения с учетом специфики газа.

Литература

1. Lisin, E. A., & Lisina, I. I. (2026). Fully inertial active Brownian particle in a harmonic potential. Physical Review E, 113(1), 015417.
2. 2. Lipaev, A. M., Naumkin, V. N., Khrapak, S. A., Usachev, A. D., Petrov, O. F., Thoma, M. H., ... & Zobnin, A. V. (2025). Wave dispersion in a three-dimensional complex plasma solid under microgravity conditions. Physical Review E, 111(1), 015209.
3. 3. Заморин, Д. А., Зобнин, А. В., Липаев, А. М., Сыроватка, Р. А., Наумкин, В. Н., Усачев, А. Д., ... & Петров, О. Ф. (2025). Структура фронта ударной волны в трехмерной комплексной плазме. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 121(11), 892-897.
4. 4. Wimmer, L., Beppler, S., Dormagen, N., Klein, M., Kretschmer, M., Lipaev, A. M., ... & Thoma, M. H. (2025). Investigation of charge and ion drag force dynamics in complex plasma experiments with neon and argon under microgravity. New Journal of Physics, 27(11), 114301.

Лаборатория №17.3 – активных кулоновских систем
Петров Олег Федорович, г.н.с., проф., д.ф.-м.н., академик РАН
Васильев Михаил Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н., проф. РАН
Трухачев Федор Михайлович, в.н.с., д.ф.-м.н.

Односторонний перенос электрического заряда как фундаментальное (неотъемлемое) свойство нелинейных волн и солитонов в линиях электропередач

Анализ нелинейных волновых процессов в классической плазме и пылевой плазме показал, что нелинейные волны и солитоны осуществляют односторонний перенос заряженных частиц на значимые расстояния [1,2]. Следствием переноса являются особые электрические токи в плазме [1]. В дальнейшем было доказано, что волновой перенос вещества является универсальным свойством природы и наблюдается в различных нелинейных системах [2-6]. В недавних работах [3,4] было теоретически и экспериментально доказано, что односторонний перенос электрического заряда является неотъемлемым свойством нелинейных уединенных волн (солитонов) в нелинейных линиях электропередач. Такие линии являются моделью высоковольтных линий передач (ЛЭП) при воздействии на них мощных возмущающих факторов, например, при попадании молнии. Кроме того, они могут использоваться для физического моделирования волновых процессов в нелинейных дисперсионных средах различной природы – в плазме, в жидкостях и др. В рамках эксперимента, в линию разряжался внешний конденсатор, что приводило к возбуждению последовательности солитонов. Были измерены токи в линии передач (ранее измерялось только напряжение между проводниками линии) и путем интегрирования рассчитан электрический заряд, переносимый солитонами. Выяснилось, что каждый солитон осуществляет односторонний перенос электрического заряда. Более того, оказалось, что электрический заряд однозначно связан с амплитудой, скоростью и другими параметрами уединенной волны.

Таким образом, открыта новая уникальная характеристика солитонов – электрический заряд. Показано, что заряд внешнего инициирующего конденсатора равен суммарному заряду возбуждаемых солитонов. Для теоретического описания экспериментальных данных использовалось уравнение Кортевега-Де Вриза (КдВ) и компьютерное моделирование. Теоретические и экспериментальные результаты полностью согласуются друг с другом.

Фундаментальная значимость работы заключается в развитии физики нелинейных волн. Прикладное значение исследований связано повышением безопасности при эксплуатации высоковольтных линий передач (ЛЭП). В частности, результаты работы указывают на необходимость использования нелинейных математических моделей при оценке рисков грозового повреждения ЛЭП и поражения электрическим током ремонтных бригад при их обслуживании. В свою очередь, нелинейные модели указывают на высокую стабильность высокоамплитудных нелинейных волновых возмущений в линиях (в сравнении с широко применяемой линейной теорией).

Литература

1. Ф.М. Трухачев, М.М.Васильев, О.Ф. Петров. Солитонные токи (обзор) // ТВТ, Т. 58 (4), 563, 2020. DOI: 10.31857/S0040364420040158.
2. F.M. Trukhachev, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, E.V. Vasilieva, Dust-acoustic soliton breaking and the associated acceleration of charged. Phys. Rev. E. V. 100, 063202, 2019. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.063202
3. F.M. Trukhachev, N.V. Gerasimenko, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov. Current Solitons in a Nonlinear Transmission Line // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, V. 51(12), 576, 2025. DOI: 10.3103/S106833562460195X.
4. F.M. Trukhachev, K.B. Statsenko, N.V. Gerasimenko, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov. Charge transport as a fundamental property of solitons in nonlinear transmission lines // Chaos, Solitons & Fractals, V. 202(2), 117583, 2026. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2025.117583.

5. N.V. Gerasimenko, F.M. Trukhachev, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov. Charged particle transport across magnetic field driven by magnetosonic solitons in plasma // Phys.Rev.E., V. 112(4), 045201, 2025. DOI: 10.1103/2zbh-cmdh.
6. Ф. М. Трухачев, М. М. Васильев, О.Ф. Петров. Ионные функции распределения по скоростям и по энергиям, возмущенные ионно-звуковыми солитонами: аналитический расчет для произвольных амплитуд // Физика плазмы. Т. 51(1), 85, 2025 DOI: 10.31857/S0367292125010087.

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

Плазменный синтез гетерокомпозитных микрочастиц TiO_2/ZnO

Путем оптимизации условий плазменной обработки и подбора исходных материалов предложен метод синтеза микроразмерного фотокатализатора на основе гетерокомпозитных частиц TiO_2/ZnO с высоким содержанием анатаза. Метод синтеза включает обработку порошковой смеси титана и цинка низкотемпературной аргоновой плазмой в атмосферных условиях. Исследована взаимосвязь между структурно-фазовым составом, морфологией и фотокаталитическими свойствами микрочастиц. Предложена модель синтеза композитных микрочастиц, содержащих анатаз, рутил и гетероструктурный контакт с оксидом цинка. Изучена фотокаталитическая деградация метиленового синего и метронидазола. Деградация метронидазола подтвердила собственную фотокаталитическую активность синтезированных композитов. Изучены особенности фотокатализа под действием УФ-излучения и солнечного излучения. Синтезированный микроразмерный гетерокомпозитный фотокатализатор на основе TiO_2/ZnO содержал анатаз (36%), рутил (60%) и брукит (4%) и проявил фотокаталитическую активность в процессе деградации метиленового синего под действием УФ-излучения (ртутная лампа высокого давления, 250 Вт): 99% за 30 мин.

Литература

1. Orudzhev F.F., Gadzhiev M.Kh., Abdulkerimov M.S., Muslimov A.E., Krasnova V.V., Il'ichev M.V., Kulikov Y.M., Chistolinov A.V., Volchkov I.S., Tyuftyaev A.S. and Kanevsky V.M., Plasma-Assisted Synthesis of TiO_2/ZnO Heterocomposite Microparticles: Phase Composition, Surface Chemistry, and Photocatalytic Performance // Molecules, 2025, 30(16), 3371. https://doi.org/10.3390/molecules30163371

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

119991, Москва. Ленинский проспект, 53
Отдел оптики низкотемпературной плазмы
Очкин Владимир Николаевич, г.н.с., д.ф.-м.н.

Диагностика газового разряда полым катодом с пространственным разрешением

Впервые предложен новый физически обоснованный алгоритм выбора параметров сглаживающих фильтров при восстановлении функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) из экспериментальной вольт-амперной характеристики (ВАХ) зонда Ленгмюра [1]. Предложенный алгоритм заключается в получении ФРЭЭ путем "сшивки" ее частей с низкими и высокими энергиями, определение каждой из которых требует специального подбора различных значений параметров используемых фильтров. Например, для случая разряда в чистом гелии для области низких энергий необходимо использовать значения параметров, при которых потенциал плазмы, рассчитанный по нулю второй производной от ВАХ, совпадает с потенциалом, определенным по

максимуму ее шумов. А для получения высокоэнергетической части ФРЭЭ использовать такие значения параметров, при которых "хвост" функции распределения резко спадает в области энергий вблизи порога возбуждения нижнего электронного уровня атома гелия. ФРЭЭ, полученные таким способом с использованием фильтров Savitzky-Golay (SG) и Blackman (BM), оказались близкими в области энергий 0-17 eV, в которой функция распределения спадает на четыре порядка величины (рис. 2). ФРЭЭ, рассчитанная для экспериментальных условий методом Монте-Карло, достаточно хорошо согласуется с измеренной в указанном диапазоне энергий (рис. 2). Измерения проведены в плазме разряда с полым катодом в гелии.

В работе выполнены экспериментальное [2, 3] и численное исследования [3] особенностей пространственного распределения параметров плазмы в разряде, не ограниченном боковыми стенками. Разряд, поддерживаемый полым катодом в гелии при низком давлении, зажигался в камере, размеры которой были значительно больше размеров разрядной системы, а расстояние катод – сетчатый анод заметно превышало высоту анода. Методом зондов Ленгмюра измерены двумерные пространственные распределения потенциала плазмы, концентрации электронов и их средней энергии [2]. Показано, в частности, что область существования плазмы в таком разряде существенно превышает область, ограниченную апертурой разрядной системы, и значительная концентрация электронов наблюдается в области за анодом. В дополнительных экспериментах определена доля полного тока, который затекает на анод со стороны противоположной катоду. Эта доля составила 12% [3]. Расчетно-теоретические исследования были выполнены в рамках 2D моделирования методом Монте-Карло. Впервые движение электронов, стартовавших со среза катода, моделировалось в 2D электрическом поле, полученном в результате измерений. Расчеты подтверждают тот факт, что заметная концентрация электронов за анодом обусловлена облетом электронами анода, а не прохождением их через сетчатый анод.

С помощью подвижной сборки зонда Ленгмюра и волоконно-оптического датчика проведены одновременные измерения функции распределения электронов по энергиям ФРЭЭ, их концентрации N_e и эмиссионные спектры $I(\lambda)$ плазмы с пространственным разрешением в разряде в инертных газах пониженного давления, поддерживаемом полым катодом [4]. Динамический диапазон измерений ФРЭЭ составляет 5 порядков величины, при этом наблюдаемые диапазоны изменений N_e и $I(\lambda)$ в пространстве составляют до 3 порядков величины. Обнаружено, что уже малые добавки ксенона к гелию приводят к существенным изменениям вида ФРЭЭ, в том числе в пространстве. В рамках корональной модели (КМ) по измеренным ФРЭЭ и N_e рассчитаны пространственные профили $I(\lambda)$ ряда линий атома Xe в разряде в смеси He:Xe (99:1). Уже в приближении этой простой модели результаты расчета интенсивностей, в целом, удовлетворительно согласуются с измеренными. Обсуждается распространенный метод измерения температур электронов по относительным интенсивностям спектральных линий атомных переходов.

Литература

1. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin. On the choice of filters and their parameters in the determination of EEDF in gas discharge plasma from the current-voltage characteristic of the Langmuir probe // Vacuum. 2025, V. 235, 114162 (8pp). DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114162 https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114162
2. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin. Local plasma parameters of a discharge without sidewalls supported by a hollow cathode // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2025, V. 45, No. 3, P. 993-1009. DOI: 10.1007/s11090-025-10552-5 https://doi.org/10.1007/s11090-025-10552-5
3. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin. Spatial distribution of plasma parameters in a hollow cathode discharge not limited by walls:

experiment and modeling // Physical Review E. 2025, V. 112, 025204 (10pp). DOI: 10.1103/hfnf-92bq https://doi.org/10.1103/hfnf-92bq
4. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Simultaneous local probe and optical measurements in a discharge with a hollow cathode // Plasma Physics Reports. 2025, V. 51, No. 3, P. 340-349. DOI: 10.1134/S1063780X25602603 https://doi.org/10.1134/S1063780X25602603

119333, Москва. Ленинский проспект, 52
Лаборатория теории плазменных явлений
Отдел физики плазмы
Мамонтова Татьяна Вячеславовна, н.с., к.ф.-м.н.
Урюпин Сергей Александрович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Усиление терагерцового излучения в неоднородной плазме, образованной при многофотонной ионизации инертного газа в магнитном поле

Найдены коэффициенты отражения и прохождения электромагнитной волны, воздействующей на слой неоднородной плазмы, образованной при многофотонной ионизации инертного газа в магнитном поле. Выявлена возможность усиления терагерцового излучения. Если частота пробного излучения совпадает с циклотронной частотой электронов, то возможно усиление напряженности поля прошедшего и отраженного излучения более чем на два порядка. Усиление возникает из-за эффекта Рамзауэра-Таунсенда и неравновесного распределения энергии фотоэлектронов. Размытие границы плазмы на величину, составляющую несколько процентов от ширины в основном однородного слоя, приводит к небольшому уменьшению усиления излучения. Разброс фотоэлектронов по энергии уменьшает усиление в несколько раз.

Литература

1. Mamontova T. V., Uryupin S. A. Amplification of terahertz radiation in inhomogeneous plasma produced by multiphoton ionization of inert gas in a magnetic field // Physical Review E. — 2025. — V. 112, № 6. — P. 065207. — DOI: 10.1103/pt3c-cwkk.