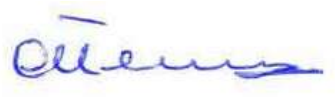
Российская академия наук
Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления

Научный совет Российской академии наук по физике низкотемпературной плазмы

ОТЧЕТ
Научного совета за 2023 год

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

МОСКВА 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы 3
ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА.....3
МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА 4
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2023 г. 5
Акционерное Общество Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») 5
Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”.....9
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси 10
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» 11
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» 12
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ).....13
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ) 15
ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН) 16
ФГБУН Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук (ИХРАН).....17
ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).....17
ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).....24
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН).....35
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).....37
ФГБУН Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН).....39

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

Основные конференции с участием Совета в 2023 г.:

1. XXXVIII Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2023), March 1–6, 2023, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, Россия.
2. XLX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 20–24 марта 2023 г., г. Звенигород Московской обл., Россия.
3. XXII Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике, 25-27 апреля 2023 г., Москва, Россия.
4. Всероссийская (с международным участием) конференция "Физика низкотемпературной плазмы" (ФНТП -2023), 5–9 июня 2023 г., Казань, Россия.
5. XVI Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-16), 25–30 июня 2023 г., Махачкала, Россия.
6. XV Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», ноябрь 2023 г., Казань, Россия.
7. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», 7–8 декабря 2023 г., Москва, Россия.
8. IV Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», 6–9 декабря 2023 г., Казань, Россия.

Планируемые конференции с участием Совета в 2024 г.:

1. XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024), March 1–6, 2024, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia
2. XLXI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 18 – 22 марта 2024 г., г. Звенигород Московской обл., Россия.
3. X Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 9 – 13 сентября 2024 года, Иваново.
4. Международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (NEPCAP-2024), 7–11 октября 2024 г., Адлер, Сочи.
5. XIII Всероссийская конференция по физической электронике ФЭ-2024, октябрь, Махачкала, Россия.
6. XVI Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», ноябрь 2024 г., Казань, Россия.
7. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», декабрь 2024 г., Москва, Россия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2023 г.

Акционерное Общество Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12

Лаборатория кинетики слабоионизованной плазмы

Акишев Юрий Семенович, начальник лаборатории, д.ф.-м.н., профессор

Изучение физических процессов в сильноточных разрядах при низких и средних давлениях при наличии собственных и сторонних магнитных полей

Выполнен цикл исследований физики сильноточных разрядов при низких и средних давлениях в поперечном и продольном магнитном поле. В первом случае магнитное поле создается собственным током разряда, во втором – поле создается внешним источником.

Плазменные ускорители, формирующие высокоскоростные плазменные струи за счет силового воздействия на плазму собственным поперечным магнитным полем, работают при больших токах. Из-за этого на их электродах могут возникать токовые пятна с высокой плотностью тока, которые приводят к ускоренной эрозии электродов и, тем самым, ограничивают срок их службы. В экспериментах работы [1] исследованы токовые режимы плазменного ускорителя с импульсным разрядом между двумя длинными (L=30 см) и параллельными стержнями диаметром 10 мм при токах до 70 кА. Разряд инициировался на одном конце электродов, и образовавшееся облако плазмы с большой скоростью перемещалось к выходу ускорителя за счет силового воздействия собственным магнитным полем. Сильноточный разряд исследовался в азоте и гелии при давлениях от 4 до 50 Торр как без токовых пятен, так и с токовыми пятнами на электродах. Методами скоростной фотосъемки с экспозицией каждого из восьми кадров, равной 60 нс, установлено, что токовые пятна на катоде возникали только в азоте при давлении 50 Торр. При меньших давлениях токовые пятна отсутствовали как в разряде в гелии, так и в азоте. Однако есть основания полагать, что при давлении больше 50 Торр токовые пятна могут возникать в обоих газах. Обнаружено, что катодные токовые пятна имеют меньшую скорость перемещения по сравнению с потоком плазмы, поэтому, чтобы согласовать свое движение с плазмой, катодные пятна перемещаются вдоль электрода прыжками. В этом случае передний фронт плазмы не перпендикулярен электродам, но наклонен, так что анодный край фронта опережает катодный край фронта.

Во втором цикле экспериментальных исследований получены результаты по формированию и последующей эволюции протяженной (l = 300 мм) и тонкостенной ($\Delta r \approx$ 10 мм) трубчатой ($2r \approx 110$ мм) плазмы во внешнем слабом продольном магнитном поле (B = 175 Гс). Проблема состояла в том, что плазму необходимо было создать внутри металлической трубы вблизи ее стенки на расстоянии от нее всего 3.5 см. Важным достоинством работы является то, что трубчатая плазма получена без использования термоэмиссионного катода, но с принудительным созданием затравочных электронов, инициирующих развитие ионизационных лавин. Цилиндрическая камера, в которой формировалась трубчатая плазма, прокачивалась аргоном высокой чистоты (99.998%) со скоростью около 1 м/с при давлении $P = 10^{-3}$- 10^{-2} Торр. Установлено различие в динамике пробоя, завершающегося формированием трубчатого разряда, при двух способах создания затравочных электронов. В первом из них импульсный разряд, предшествующий подаче высокого напряжения основного разряда, создавал предионизующую плазму в небольшой области вокруг секционированных катодов. Во втором способе затравочные электроны создавались во всей рабочей зоне разрядной камеры ВЧ разрядом с частотой 85 кГц и длительностью около одной секунды. Высокоскоростная съемка 4-кадровой ICCD

камерой позволила установить динамику формирования разряда на всех его стадиях. Проведены измерения продольного и радиального тока разряда. Полученные результаты показали возможность пространственной изоляции протяженной трубчатой плазмы от металлической стенки разрядной камеры за счет использования слабого продольного магнитного поля.

Литература

1. Yu. Akishev, T. Alekseeva, V. Karalnik, A. Petryakov. Phenomenology of High-Current Discharge in N2 and He at Medium Pressures between Two Electrodes of Rail Geometry. *Plasma Physics Reports*, 2023, Vol. **49**, No. 5, pp. 549–558., DOI: 10.1134/S1063780X2260181X

2. Акишев Ю.С., Бахтин В.П., Булейко А.Б., Лоза О.Т., Петряков А.В., Раваев А.А., Фефелова Е.С. Формирование протяженной трубчатой плазмы в аргоне при низком давлении и в слабом продольном магнитном поле. Принята к печати в *Plasma Physics Reports*

Отделение теоретической физики, вычислительной математики и перспективных разработок

Филиппов Анатолий Васильевич, научный руководитель отделения, д.ф.-м.н.

Исследование физических процессов в неидеальной плазме

Рассмотрена задача о взаимодействии трех заряженных частиц, размером одной из которых можно пренебречь [1]. Методом разложения по шаровым гармоникам найдены уравнения для коэффициентов разложения потенциала электрического поля. Получены выражения для декартовых компонент силы и момента силы взаимодействия. Показано, что несмотря на нарушение аксиальной симметрии при добавлении третьей частицы, при равномерной зарядке частицы сферической формы все компоненты вектора момента силы, действующей на нее, равны нулю. Путем выделения вкладов зарядов-изображений в явном виде получены формулы для поверхностной плотности заряда и силы взаимодействия частиц. Исследованы условия возникновения притяжения между одноименно заряженными сферическими частицами в зависимости от положения точечной.

На основе интегральных уравнений Орнштейна–Цернике для многокомпонентной жидкости проведено исследование термодинамической устойчивости многокомпонентной плазмы [2]. В условиях применимости дебаевского приближения для прямых корреляционных функций для всех компонент плазмы, кроме самой неидеальной подсистемы, для плазмы с любым числом компонент выполнен переход к однокомпонентному уравнению Орнштейна–Цернике для самой неидеальной подсистемы. Показано, что все парные корреляционные функции, структурные факторы заряд-заряд и частица-частица остаются положительными при всех значениях аргумента во всем исследованном диапазоне параметра неидеальности самой неидеальной подсистемы. Исследованы условия нарушения термодинамической устойчивости трехкомпонентной пылевой плазмы при разных знаках заряда пылевых частиц и разных их концентрациях.

Проведены экспериментальные и аналитические исследования структурных и динамических свойств монослоя, состоящего из пылинок, в электростатической ловушке в плазме ВЧ-разряда [3]. Экспериментально показана возможность формирования монослоя с изотропным распределением межчастичного расстояния и кинетической энергии частиц в структуре. Изотропия имеет решающее значение для изучения различных процессов в таких системах, в том числе кинетики фазовых переходов, формирования направленных потоков, распространения волн и других.

Рассмотрено электростатическое взаимодействие наночастиц, обусловленное перекрытием двойных электрических слоев, и взаимодействие Ван-дер-Ваальса,

вызванное квантовыми и термодинамическими флуктуациями электромагнитных полей [4,8]. Электростатическое взаимодействие рассмотрено на основе линеаризованного уравнения Пуассона–Больцмана для частиц с фиксированным электрическим потенциалом их поверхности. Получено точное решение задачи как для одинаковых частиц, так и для частиц сильно отличающихся размеров. Для взаимодействия Ван-дер-Ваальса учтено экранирование статических флуктуаций и запаздывание электромагнитных полей для дисперсионной части взаимодействия. Рассчитана полная энергия взаимодействия двух частиц для диапазона возможных концентраций ионов в электролите от 10^{-2} до 10^{-6} моль/л и размеров наночастиц от 1 до 10^3 нм. Обнаружено преобладание силы Ван-дер-Ваальса над силой экранированного электростатического отталкивания при высоких концентрациях электролита в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-3} моль/л как при малых, так и при больших межчастичных расстояниях.

Проведены экспериментальные исследования коррозии железа в низкотемпературной плазме влажного воздуха, формируемой под действием пучка быстрых электронов, в зависимости от величины относительной влажности воздуха [5]. Показано, что поток быстрых электронов, который является идеальным имитатором действия радиоактивного β-излучения, значительно интенсифицирует коррозию железа в плазмообразующей газовой среде, в которой одновременно присутствуют кислород и пары воды. Установлено, что скорость коррозии в условиях радиоактивного облучения резко возрастает, когда относительная влажность воздуха превышает 10%. Проведено численное моделирование ионного состава плазмы с учетом 12 положительных и 12 отрицательных гидратированных ионов при разных интенсивностях источника внешней ионизации и при разных значениях относительной влажности от 10^{-6} до 100%. На основе проведенных оценок выдвинута гипотеза об определяющей роли кластерных гидратированных ионов, обильно образующихся в плазме влажного воздуха при атмосферном давлении, в гетерогенных процессах окисления железа.

Методами квантовой химии исследованы изомеры ионно-молекулярных комплексов $H^+(H_2O)_n$, включающих до шести молекул воды [6]. Позиции атомов в изомерах, соответствующие глобальному и наиболее глубоким локальным минимумам потенциальной энергии, рассчитаны с использованием алгоритма случайного поиска. Выполнена оценка энергий активации некоторых конфигурационных превращений. В гармоническом приближении определены термодинамические характеристики кластеризации и распада комплексов, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными. Показана возможность упрощения теоретического исследования реакций путем усреднения термодинамических характеристик по различным каналам для энергетически близких изомеров. Установлена слабая зависимость энтропии реакции от размера комплекса. Для объяснения результатов вычислений предложена упрощенная модель, использование которой для оценки энтропии реакций кластеризации и распада комплексов дает хорошее согласие с экспериментом.

Исследовано влияние диэлектрической пленки на поверхности проводящих пылевых частиц на их электростатическое взаимодействие [7]. Особое внимание уделено случаю, когда радиус одной из них много больше радиуса второй и случаю неравномерного распределения поверхностного заряда с вариантами равномерного распределения свободного заряда на каждой из макрочастиц по всей поверхности, по левым и/или правым полушариям. Разработана методика расчета медленно сходящихся рядов с использованием гипергеометрических функций Гаусса и путем введения новых функций, для которых получены рекуррентные соотношения и методика численного расчета.

Проведены экспериментальные исследования влияния шероховатости поверхности образцов железа на скорость их коррозии в низкотемпературной плазме влажного воздуха атмосферного давления, генерируемой пучком быстрых электронов [9]. Установлено, что

процесс плазмохимической коррозии железа, инициированный воздействием плазмы влажного воздуха, имеет две характерные временные стадии: плазменную и постплазменную, которые существенно различаются по длительности, скорости коррозии и конечным продуктам. Показано, что величина шероховатости поверхности не оказывает заметного влияния на скорость коррозии на плазменной стадии, в то время как на постплазменной стадии скорость коррозии заметно увеличивается с ростом величины шероховатости.

В рамках теории функционала плотности выполнено исследование взаимодействия наночастицы карбида титана с подложками алюминия (100), (110) и (111) [10]. Определены энергии взаимодействия наночастицы с подложкой, проведен анализ распределения электронной плотности и функции локализации электронов между атомами алюминия, титана и углерода. Установлено, что атомы верхних слоев подложек алюминия (100) и (110) в результате взаимодействия с наночастицей существенно смещаются относительно своих исходных позиций, в то время как для подложки (111) характерно незначительное смещение атомов. Взаимодействие между атомами алюминия и углерода на межфазной границе Al–TiC обусловлено образованием ковалентных химических связей Al–C. Образующие карбидные связи атомы алюминия не формируют химических связей с атомами титана. Атомы алюминия, расположенные по соседству с атомами титана и не участвующие в формировании карбидных связей, образуют связи Al–Ti металлического типа.

Литература

1. М.М. Родин, А.В. Филиппов, Взаимодействие двух заряженных диэлектрических шаров с точечным зарядом, ЖЭТФ, 2023, том 163, вып. 3, стр. 321–334, DOI: 10.31857/S0044451023030033 [M. M. Rodin, A. V. Filippov, Interaction of Two Charged Dielectric Spheres with a Point Charge, J. Exp. Theor. Phys., 2023, Vol. 136, No. 3, pp. 279–291. DOI: 10.1134/S1063776123030160]
2. А.В. Филиппов, Термодинамическая устойчивость многокомпонентной неидеальной плазмы, Физика плазмы, 2023, т.49, №1, с.25-32 DOI: 10.31857/S0367292122601321 [A. V. Filippov, Thermodynamic Stability of a Multicomponent Non-Ideal Plasma, Plasma Physics Reports, 2023, Vol. 49, No. 1, pp. 49–56; DOI: 10.1134/S1063780X22600967],
3. A.A. Alekseevskaya, E.V. Vasilieva, A.V. Filippov, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, Isotropic and anisotropic monolayer structures in RF discharge plasma, Molecules, 2023, v.28, 3259, pp.1-18. https://doi.org/10.3390/molecules28073259
4. А.В. Филиппов, В.М. Старов, Электростатическое и ван-дер-ваальсовское взаимодействие наночастиц в электролитах, Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 8, с. 604 – 611, 2023 г. DOI: 10.31857/S1234567823080074, [A.V. Filippov, V.M. Starov, Electrostatic and Van Der Waals Interactions of Nanoparticles in Electrolytes, JETP Letters, 2023, Vol. 117, No. 8, pp. 598–605. DOI: 10.1134/S002136402360074X]
5. В.Н. Бабичев, К.Э. Галеева, А.Н. Кириченко, А.А. Некрасов, А.В. Угодчикова, Н.И. Трушкин, А.В. Филиппов, Ю.В. Черепанова, В.Е. Черковец, Коррозия железа в радиационной плазме влажного воздуха, Физика плазмы, 2023, том 49, № 5, с. 412–424. DOI: 10.31857/S036729212260159X [V. N. Babichev, K. E. Galeeva, A. N. Kirichenko, A. A. Nekrasov, A. V. Ugodchikova, N. I. Trushkin, A. V. Filippov, Yu. V. Cherepanova, and V. E. Cherkovets / Iron Corrosion in the Radiative Plasma of Moist Air// Plasma Physics Reports, 2023, Vol. 49, No. 5, pp. 563–574. DOI: 10.1134/S1063780X22601924]
6. В.В. Решетняк, О. Б. Решетняк, А.В. Филиппов, Структура ионно-молекулярных комплексов $H^+(H_2O)_n$ для n = 2-6 и термодинамические характеристики гидратации протонов в газовой среде, ЖЭТФ, 2023, том 164, вып. 1 (7), стр. 5-22 DOI: 10.31857/S0044451023070015 [V. V. Reshetnyak, O. B. Reshetnyak, A. V. Filippov, Structure of Ion-Molecular $H^+(H_2O)_n$ (n = 2–6) Complexes and the Thermodynamic

Characteristics of Proton Hydration in Gas Atmosphere, J. Exp. Theor. Phys., 2023, Vol. 137, No. 1, pp.1-16; DOI: 10.1134/S1063776123070117]
7. А.В. Филиппов, Электростатическое взаимодействие двухслойных макрочастиц, ЖЭТФ, 2023 том 164, вып. 1 (7), стр. 37-55, DOI: 10.31857/S0044451023070040 [A. V. Filippov, Electrostatic Interaction of Bilayer Macroparticles, J. Exp. Theor. Phys., 2023, Vol. 137, No. 1, pp. 30–46; DOI: 10.1134/S1063776123070105]
8. A.V. Filippov, Victor Starov, "Interaction of nanoparticles in electrolyte solutions", J. Phys. Chem. B 2023, 127, 6562−6572; https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.3c01220
9. В.Н. Бабичев, Д.В. Высоцкий, К.Э. Галеева, А.Н. Кириченко, А.А. Некрасов, А.В. Угодчикова, Н.И. Трушкин, А.В. Филиппов, Ю.В. Черепанова, В.Е. Черковец, Особенности плазмохимической коррозии железа в электронно-пучковой воздушной плазме», Физика плазмы, 2023, т.49, №11, с.1140-1150. DOI: 10.31857/S0367292123601005[V. N. Babichev, D. V. Vysotskyi, K. E. Galeeva, A. N. Kirichenko, A. A. Nekrasov, A. V. Ugodchikova, I. I. Trushkin, A. V. Filippov, Yu. V. Cherepanova, and V. E. Cherkovets, Specific Features of Plasmachemical Corrosion of Iron in the Air Plasma of an Electron Beam, Plasma Physics Reports, 2023, Vol. 49, No. 11, pp. 1322–1331 DOI: 10.1134/S1063780X23601542]
10. Решетняк В.В., Аборкин А.В., Филиппов А.В., Взаимодействие атомов на межфазной границе Al-TiC, ЖЭТФ, 2023 том 164, вып. 6 (12), стр. 996–1007 DOI: 10.31857/S0044451023120131 [V. V. Reshetnyak, A. V. Aborkin, and A. V. Filippov. Interaction of Atoms at the Al-TiC Interface, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2023, Vol. 137, No. 6, pp. 878–887 DOI: 10.1134/S1063776123120129].

Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”

119017, Москва, Россия, ул. Большая Ордынка 24

Ильгисонис Виктор Игоревич, директор направления научно-технических исследований и разработок, д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Трёхмерное равновесие плазмы в токамаке с тороидальной асимметрией n = 1

В экспериментальных установках симметрия магнитной конфигурации токамака неизбежно нарушается из-за искажений магнитного поля и дефектов сборки. Хотя отклонение от осевой симметрии в токамаках невелико, оно оказывает существенное влияние на такие важные для удержания плазмы явления, как динамика винтовых мод, взаимодействующих с резистивной стенкой (resistive wall modes), и локализованных на краю мод (edge-localized modes – ELMs), удержание энергичных частиц, неоклассический перенос и пр. Число тороидальных гармоник, учитываемых в Фурье-разложении при численной реконструкции равновесия, увеличивается с ростом периода поля. Таким образом, конфигурации с низким тороидальным волновым числом n являются наиболее сложными для вычислений, даже когда трёхмерные эффекты малы [1]. Тороидальная асимметрия с низкими n типична для токамаков, снабжённых катушками для контроля ELM и тестовыми бланкет-модулями, а также для токамаков, рабочие режимы которых демонстрируют наличие долгоживущих насыщенных идеальных МГД-мод [2]. Для анализа таких эффектов необходима адекватная модель равновесия плазмы, допускающая наличие крупномасштабных тороидальных неоднородностей.

Задавая магнитное поле с использованием цилиндрической системы координат (r, φ, z) модифицированным смешанным представлением

$$\mathbf{B} = \gamma[\nabla\Psi \times \nabla\varphi] + F\nabla\varphi - \frac{F}{r^2|\nabla\Psi|^2}\frac{\partial\Psi}{\partial\varphi}\nabla\Psi,$$

где $\Psi = \Psi(r, \varphi, z)$ обозначает магнитную поверхность, $F = F(r, \varphi, z)$ – функцию полоидального тока, а $\gamma = \gamma(r, \varphi, z)$ калибрует полоидальный магнитный поток, в

условиях «слабой» аксиальной асимметрии (с параметром малости ϵ) получаем универсальное выражение функции магнитной поверхности в форме

$$\Psi = \Psi_0 + \epsilon\left[(k_0\cos\varphi + p_0\sin\varphi)R\frac{\partial\Psi_0}{\partial r} + (k_1\cos\varphi + p_1\sin\varphi)\left(z\frac{\partial\Psi_0}{\partial r} - r\frac{\partial\Psi_0}{\partial z}\right)\right], \qquad (1)$$

описывающее -поправки к осесимметричному равновесию плазмы в осесимметричной системе с магнитными поверхностями Ψ_0 = *const,* удовлетворяющими стандартному уравнению Грэда-Шафранова (УГШ); величины *k* и *p* – числовые постоянные.

Выражение (1) позволяет аналитически рассчитать несимметричные поправки $n = 1$ к любой двумерной равновесной конфигурации плазмы, удовлетворяющей УГШ. Полученное решение тривиально удовлетворяет условию $\mathbf{B}\cdot\nabla\Psi=0$ и гарантирует решение остальных уравнений равновесия с точностью вплоть до $\sim \epsilon^2$. Поэтому оно пригодно для описания слабо осенесимметричных плазменных конфигураций, в частности, для расчёта трёхмерных эффектов в токамаках. Такое аналитическое представление равновесия обеспечивает высокое пространственное разрешение для последующих расчётов устойчивости и переноса в трёхмерных полях.

Ключевые слова: токамак, равновесие плазмы, тороидальная асимметрия

Литература

1. E.A. Sorokina, V.I. Ilgisonis. 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2023), 2023, IAEA-CN-316/2422. https://www.iaea.org/sites/default/files/23/10/cn-316_fec_preliminary_program.pdf page 519

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

220072 Минск, Беларусь, ул. П. Бровки, 15

Отделение физики плазмы и плазменных технологий

Лаборатория физики плазменных ускорителей

Асташинский Валентин Миронович,

заведующий отделением, заведующий лабораторией,

доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Беларуси

Модификация поверхностных свойств материалов под воздействием компрессионных плазменных потоков для существенного улучшения их эксплуатационных характеристик

Воздействие высокоэнергетических компрессионных плазменных потоков, генерируемых работающими в режиме ионного токопереноса квазистационарными сильноточными плазменными ускорителями, на различные материалы открывает принципиально новые возможности для эффективной модификации их поверхностных свойств, недоступной для других методов обработки.

Впервые проведено легирование атомами циркония поверхностных слоев алюминия и его сплавов (А95, АК12, АК12ММгН) при воздействии на них компрессионных плазменных потоков. Установлено, что в легированных слоях алюминия и силуминов формируются метастабильные соединения Al_3Zr с кристаллической структурой $L1_2$ и $(Al,Si)_3Zr$ со структурой $D0_{22}$ соответственно. Показано, что легирование исследуемых сплавов цирконием позволяет увеличить микротвёрдость приповерхностного слоя в 1,4 – 3 раза. Исследование термической стабильности структурно-фазового состояния легированных слоев при 550 °С, показало, что в результате отжига алюминия происходит трансформация фазы Al_3Zr, имеющей структуру $L1_2$, в соединение Al_3Zr со структурой $D0_{23}$, а в сплавах системы Al – Si происходит

распад $(Al,Si)_3Zr$ и формирование $ZrSi_2$. Показано, что синтезированный поверхностный слой обладает повышенной жаропрочностью [1].

Впервые при воздействии компрессионным плазменным потоком, генерируемым квазистационарным плазменным ускорителем, на вольфрамовую пластину с тонким покрытием ниобия (толщиной 2 мкм) синтезирован металлургически связанный с подложкой вольфрамо-ниобиевый сплав. Показано, что воздействие компрессионного плазменного потока с плотностью поглощенной образцом энергией 35-70 Дж/см^2 и длительностью импульса 100 мкс приводит к плавлению ниобиевого покрытия и части вольфрамовой подложки с последующим жидкофазовым перемешиванием расплавленного слоя и синтезу сплава WNb в модифицированном слое, содержащем также и твердый раствор W(Nb) bcc. Установлено, что толщина синтезированного сплава WNb составляет 10-20 мкм [2].

Литература

1. В.И. Шиманский, В.В. Шевелева, В.В. Углов, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий. Термическая стабильность структурно-фазового состояния алюминия и сплавов системы Al – Si, легированных атомами циркония при воздействии компрессионных плазменных потоков // Физика и химия обработки материалов. – 2023. – № 3. – С. 18-32. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-5-5-17
2. A. Ryskulov, V. Shymanski, V. Uglov, I. Ivanov, V. Astashynski, B. Amanzhulov, A. Kuzmitski, A. Kurakhmedov, A. Filipp, Y. Ungarbayev, M. Koloberdin. Structure and Phase Composition ofWNb Alloy Formed by the Impact of Compression Plasma Flows // Materials 2023, 16, 4445 (1-13). https://doi.org/10.3390/ma16124445

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 плазменного реактора для прецизионных аддитивных технологий атомно-слоевого осаждения и травления материалов микро- и наноэлектроники на основе импульсно-периодических разрядов с протяженным щелевым катодом

Разработан прототип плазменного реактора для плазма-стимулированных технологий атомно-слоевого осаждения и травления сверхтонких слоев материалов микро- и наноэлектроники. В основе плазменного реактора лежит источник ленточных электронных пучков на основе высоковольтных импульсно-периодических наносекундных разрядов с протяженным полым катодом.

Исследованы:

- пространственная структура и динамика развития ионизационных фронтов в в полом катоде и в плазменном столбе между электродами;

- в двухчленном приближении рассчитаны функции распределения электронов по энергиям при наносекундном разряде с щелевым полым катодом;

-экспериментально исследована динамика наработки возбужденным атомов в процессе формирования и распространения ионизационных фронтов в полом катоде;

-разработана численная модель оценки влияния внешнего магнитного поля характеристики наносекундного электрического пробоя газы;

- разработан прототип плазменного реактора для прецизионных аддитивных технологий с возможностью модификации поверхности материалов микро- и наноэлектроники площадью до 15 см^2.

Литература

1. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, K. M. Rabadanov, G. S. Shakhsinov, M. Z. Zakaryaeva and M. B. Kurbangadzhieva, Plasma Sci. Technol. 25 (2023) 035405 (8pp), https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac9aa8 Q3
2. J. Yao, Ch. Yan, Ch. Yuan, E. A. Bogdanov, K. M. Rabadanov, Zh. Chu and A. A. Kudryavtsev, Plasma Sources Sci. Technol. 32 (2023) 055006 (13pp). https://doi.org/10.1088/1361-6595/acd3aa Q1
3. N. A. Ashurbekov, M. B. Kurbangadzhieva, K. O. Iminov, G. Sh. Shakhsinov and K. M. Rabadanov, Journal of Applied Spectroscopy, 89, 6, 2023, https://doi.org/10.1007/s10812-023-01468-z Q4
4. Chen Chen, Kurban Rabadanov, Nazir Ashurbekov, Chengxun Yuan, Ali Shakhrudinov. Transverse Magnetic Field Effect on the High-Voltage Pulsed Discharge Plasma in Helium. Journal of Plasma Physics Vol.89 (2024). Issue 1. (принята в печать). Q1
5. Ашурбеков Н.А., Закарьяева М.З., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Омарова П.Х. Плазменный реактор для прецизионных аддитивных технологий на основе импульсно-периодического разряда с протяженным щелевым катодом.// В сборнике: Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии. Материалы III Международной конференции. Издательство: Издательский дом МЭИ (Москва,) 2023. С. 18-19. eLIBRARY ID: 54792619

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

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр.2.

Физический факультет Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества. Руководитель группы плазменной газодинамики и визуализации потоков.

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

Изучение тепловых процессов в сверхзвуковых потоках при воздействии импульсных разрядов

Исследована эволюция области теплового излучения стенок профилированного газодинамического канала после нагрева при инициирования импульсного разряда. Проведена панорамная визуализация и регистрация на основе термографии с высоким разрешением областей энерговклада на стенках профилированного канала рабочей камеры при различной локализации плазмы разряда в структурированном высокоскоростном потоке. Количественно исследованы зависимости теплового воздействия наносекундного приповерхностного разряда на течение в прямоугольном канале с уступом от параметров высокоскоростного течения газа. Получены теневые изображения нестационарных ударно-волновых полей возникающих при инициировании импульсных разрядов в канале с прямоугольной вставкой на основе высокоскоростной съемки. Проведено сравнение термографических данных об эволюции тепловых полей на стенках канала с данными по динамике ударно-волнового воздействия на поток, реализованного при инициировании импульсных разрядов в канале. Экспериментальных данные сравнивались с результатами численного моделирования нестационарных теплофизических полей на основе уравнений газодинамики. Выявлено 4 режима самолокализации наносекундного разряда в зависимости от скорости потока. Защищена 1 диссертация (Долбня Д.И. спец. 013.3).

Литература

1. Znamenskaya I. A., Doroshchenko I. A., Sysoev N. N. Computer vision study of the flow generated by a sliding discharge // Научная визуализация. — 2023. — Vol. 15, no. 4. — P. 1–15. DOI: 10.26583/sv.15.4.01
2. Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow / I. A. Znamenskaya, A. E. Lutsky, D. I. Tatarenkova et al. // Physics of Fluids. — 2023— Vol. 35, no. 7.
3. Динамика тепловых потоков нагретой импульсным сильноточным разрядом области канала. И. А. Знаменская, Е. Ю. Коротеева, Е. А. Карнозова, Т. А. Кули-Заде // Теплофизика высоких температур. — 2023. — Т. 61, № 1. — С. 18–23. DOI: 10.31857/S0040364423010052
4. Формирование ударно-волнового течения при локализации наносекундных разрядов в нестационарном потоке в канале с препятствием / Д. И. Долбня, И. А. Знаменская, А. Е. Луцкий, Н. Н. Сысоев // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2023. — № 1. — С. 144–150. DOI: 10.31857/S0568528122600308

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

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

Лаборатория физики низкотемпературной плазмы

Группа профессора Карасева Виктора Юрьевича

1. Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И., Новиков Л.А. // Физика плазмы. 2023. Т.49. № 2. С. 185–192. DOI: 10.31857/S0367292122601138.
2. Полищук В.А, Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // Известия Российской АН. Серия Физическая. 2023. Т.87. № 10. С. 1430-1433. DOI: 10.31857/S0367676523702496.
3. Дзлиева Е.С., Горбенко А.П., Ермоленко М.А., Новиков Л.А., Павлов С.И., Полищук В.А., Карасев В.Ю. // Физика плазмы. 2023. Т.49. № 1. С. 92–97. DOI: 10.31857/S0367292122600959.
4. Новиков Л.А., Карасев В.Ю., Павлов С.И., Балабас М.В., Крылов И.Р., Дзлиева Е.С., Майоров С.А. // Физика плазмы. 2023. Т.49. № 1. С. 98–102. DOI: 10.31857/S0367292122600911.
5. Дзлиева Е.С., Дьячков Л.Г., Карасев В.Ю., Новиков Л.А. Павлов С.И. // Физика плазмы. 2023. Т.49. № 1. С. 7–11. DOI: 10.31857/S0367292122600947.
6. Полищук В.А, Балабас М.В., Дзлиева Е.С., Горбенко А.П., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2023. № 12. С. 123–128. DOI: 10.31857/S102809602312021X.
7. Павлов С.И., Дзлиева Е.С., Дьячков Л.Г., Новиков Л.А., Балабас М.В., Карасев В.Ю., // Физика плазмы. 2023. Т.49. № 10. С. 995–1002. DOI: 10.31857/S036729212360053X.
8. Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Новиков Л.А. Павлов С.И., Голубев М.С., Машек И.Ч. // Журнал Технической Физики. 2023. Т.93. № 10. С.1429-1433. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56280.160-23.
9. L.A. Novikov, E.S. Dzlieva, M.S. Golubev, S.I. Pavlov, M.A. Gasilov, & V.Yu. Karasev // High Temperature Material Processes. 2023, Vol. 27(4), P. 45–50. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v27.i4.60.
10. L.A. Novikov, S.I. Pavlov, E.S. Dzlieva, S.A. Tarasov, D.V. Yanicin & V.Yu. Karasev THRESHOLD EFFECT IN DUSTY CLUSTERS IN A MAGNETIC FIELD // High Temperature Material Processes. 2024, Vol. 28(1), P. 55–62. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2023047765

Группа профессора Голубовского Юрия Борисовича

1. Siasko A. V., Karasev V. Y., Golubovskii Y. B. // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – V. 32. – №. 10. – P. 105015. DOI: 10.1088/1361-6595/ad03bd
2. Siasko A., Golubovskii Yu., Pavlov S., Dzlieva E., Novikov L., Golubev M., Karasev V. // Physics of Plasmas. – 2023. – V. 30. – №. 3, P. 033701. DOI: 10.1063/5.0135329
3. Siasko A. V., Golubovskii Y. B., Balabas M. V. // Physica Scripta. – 2022. – V. 98. – №. 1. – P. 015607. DOI: 10.1088/1402-4896/aca62f

Группа профессора Тимофеева Николая Александровича и Сухомлинова Владимира Сергеевича

1. Timofeev, N., Sukhomlinov, V., Zissis, G., Mukharaeva, I., Borodina, V., & Badr, A. H. // 2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18). – IEEE, 2023. – P. 1-5. DOI: 10.1109/LS1858153.2023.10170552
2. Sukhomlinov, V., Timofeev, N., Zissis, G., Zaitsev, A., & Badr, A. H. // 2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18). – IEEE, 2023. – P. 1-4. DOI: 10.1109/LS1858153.2023.10169953
3. Sukhomlinov, V., Mustafaev, A., Koubaji, H., Timofeev, N., & Zaitsev, A. // Journal of the Physical Society of Japan. – 2023. – V. 92. – №. 4. – P. 044501. DOI: 10.7566/JPSJ.92.044501
4. Timofeev, N. A., Solikhov, D. K., Sukhomlinov, V. S., & Mukharaeva, I. Y. // High Energy Chemistry. – 2023. – V. 57. – №. Suppl 1. – P. S125-S131. DOI: 10.1134/S0018143923070524

Группа профессора Ионих Юрия Зиновьевича

1. Meshchanov A. V., D'yachkov S. A., Ionikh Y. Z. // Plasma Physics Reports. – 2023. – V. 49. – №. 9. – P. 1124-1133. DOI: 10.1134/S1063780X23600962
2. Meshchanov A. V., Shishpanov A. I., Ionikh Y. Z. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2023. – V. 57. – №. 1. – P. 015204. DOI: 10.1088/1361-6463/acfc53
3. Дьячков С. А., Ионих Ю. З., Мещанов А. В. "Аномальное" воздействие освещения на пробой в длинной разрядной трубке в ксеноне // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – №. 9. – С. 924-934. DOI: 10.31857/S0367292123600759

Группа профессора Иванова Владимира Александровича

1. Ivanov V. // 2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18). – IEEE, 2023. – P. 1-3. DOI: 10.1109/LS1858153.2023.10170419
2. Иванов. В.А. // Оптика и спектроскопия – 2023. – Т131. 57. – №. 9 – Р. 1173. DOI: 10.61011/OS.2023.09.56602.5307-23
3. Иванов В.А., Скобло Ю.Э. О МЕХАНИЗМЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЗАСЕЛЕНИЯ 3p1УРОВНЯ АТОМА НЕОНА В He-Ne ПЛАЗМЕ. Наука СПбГУ-2022. Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2023. Стр. 327-330.
4. Иванов В.А. СПЕКТРОСКОПИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ. РОЛЬ ИОНОВ Ne2+ , Ne+ и Ne++ В ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ. Наука СПбГУ-2022. Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2023. Стр. 331-334.

Остальные публикации:

1. Samokhvalov, A. A., Sergushichev, K. A., Eliseev, S. I., Smirnov, A. A., Bronzov, T. P., Timshina, M. V., & Burtsev, V. A. // Physics of Plasmas. – 2023. – V. 30. – №. 5. P. 053101. DOI: 10.1063/5.0143559
2. Eliseev S. I. // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – V. 32. – №. 8. – P. 085002. DOI: 10.1088/1361-6595/aceaa6
3. Samokhvalov, A. A., Eliseev, S. I., Smirnov, A. A., Sergushichev, K. A., Timshina, M. V., Bronzov, T. P., ... & Bolshakov, E. P. // High Energy Chemistry. – 2023. – V. 57. – №. Suppl 1. – P. S188-S192. DOI: 10.1134/S0018143923070408

4. Devdariani A. Asymptotically spin-forbidden optical transitions in quasimolecules //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – V. 2439. – №. 1. – P. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/2439/1/012014

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ)

Инженерный институт КФУ, каф. Технической физики и энергетики
Кашапов Н.Ф. д.т.н.; Кашапов Р.Н., к.т.н.; Кашапов Л.Н.; Чебакова В.Ю., к.ф.-м.н.

Исследование многофазных сред плазменно-электролитных разрядов. Водородная энергетика

Низкотемпературная плазма разряда с жидкими электродами вызывает большой интерес в области фундаментальных и прикладных исследований, но до сих пор нет единой классификации плазменно-жидкостных систем аналогично той, которая существуют для разрядов с твердыми электродами (коронный, тлеющий, дуговой, искровой и др.). Это действительно быстро развивающаяся область знаний на стыке физики и химии плазмы и физики и химии жидкостей.

Изучение фундаментальных процессов будет иметь большой практический выход для энергетики, экологии и других отраслей, включая производство водорода в больших объемах, очистки сточных вод, электролиза алюминия и других цветных металлов.

Нанесение хромовых покрытий является широко распространенной технологией для получения защитного износостойкого антикоррозионного слоя. Перспективным направлением в современной гальванотехнике является разработка менее токсичных, эффективных и устойчивых электролитов на основе соединений Cr(III). Одним из современных методов осаждения хромовых покрытий является плазменно-электролитный метод, заключающийся в совмещении электрохимических и плазменных процессов. Было проведено определение степени влияния плазменных процессов на свойства формируемого хромового покрытия. В результате исследований было установлено, что с увеличением мощности одиночных микроразрядов происходит увеличение шероховатости покрытия и уменьшение микротвердости.

Моделирование гетерогенных процессов представляет собой отдельный вид задач, где константа скорости определяется характеристиками моделируемой гетерогенной системы: площадью реагирующей поверхности, которая зависит от шероховатости поверхности электрода и его однородности, состава электролита, значения водородного показателя. Была разработана математическая модель гетерогенного процесса между металлическим электродом и жидким электролитом с выделением твердой фазы в приближении пористого осадка. Разработан численный алгоритм нахождения скоростей констант приэлектродных процессов. Проведено исследовались влияние наличия параллельных несвязанных между собой реакций на электроде при одновременном выделении веществ в разных фазах, было показано влияние фазы зародышеобразования в начальный момент и установление линейного протекания процесса с течением времени.

Литература

1. Сергеев П.В. Получение наночастиц оксида титана в плазменно-электролитном процессе/ П.В. Сергеев, Л.Н. Кашапов, Р.Н. Кашапов, Н.Ф Кашапов// Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Отв. за выпуск Д.В. Платонов. Красноярск, 2023. С. 436-438.
2. Kashapov L.N. Mathematical Modeling of Cathodic Zinc Electroextraction Processes/ L.N. Kashapov, N.F. Kashapov, V.Yu. Chebakova, E.V. Chebakova // Journal of Siberian Federal University - Mathematics and Physics. 2023, vol. 16(5), p. 572–582

3. Ayachi Omar A. The Effect Magnet Design on Controlling the Target Erosion Profile for DC Magnetron with the Rectangular Target/A. Ayachi Omar, A.G. Luchkin, M.R. Alsayed Omar, N.F. Kashapov//Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2023, vol. 43(1), P. 361–379
4. Chebakova V. Mathematical Modeling of Heterogeneous Systems: Inert Electrode - Alkaline Electrolyte/ V. Chebakova, L. Kashapov, N. Kashapov //Lecture Notes in Networks and Systems. 2023, vol. 706, P. 978–987
5. Chebakova V.Y. Simulation of Hydrogen Yield During Electrolysis of Alkaline Electrolytes/ V.Y. Chebakova, L.N. Kashapov, N.F. Kashapov, R.N. Kashapov //Lobachevskii Journal of Mathematics, 2023, vol. 44(7), P. 2607–2612

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.

Получение водорода в микроволновом разряде в водных растворах этанола и в жидких углеводородах при атмосферном давлении.

В последнее время большое внимание уделяется проблеме получения водорода с использованием низкотемпературной плазмы. В задачах получения водорода используются разные типы электрических разрядов: барьерный, ВЧ, СВЧ, дуговые разряды. Одним из новых методов получения плазмы является СВЧ разряд в жидкостях. Этой тематикой в ИНХС РАН занимаются в течение ряда лет и впервые получены фундаментальные знания об физических процессах в этом типе разряда и о его особенностях. Разряд нестационарный и плазмохимические процессы протекают в газовом пузыре, находящемся внутри жидкости на конце СВЧ антенны. По истечению определенного времени, необходимого для увеличения размеров пузыря обеспечивающего равенство нулю равнодействующей сил тяжести, архимедовой и поверхностного натяжения, пузырь отрывается от антенны и плазма в нем исчезает. Процесс повторяется. Эти знания позволили перейти к решению ряда конкретных задач, в частности, к проблеме получения водорода.

Перспективным сырьем для получения водорода в плазме электрических разрядов являются спирты и, в частности, этанол. Это связано с преимуществами этанола перед другими источниками водорода, например, углеводородами: безопасность и удобства транспортировки и хранения, широкий набор исходных материалов для получения этанола, высокое содержание водорода, по сравнению с другими топливами, малая биотоксичность и др.

Исследован процесс получения обогащенной водородом смеси газов в микроволновом разряде, создаваемом в водных растворах этанола при атмосферном давлении и проведен анализ полученных результатов с применением разработанной ранее нульмерной модели процесса. С равнение с результатами, полученными в других типах разряда показало перспективность этого подхода.

Изучены физико-химические характеристики микроволнового разряда в нефтяном растворителе в процессе получения водорода с использованием барботажа Ar, He и CO_2. Газовая хроматография, эмиссионная спектроскопия, высокоскоростная фотография и теневая фотография использовались для диагностики. Результаты показали зависимость выхода водорода от расхода Ar, He и CO_2. Максимальные значения выхода водорода составили 791 мл/мин и 811 мл/мин, а максимальная энергоэффективность достигла 135,6 Нл/кВт-ч и 162,2 Нл/кВт-ч в Нефрасе с барботажем Ar и He, соответственно. Изучена динамика структуры разряда, а также вращательная и колебательная температуры молекул C_2.

Литература

1. T. S. Batukaev, I. V.Bilera, G. V. Krashevskaya, Y. A. Lebedev, I. L. Epstein, Hydrogen production in microwave discharge in water solutions of ethanol at atmospheric pressure. Plasma. Process. Polym. 2023, 20, issue 6, e2300015. https://doi.org/10.1002/ppap.202300015
1. T.S. Batukaev, I.V. Bilera, G.V. Krashevskaya, Yu.A. Lebedev, Physical and Chemical Phenomena during the Production of Hydrogen in the Microwave Discharge Generated in Liquid Hydrocarbons with the Barbotage of Various Gases, Processes 2023, 11, 2292. https://doi.org/10.3390/pr11082292

ФГБУН Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук (ИХРАН)

153045, Иваново, ул. Академическая, 1

Научно-исследовательский отдел 3, группа плазмохимии

Титов Валерий Александрович, г.н.с., рук. группы плазмохимии, д.ф.-м.н.

Использование плазмы, контактирующей с жидкостью, для получения фитоактивных продуктов на основе хитозана

Исследованы процессы плазмохимической обработки уксуснокислых растворов и водных суспензий хитозана с целью получения продуктов, стимулирующих всхожесть семян и раннее развитие растений. Использовали разряд постоянного тока в воздухе, катодом которого был обрабатываемый раствор или суспензия, а также разряд в парогазовых пузырьках у поверхности электрода, погруженного в жидкость («подводный» разряд).

Определены скорости накопления водорастворимых продуктов деструкции хитозана и их энергетические выходы. Показано, что газоразрядная обработка водных суспензий позволяет без использования дополнительных реагентов получить модифицированный хитозан и его низкомолекулярные водорастворимые фракции. В отличие от разряда в воздухе, разряд между электродами, погруженными в жидкость, не приводит к значительному накоплению в ней нитрат- и нитрит-ионов.

На примере гороха показано, что модифицированная суспензия, как и выделенные из растворов низкомолекулярные фракции хитозана обладают фитостимулирующим действием: способствуют увеличению всхожести и ускоренному начальному развитию проростков при посадке в грунт, а также ускоряют накопление зеленой массы растений. Кроме того, полученные продукты замедляют развитие патогенной микрофлоры на поверхности семян.

Получение фитостимулятора путем обработки водной суспензии является достаточно простым и менее затратным способом по сравнению с обработкой растворов хитозана в кислых средах с последующим отделением водорастворимых продуктов.

Литература

1. Titov V.A., Naumova I.K., Khlyustova A.V., Sirotkin N.A. Gas Discharge Treatment of Chitosan Solutions to Obtain Biologically Active Products // High Energy Chemistry. 2023. V. 57. P. S238–S242. https://doi.org/10.1134/S001814392307055X
2. Наумова И.К., Титов В.А., Хлюстова А.В., Агафонов А.В. Получение фитоактивных продуктов путем газоразрядной обработки водной суспензии хитозана // Прикладная физика. 2023. № 5. С. 84-90. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-84-90

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

634055, г. Томск, Академический проспект, д. 2/3

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники;

лаборатория теоретической физики
Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Воробьёв Максим Сергеевич, с.н.с., д.т.н.; Дорошкевич Сергей Юрьевич, м.н.с., к.т.н.; Гришков Антон Андреевич, м.н.с.

Повышение эффективности генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в ускорителе на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда

В ускорителе электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) реализовано повышение эффективности вывода пучка в атмосферу, что определяется увеличением коэффициента вывода, равного отношению тока пучка в атмосфере к току в ускоряющем промежутке. Данный эффект проявляется при переходе от непрерывного режима генерации вспомогательного разряда к импульсно-периодическому с частотой следования импульсов десятки килогерц, характеризующийся управлением коэффициента заполнения импульсов при стабилизации среднего значения тока разряда. Используемый импульсно-периодический режим позволяет повысить амплитуду тока пучка при сохранении средней мощности разряда, и ограничивает время на развитие фонового тока ВТР, снижая ток в ускоряющем промежутке, что в конечном итоге приводит к увеличению коэффициента вывода пучка в атмосферу. При этом импульсно-перидический режим с частотой десятки килогерц способствует уменьшению количества срывов вспомогательного тлеющего разряда в дуговую форму, влияющих на стабильность генерации эмиссионной плазмы разряда, генерацию ВТР и электронного пучка. Кроме этого, повышение амплитуды тока разряда и наличие паузы между импульсами способстсвует снижению неоднородности распределения концентрации эмиссионной плазмы вспомогательного разряда до ±15%, что определяющим образом влияет на распределение тока выведенного электронного пучка. Использование разработанных режимов генерации электронного пучка открывает новые перспективы его использования в науке и технике.

Литература

1. С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьёв, М.С. Торба, А.А. Гришков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров, В.А. Леванисов. Эффективный способ генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в широкоапертурном ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии. // ПТЭ. 2023. № 3. С. 53 – 60. https://doi.org/10.31857/S0032816223020052

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники
Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.; Толкачев Олег Сергеевич, м.н.с.

Получение борсодержащих покрытий в системе с горячим анодом

Разработан уникальный ионно-плазменный метод в системе с горячим анодом для получения борсодержащих покрытий и реализованы оптимальные режимы нанесения при одновременном осаждении металла и бора. Для испарения порошка бора с помощью источника газовой плазмы ПИНК был сконструирован оригинальный анодный узел. В качестве металла использовали титан, цирконий или хром, которые испарялись вакуумно-дуговым методом. Показано, что все синтезированные покрытия на основе металла и бора являются многослойными, сформированы чередующимися слоями бора (толщина слоев 2,0-7,0 нм), находящегося в аморфном состоянии, и слоями из нанокристаллических частиц борида металла (толщина слоев 2,0-2,5 нм). Установлено, что твердость многослойного покрытия зависит от типа испаряемого металла и достигает максимальных значений, вплоть до 60 ГПа, для системы Ti-B при модуле Юнга 360 ГПа. Разработанное оборудование и метод перспективны для синтеза защитных борсодержащих сверхтвердых покрытий.

Литература

1. Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Петрикова Е.А., Толкачев О.С. Получение боридов металлов в системе с горячим анодом. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 1. С. 17–22. doi: https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.002

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

Металлокерамические жаростойкие покрытия, сформированные при вакуумно-дуговом испарении высокоэнтропийного сплава

Методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения сформированы многослойные металлокерамические покрытия на основе жаростойкого высокоэнтропийного сплава элементного состава TiNbZrTaHf. Показано, что покрытия являются нанокристаллическим (2.5-4 нм) материалом. Металлический слой имеет объемноцентрированную кубическую кристаллическую решетку (a = 0.33396 нм). Методами рентгенофазового анализа определено, что керамический слой является двухфазным (TiNbZrTaHf)N + Ta_4N). Нитрид (TiNbZrTaHf)N имеет гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку с параметром a = 4,4465 Å (D = 22 нм; $\Delta d/d = 7 \cdot 10^{-3}$). Нитрид Ta_4N имеет тетрагональную кристаллическую решетку с параметрами a = 6,8272 и c = 4,1697 Å (D = 10 нм; $\Delta d/d = 7 \cdot 10^{-3}$). Выявлено формирование переходных слоев между подложкой и металлическим слоем, между металлическим и керамическим слоями. Твердость покрытия составила 36,7 ГПа, модуль Юнга 323 ГПа. Стоит отметить перспективность использования покрытий на основе ВЭС в качестве защитных покрытий для инструмента и деталей широкого круга применений.

Литература

1. Yu.F. Ivanov, Yu.Kh. Akhmadeev, O.V. Krysina, N.N. Koval, V.V. Shugurov, E.A. Petrikova, N.A. Prokopenko, O.S. Tolkachev. Structure and Properties of Cermet Coatings Produced by Vacuum-Arc Evaporation of a High-Entropy Alloy. // Coatings. 2023. V. 13(8). P. 1381. https://doi.org/10.3390/coatings13081381

Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.; Ахмадеев Юрий Халяфович, зав. лабораторией, к.т.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.; Мерзляков Иван Игоревич, студент

Бессеточная система ускорения ионов для низкотемпературного получения α-оксида алюминия

Создана разрядная система, содержащая два генератора плазмы: ПИНК для генерации газовой плазмы и электродуговой испаритель с катодом из алюминиевого сплава А7 для генерации газометаллической плазмы, обеспечивающая регулируемое ускорение газовых и металлических ионов до энергии в десятки эВ, без перекрытия выходной апертуры плазмоограничивающей сеткой. Продемонстрирована возможность нанесения непроводящего покрытия на основе оксида алюминия с заданной энергией бомбардировки ионами растущего покрытия и поддержанием заданной температуры до 700°C за счет использования элионного (электронно-ионного) режима работы системы. Показано, что регулировка энергии ускоряемых ионов позволяет регулировать фазовый состав растущего покрытия. При температуре подложки 600 и 340 °C получено покрытие толщиной до 5 мкм, не содержащее низкотемпературных метастабильных фаз оксида алюминия. Полученные данные показывают возможность создания системы с

регулируемым фазовым составом, в т.ч. для получения однофазного покрытия из термостабильного α-Al_2O_3 при температурах подложки ниже 600°C.

Литература

1. V.V. Shugurov, I.V. Lopatin, Yu.Kh. Akhmadeev, I.I. Merzlyakov. Arc deposition of coatings based on aluminum oxide in elion mode // Proceeding of 16th International Conference on Gas Discharge Plasma and Their Applications (GDPA-2023), Ufa, 2023, https://gdpa.ru/files/abstracts/G3-P-013902.pdf
2. V.V. Shugurov, I.V. Lopatin, Y.Kh. Akhmadeev, I.I. Merzlyakov. Arc deposition of coatings based on aluminum oxide in elion mode // MATERIALS. TECHNOLOGIES.DESIGN, 2023, Vol. 5, №5(15), pp. 129-139, DOI: 10.54708/26587572_2023_5515129

Лаборатория прикладной электроники
Соловьев Андрей Александрович, зав. лабораторией, к.т.н.; Работкин Сергей Викторович, н.с., к.т.н.; Семенов Вячеслав Аркадьевич, инженер

Вакуумная установка для ионно-плазменного осаждения электролита твердооксидных топливных элементов

Установка предназначена для нанесения двухслойного тонкопленочного электролита на основе оксидов $(ZrO_2)_{0,92}$:$(Y_2O_3)_{0,08}$ и $Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{2-\delta}$ на аноды твердооксидных топливных элементов планарной конструкции. Область возможного применения: производство среднетемпературных твердооксидных топливных элементов планарной анод-поддерживающей конструкции для электрохимических энергоустановок, работающих на углеводородном топливе (метан и т.п.); нанесение тонкопленочных металлических и диэлектрических покрытий различного назначения. Степень готовности разработки к практическому применению: готова к внедрению в соответствующий реальный сектор экономики. Возможный технический и (или) экономический эффект от внедрения: установка позволяет получать электролит толщиной менее 10 мкм, что снижает омические потери в топливном элементе, и, как следствие, рабочую температуру. В результате увеличения плотности генерируемой мощности количество единичных топливных элементов в батарее может быть уменьшено, что снизит ее стоимость.

Параметры установки: размер установки – 2300×2000×1600 мм^3; потребляемая мощность – 30 кВт; метод нанесения – дуальное реактивное магнетронное распыление; размер обрабатываемых образцов – 100×100 мм^2; толщина электролита – 6 мкм; количество одновременно обрабатываемых образцов – 24 шт.; скорость нанесения – 5-30 нм/мин; полная автоматизация процесса нанесения; стабилизация процесса реактивного распыления по электрическим параметрам разряда.

Литература

1. В.А. Семенов, С.В. Работкин, М.М. Пуговкин, Н.Ф. Ковшаров, А.В. Шипилова, А.А. Со-ловьев. Вакуумная установка для ионно-плазменного осаждения электролита твердоок-сидных топливных элементов. // Materials. Technologies. Design, 2023. Vol. 5, No. 4(14). DOI: 10.54708/26587572_2023_5414
2. https://hcei.tsc.ru/ru/innovation/tehnologii/t41.html

Лаборатория пучково-плазменной инженерии поверхности, лаборатория плазменной эмиссионной электроники, отдел высоких плотностей энергии, лаборатория плазменных источников, лаборатория вакуумной электроники, лаборатория прикладной электроники
***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук**

Денисов Владимир Викторович, зав. лабораторией, к.т.н.; Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Ратахин Николай Александрович, г.н.с., академик РАН, д.ф.-м.н.; Шмаков Александр Николаевич*, в.н.с., д.ф.-м.н.; Тересов Антон Дмитриевич, н.с.; Островерхов Евгений Владимирович, м.н.с.; Ковальский Сергей Сергеевич, м.н.с.; Яковлев Владислав Викторович, н.с. и др.

Вакуумный электронно-ионно-плазменный стенд (ВЭИПС) для проведения in situ синхротронного мониторинга процессов при синтезе функциональных покрытий на поверхности материалов и изделий методами пучково-плазменной инженерии

Техническим результатом разработки является кратное (от нескольких лет до нескольких месяцев) снижение срока разработки и внедрения технологий модификации поверхности с требуемым комплексом свойств на поверхности конструкционных и инструментальных материалов, предназначенных, в том числе, для работы в экстремальных условиях. Не имеет аналогов в России. По количеству комбинированных методов электронно-ионно-плазменной инженерии поверхности, которые могут использоваться для модификации поверхности, опережает мировые аналоги. Позволяет существенно сокращать сроки разработки новых технологических процессов инженерии поверхности.

Область возможного применения: исследования в области электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности конструкционных и функциональных материалов, включая разработку многослойных, композиционных, градиентных и износостойких покрытий; определение механизмов синтеза заранее заданных структур поверхности.

Технические характеристики вакуумной камеры:

- Габаритные размеры вакуумной камеры (Д х Ш х В) 750 х 750 х 750 мм.
- Внутренний диаметр вакуумной камеры - 450 мм, масса – 250 кг.
- 6 фланцев для установки электрофизических устройств.
- Предельное давление остаточного газа не выше 1·10-3 Па.
- Охлаждение вакуумной камеры – водяное, не более 0,5 $м^3$/ч.
- 6-ти координатный манипулятор системы позиционирования образцов.
- Окна для ввода и вывода синхротронного излучения.

Типы устанавливаемых функциональных устройств:

- Оригинальные генераторы газовой плазмы;
- Совершенные вакуумно-дуговые и магнетронные распылительные системы;
- Источники электронных и ионных пучков с уникальными параметрами;
- Другие новые электрофизические устройства для модификации поверхности;
- Возможность сочетания вышеперечисленных устройств в едином вакуумном технологическом цикле.

Степень готовности разработки к практическому применению: апробирована и используется с 2023 года в составе канала №6 источника СИ «ВЭПП-3» (ИЯФ СО РАН) для проведения поисковых и прикладных исследований в области создания новых электронно-ионно-плазменных технологий модификации поверхности.

Литература

1. https://hcei.tsc.ru/ru/innovation/tehnologii/t54.html

Лаборатория теоретической физики
Кожевников Василий Юрьевич, в.н.с., д.ф.-м.н.; Козырев Андрей Владимирович, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.; Семенюк Наталья Степановна, н.с., к.ф.-м.н.; Коковин Александр Олегович, м.н.с., к.ф.-м.н.

Кинетическая теория начальной фазы распространения токонесущей бесстолкновительной плазмы в вакуумном диоде

В рамках кинетической теории показано, что ускорение ионов к аноду из области катодной эмиссии, приводящее к расширению плазмы катодного факела, может иметь сугубо электродинамическую природу, не связанную ни со спецификой геометрической неоднородности промежутка, ни с влиянием электрон-ионных и ион-ионных столкновений. В основе электродинамического механизма расширения катодной плазмы лежит фундаментальная тенденция нарушения нейтральности на границе плотного плазменного образования, в результате чего периферические области приобретают отрицательный объемный заряд, который формирует вблизи катода область отрицательного потенциала (виртуального катода). Благодаря резкому снижению электрического потенциала, происходит полевое ускорение ионов в области между физическим и виртуальным катодами и заполнение этой области квазинейтральной катодной плазмой. В результате реализации этого механизма граница плазмы продвигается к аноду со скоростью $(0.7–3.2)\times10^6$ см/с, что вполне соответствует экспериментально наблюдаемым скоростям расширения катодного факела в вакуумных дугах.

Литература

1. A.V. Kozyrev**,** V.Yu. Kozhevnikov, N.S. Semeniuk, A.O. Kokovin. Initial kinetics of electrons, ions and electric field in planar vacuum diode with plasma cathode // Plasma Sources Science and Technology. 2023. V. 32. No. 10. Art. 105010 (6 pages). https://doi.org/10.1088/1361-6595/acfff1
2. В. Ю. Кожевников, А. В. Козырев, В.С. Игумнов, А. О. Коковин, Н. С. Семенюк. Кинетическая теория расширения двухкомпонентной плазмы в плоском вакуумном диоде // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2023. № 6. с. 183−191. https://mzg.ipmnet.ru/ru/Issues/2023/6/183

Лаборатория газовых лазеров

Зятиков Илья Александрович, м.н.с.; Лосев Валерий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Генерация на ионах молекулярного азота в лазерной плазме

Запущен лазер на ионах молекулярного азота (переход $B^2\Sigma^+_u$ ($v' = 0$) – $X^2\Sigma^+_g$ ($v = 0$, 1)) в лазерной плазме воздуха и азота. Впервые стрик-камерой зарегистрирована реальная временная форма лазерного импульса и продемонстрирована возможность получения практически спектрально-ограниченной длительности импульса на длинах волн 391.4 нм (1.8 пс) и 427.8 нм (1.15 пс). Показано, что для достижения минимальной длительности импульса необходимо обеспечивать максимальный коэффициент усиления в активной среде ($g > 6$ см$^{-1}$). Полученные экспериментальные результаты являются полезными как для понимания физических механизмов генерации, так и для развития эффективных когерентных источников сверхкоротких импульсов излучения в видимой и ультрафиолетовой области спектра.

Литература

1. И.А. Зятиков, В.Ф. Лосев. Генерация на ионах молекулярного азота с длиной волны 391.4 нм в лазерной плазме // Квантовая электроника, 53, № 7 (2023), 533–536. https://quantum-electronics.ru/wp-content/uploads/2023/07/0533.pdf
2. I.A. Zyatikov, V.F. Losev. Parameters of 391 nm lasing from molecular nitrogen ions pumped by 950 nm femtosecond laser pulse // Applied Optics. Vol. 62, No. 34. P. 9133-9135. https://doi.org/10.1364/AO.508151

Лаборатория оптических излучений

Тарасенко Виктор Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Бакшт Евгений Хаимович, с.н.с., к.т.н.; Панарин Виктор Александрович, н.с., д.ф.-м.н.; Виноградов Никита Петрович, инженер, аспирант

Тел. 8(3822)491685, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Стримеры, инициируемые ёмкостным разрядом при давлениях воздуха 0.2-6 торр

Проведены исследования плазменных диффузных струй (ПДС), имеющих красный цвет, которые состоят из стримеров (волн ионизации). Обнаружено, что плазма, создаваемая в воздухе при давлениях 0.2–6 Торр импульсно-периодическим емкостным разрядом в диэлектрической трубке, инициирует за один импульс две ПДС, в каждой из которых регистрируется до трёх стримеров. Установлено, что по два стримера, которые распространяются от кольцевых электродов в противоположных направлениях, формируются одним импульсом напряжения положительной полярности. С помощью ICCD камеры и кремниевого ФЭУ показано, что приход фронта положительного стримера в область остановки фронта отрицательного стримера, который генерировался первым на фронте отрицательного импульса напряжения, приводит к формированию третьего тонкого стримера в виде конуса с малым углом при вершине. Установлено, что направление движения третьего стримера совпадает с направлением инициирующих его стримеров, однако его скорость меньше на два порядка. Показано, что при низких давлениях воздуха скорость первых положительных стримеров больше, чем у отрицательных, а расстояние, на которое они распространяются при напряжении генератора 7 кВ и давлении воздуха 0.2 Торр, превышает 1 м.

Литература

1. V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, V.A. Panarin, and N.P. Vinogradov, Streamers Initiated by a Capacitive Discharge at Air Pressure 0.2–6 Torr // Plasma Physics Reports. 2023. V. 49. P. 786-794. DOI: 10.1134/S1063780X23700393

Лаборатория плазменных источников, лаборатория прикладной электроники
Шандриков Максим Валентинович, с.н.с., к.т.н.; Окс Ефим Михайлович, зав. лабораторией, д.т.н.; Оскирко Владимир Олегович, н.с., к.т.н.; Черкасов Александр Алексеевич, м.н.с., аспирант

Вакуумный (безгазовый) непрерывный магнетронный разряд с холодным плоским катодом-мишенью

Реализован непрерывный режим вакуумного (безгазового) магнетронного разряда с холодным плоским катодом-мишенью в области предельно низких давлений остаточного газа уровня $4 \cdot 10^{-3}$ Па. На медном катоде такой режим достигается при токах разряда 8-12 А и соответственно плотности тока 120-200 mA/cm^2. Показано что при сравнимых с вакуумно-дуговыми системами скорости нанесения покрытий использование безгазового магнетрона обеспечивает существенно меньшее количество дефектов на поверхности покрытия. Возможность реализации непрерывной формы магнетронного разряда в вакуумном случае напрямую связана с так называемым режимом самораспыления (HIPIMS), для которого характерно доминирование в разрядной плазме ионов материала катода. Поскольку такой режим проявляется в сильноточной форме горения разряда с высокой мощностью, то для его реализации в непрерывном случае необходимо исключить перегрев катода-мишени магнетрона и подавить процессы дугообразования. Эти проблемы были эффективно решены в результате оригинальных конструктивных решений электродной системы планарного магнетрона, обеспечивающие эффективный теплоотвод с поверхности катода-мишени, а также использованием специальной системы электропитания магнетронного разряда, исключающей переход разряда в дуговую форму горения. Результаты оптической микроскопии пленок демонстрируют преимущество применения безгазового магнетронного разряда с сопоставимыми скоростями осаждения по сравнению с дуговым разрядом, проявляемое в отсутствии дефектов покрытий.

Литература

1. М.В. Шандриков, Е.М. Окс, В.О. Оскирко, А.А. Черкасов Вакуумный (безгазовый) непрерывный магнетронный разряд с холодным плоским катодом-мишенью // Письма в ЖТФ, 2023, Т. 49, Вып. 22, С. 19-22. DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56594.19716

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

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская д.13, стр.2
Лаборатория №1.3. - теории лазерной плазмы
Андреев Николай Евгеньевич, г.н.с., зав. лабораторией, проф., д.ф.-м.н.

Интенсивные лазерные источники гамма-излучения и нейтронов на основе сильноточных пучков суперпондеромоторных электронов

Интенсивные пучки фотонов и нейтронов в МэВ-ном диапазоне энергии являются эффективными инструментами во многих областях исследований, таких как диагностика вещества в экстремальных состояниях, ядерная физика и материаловедение, а также в медицинских и биофизических приложениях. Представлена концепция создания эффективных источников γ-излучения и нейтронов, основанная на генерации релятивистских электронов в режиме прямого лазерного ускорения при взаимодействиях лазерного импульса с интенсивностью 1019 Вт/см2 с протяженной плазмой с плотностью, близкой к ритической.

Яркие источники ультрарелятивистских частиц и гамма квантов для междисциплинарных исследований

Рассмотрена возможность генерации сильноточных пучков ультрарелятивистских электронов, ускоряемых в режиме прямого лазерного ускорения, и их применения в междисциплинарных исследованиях. Ключевые подходы основаны на результатах моделирования и выполненных экспериментов по взаимодействию релятивистски интенсивных лазерных импульсов с крупномасштабной плазмой околокритической плотности, созданной с использованием аэрогелей низкой плотности. Применение совокупности лазерных импульсов ЦИЭС (XCELS) позволит достичь эффективности генерации частиц (электронов, позитронов, протонов, нейтронов) и квантов жесткого излучения в диапазоне энергий в десятки МэВ, на порядки превышающей существующие рекордные значения.

Лазерно-плазменный инжектор ультракоротких сгустков электронов

Проведено исследование процесса генерации сгустков электронов при взаимодействии лазерного импульса с неоднородной плазмой, имеющей возрастающий профиль плотности. Показано, что генерация сгустка электронов происходит в результате самопересечения траекторий их продольных колебаний, возбуждаемых лазерным импульсом, проходящим по плазме. Проведено сравнение результатов, следующих из теоретических исследований в одномерной геометрии, с результатами моделирования в 3D геометрии. Найдено, что при подобранных должным образом параметрах лазерного импульса и плазмы возможен квазиодномерный режим распространения лазерного импульса в плазме мишени, в котором возможен процесс генерации электронного сгустка в условиях близких к тем, которые предсказывает одномерная теория. Показано, что энергетический спектр ускоренных электронов сгустка при генерации его в 3D мишени сохраняет ряд важных качественных характеристик спектра, получаемого в одномерной геометрии, а именно: имеет форму, близкую к платообразной, и показывает тенденцию к энергетическому выделению электронов сгустка из основной массы фоновых электронов плазмы.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке лазерно-плазменного инжектора электронов, основанного на механизме самоинжекции и

ускорения электронов в кильватерной волне лазерного импульса, проходящего через границу плазменной мишени.

Костенко Олег Федотович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Расширенная модель Брюнеля генерации горячих электронов в нерелятивистских лазерно-плазменных взаимодействиях

Рассмотрена расширенная модель Брюнеля генерации горячих электронов в нерелятивистских лазерно-плазменных взаимодействиях. Модель учитывает диэлектрическую проницаемость поверхностной плазмы и энергию, поглощаемую электронами, ускоренными компонентами электрического поля, перпендикулярными и параллельными мишени. Представлена модель генерации рентгеновского тормозного излучения в случае гауссова лазерного пучка. Показано, что влияние движения электронов параллельно поверхности плазмы на поглощаемую интенсивность становится заметным лишь при относительно низких абсолютных значениях диэлектрической проницаемости. Расчеты зависимостей выхода жесткого тормозного рентгеновского излучения от угла падения лазерного излучения и от энергетического интервала, в котором измеряется выход тормозного излучения, качественно согласуются с экспериментальными данными, если предположить, что концентрация электронов в скин-слое сравнительно невелика (примерно в 5–7 раз превышает критическую концентрацию).

Литература

1. N. E. Andreev, I. R. Umarov, and V. S. Popov. Intense Laser Sources of Gamma Radiation and Neutrons Based on High-Current Beams of Super-Ponderomotive Electrons. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2023, Vol. 17, No. 4, pp. 848–854. https://doi.org/10.1134/S102745102304002X
2. N. E. Andreev, I. R. Umarov, and V. S. Popov. Bright Sources of Ultrarelativistic Particles and Gamma Rays for Interdisciplinary Research. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023, Vol. 50, Suppl. 7, pp. S797–S805. https://doi.org/10.3103/S1068335623190028
3. Kuznetsov S.V., Umarov I. R., Andreev N. E. Laser-Plasma Injector of an Ultrashort Electron Bunch. Bull. Lebedev Phys. Inst. 2023. Vol. 50, P. S741–S748, https://doi.org/10.3103/S1068335623190119
4. Kostenko O. F. Simulation of x-ray bremsstrahlung generation under vacuum heating of solid target electrons // Laser Physics. 2023. Vol. 34, No. 1. P. 016002. https://dx.doi.org/10.1088/1555-6611/ad0ec2

Лаборатория №1.4. - лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы

Зеленер Борис Борисович, г.н.с., зав. лабораторией
Тел. 8(495)3620778 , bobozel@mail.ru

Разлет ультрахолодной плазмы в квадрупольном магнитном поле

Квадрупольная конфигурация магнитного поля, образованная катушками с противоположно направленными токами, может удерживать нейтральную плазму вблизи центральной области нулевого поля за счет эффекта магнитного зеркала. Эта схема удержания была первоначально интересна для термоядерного синтеза с магнитным удержанием, а в последнее время для создания источников ионов, обработки материалов и для ионных двигателей. Новые возможности для изучения намагниченных и удерживаемых магнитным полем частиц плазмы связаны с ультрахолодной плазмой (УХП). УХП получается путем фотоионизации атомов вблизи порога ионизации, находящихся в магнитооптической ловушке в глубоком вакууме, при помощи импульсного лазера. В настоящей работе методом молекулярной динамики выполнены расчеты разлета облака ультрахолодной плазмы стронция в квадрупольном магнитном поле при различных градиентах магнитной индукции. Получена физическая картина пространственного распределения электронов и ионов в процессе разлета в зависимости от времени и дан ее анализ. Установлено подобие временной зависимости концентрации и

распределения скоростей ионов от параметров плазмы и магнитного поля. Получено хорошее согласие с экспериментом. Предсказан характер изменения временной зависимости концентрации ионов при росте градиента магнитной индукции.

Литература

1. S. Y. Bronin, E. V. Vikhrov, B. B. Zelener, B. V. Zelener // Physical Review E 2023, 108(4), 045209. (Q1 WoS) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.045209

Лаборатория №1.5. - экстремальных энергетических воздействий
Иосилевский Игорь Львович

Изучение аномалий равновесного профиля пространственного заряда в ловушке и проблема фазовых переходов в модели низкотемпературной плазмы

Проведен цикл расчетно-теоретических исследований аномальных разрывных профилей пространственного заряда неоднородных систем заряженных частиц в окрестности источников неоднородности, ограничивающих возможные перемещения этих частиц («ловушках»), потенциально реализуемых в различных натурных и экспериментальных энергоустройствах. На основе проведенных исследований и расчетов выявлена взаимосвязь физических процессов, обуславливающих и сопровождающих образование указанных разрывных аномалий профилей пространственного заряда.

- расчетно-теоретически установлена возможность существования аномальных разрывов равновесного профиля пространственного заряда в задачах термоэлектростатики неоднородных сильнонеидеальных кулоновских систем.
- Установлена взаимосвязь этих разрывов с явлением фазовых переходов в однокомпонентной сильнонеидеальной макроскопической системе зарядов, как источнике неидеального уравнения состояния, используемого в локальном описании указанных неоднородных равновесных профилей заряда в задачах термоэлектростатики.
- Установлена возможность появления особой структуры равновесного пространственного заряда – т.наз. «смешанной фазы» - ультра-мелкодисперсной «эмульсии» /или «суспензии», если речь об участии кристаллической фазы/.
- Продемонстрирована универсальность идеи «смешанной фазы» бывшей до сих пор атрибутом исключительно астрофизических приложений, для широкого круга приложений сильнонеидеальных неоднородных систем зарядов.
- Результаты расчетов проиллюстрированы на примере разрывных равновесных профилей микроионов в гармонической ловушке с квадратичным удерживающим потенциалом.

Литература

1. Жерноклетов М.В., Ковалев А.Е., Новиков М.Г., Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Шутов А.В. ЖЭТФ 163 (2) 274-283 (2023) / Ударно-волновое сжатие азотного флюида в диапазоне давлений 140-250 ГПа // DOI:10.31857/S0044451023020128
2. Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортов В.Е., Ерунов С.В., Аринин В.А., Бликов А.О., Огородников В.А., Рыжков А.В., Комраков В.А., Ковалев А.Е., Новиков М.Г., Максимкин И.П., Финюшин С.А., Чудаков Е.А., Лихутов М.И., Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Левашов П.Р., Минаков Д.Г., Парамонов М.А., ЖЭТФ 163, вып.3, 439-453 (2023), Сжимаемость неидеальной плазмы гелия при постоянной конечной температуре T ~ 21000 K в области давлений до 600 ГПа // DOI:10.31857/S004445102303015X

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

Синтез композитных частиц графена в эрозионных струях плазмотрона постоянного тока

Синтез композитных наночастиц Cu/графен исследован с использованием радиационных характеристик медьсодержащих плазменных струй смеси гелия и углеводородов, истекающих из сопла выходного медного электрода плазмотрона постоянного тока. В качестве источника углеводородов использовалась смесь пропана и бутана.

Эксперименты проведены при мощности плазмотрона 30 кВт, расходе гелия 0,5 г/сек и расходе углеводородов 0,1 г/сек при давлении 350-710 мм.рт.ст.

Для диагностики синтезируемых наночастиц использовалась сканирующая электронная микроскопия, рентгенография, спектры комбинационного рассеяния, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и термический анализ.

Для определения условий образования наночастиц при превращении углеводородов в эрозионных струях была оценена концентрация меди путем анализа спектров оптического излучения наблюдаемых в спектре линий Cu I. Установлено, что максимальное насыщение графена медью (0,03 мас. %) достигается при концентрации меди в плазме 3×10^{13} см$^{-3}$, достаточной для образования химической связи меди с углеродом sp2 в наночастице.

Литература

1. M. B. Shavelkina, D. I. Kavyrshin, R. Kh. Amirov, V. F. Chinnov, G. M. Dzagnidze, and A. I. Ivanov //Physics of Plasmas 30, 023507 (2023); doi.org/10.1063/5.0120199

Василяк Леонид Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Поляков Дмитрий Николаевич, с.н.с.
Шумова Валерия Валерьевна, с.н.с., к.ф.-м-н.

Исследование свойств облаков из заряженных микрочастиц в плазме газового разряда

Предложена модель расчета коэффициента поверхностного натяжения сферического облака заряженных микрочастиц в плазме. Рассчитаны коэффициенты поверхностного натяжения кулоновских сфер, полученных в тлеющем разряде низкого давления в неоне при температуре 77К для частиц диаметром 4 мкм и температуре 295К для частиц диаметром 2 мкм. Определена потенциальная энергия микрочастиц на поверхности сферы. Полученные значения коэффициента поверхностного натяжения кулоновских сфер на несколько порядков величины меньше, чем у шаровых молний. Предложена гипотеза образования кулоновских сфер в атмосфере Земли.

Удерживаемые в плазме газового разряда облака из заряженных микрочастиц представляют собой ловушки для ионов, способные концентрировать ионы и удерживать их в заданной области пространства. С помощью гидродинамической модели положительного столба тлеющего разряда в неоне с заряженными микрочастицами исследованы режимы, в которых проявляется влияние концентрации микрочастиц на эффективность ионной ловушки, образованной облаком из микрочастиц. Для описания эффективности ионной ловушки предложены показатели, в том числе учитывающие её динамическое состояние, определяемые для различных параметров комплексной плазмы. Выявлена сильная зависимость показателей эффективности от концентрации микрочастиц. Проанализированы экспериментальные данные по динамическим неустойчивостям комплексной плазме. Показано, что предельная концентрация микрочастиц может служить критерием появления неустойчивостей. Показано, что превышение предельной концентрации микрочастиц в облаке приводит в общем случае к развитию динамической неустойчивости, а в неэффективных состояниях - к погасанию

разряда. Автоколебания с погасаниями разряда есть результат перехода комплексной в нестабильное состояние, которое является пределом её ионизационного равновесия.
Предложена модель баланса энергии микрочастицы, находящейся в плазме электрического разряда в неоне, рассматривающая нагрев микрочастицы в результате столкновений с электронами и ионами, рекомбинации и тушения метастабильных атомов на ее поверхности. Параметры плазмы вычислялись с помощью жидкостной модели разряда низкого давления с микрочастицами. Рассчитан нагрев микрочастиц диаметром 2.55 мкм, образующих в плазме облака с концентрацией 10^4–10^5 $см^{-3}$, полученные ранее в экспериментах при давлении неона 40–120 Па и токах разряда 0.5–2.0 мА. Получено, что вклад тушения метастабильных атомов в нагрев микрочастицы возрастает с давлением, и может составлять до 40% от нагрева, связанного с рекомбинацией на её поверхности. Проведен анализ вклада в нагрев микрочастицы от рекомбинации радикалов для микрочастицы, находящейся в реагирующей смеси водород/кислород/аргон, либо пропан/кислород/аргон. Получена оценка возможного ускорения воспламенения от точечного очага (в виде нагретой микрочастицы), при температурах 800–1100К, в условиях, при которых наблюдается уменьшение задержек воспламенения в экспериментах в ударных трубах и установках быстрого сжатия. Показано, что в зависимости от размера микрочастицы и концентрации радикалов, рекомбинационный нагрев микрочастицы на ранних стадиях горения может составлять от десятка до сотни градусов. Это может привести к ускорению воспламенения в несколько раз и устранить расхождение между экспериментально наблюдаемыми и рассчитываемыми с помощью детального кинетического моделирования задержками воспламенения в указанных условиях.

Литература

1. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2023. Vol. 17. No. 5. P. 1241. https://link.springer.com/article/10.1134/S1990793123050263.
2. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // Rus. J. Phys. Chem. B. 2022. Vol. 16. №. 5. P. 912-916. https://doi.org/10.1134/S1990793122050232.
3. В.В. Шумова, Д.Н. Поляков, Л.М. Василяк // Химическая физика. 2023. Т. 42. №. 8. С. 82-86. https://doi.org/10.31857/S0207401X23080095.
4. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. №. 7. P. 074001. DOI 10.1088/1361-6595/ac7c36.

Василяк Леонид Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Владимиров Владимир Иванович, снс
Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м-н

Кулоновские структуры из частиц микронного размера в электродинамической ловушке при атмосферном давлении

Экспериментально продемонстрировано разделение полидисперсной смеси микрочастиц оксида алюминия с размерами 2-100 мкм, заряженных индукционным способом микрочастиц оксида алюминия в воздухе с помощью квадрупольной линейной ловушки Пауля путем изменения величины напряжения на линейных электродах. Диаметр и длина линейных электродов равны 4 мм и 300 мм соответственно, расстояние между их осями равно 19 мм. В торцах ловушки на её оси были установлены запирающие электроды на расстоянии 160 мм друг от друга, на которые подавалось постоянное напряжение, той же полярности, которой были заряжены как микрочастицы. Амплитудное значение синусоидального напряжения частотой 50 Гц менялось от 1,4 до 14 кВ, а на запирающие электроды подавалось постоянное напряжение +4 кВ. При уменьшении напряжения от максимального 8 кВ, ступенчатым образом с шагом 2 кВ на каждом этапе из ловушки высыпаются более тяжелые частицы, а размеры высыпавшихся частиц уменьшаются в

среднем на 10-15 микрон. Более широкий разброс размеров после первого этапа может быть следствием скачкообразного снижения напряжения, при котором в заполненной ловушке возникает более сильное возмущение облака частиц. На следующих этапах размер облака меньше, поэтому частицы более устойчивы и более четко структурированы по размерам по объему ловушки. Для более тонкой фильтрации следует использовать первично отфильтрованную фракцию и снижать напряжение более мелкими шагами. В результате численного компьютерного моделирования методом молекулярной динамики определены условия удержания микрочастицы в горизонтальной линейной квадрупольной ловушке и развития неустойчивости при внешнем воздействии переменного электрического поля, в результате чего частица уходит из ловушки. Экспериментально исследовано воздействие внешнего постоянного электрического поля, направленного вертикально, на структуры частиц в заряженной ловушке и показано, что дополнительное поле сдвигает структур в поле тяжести вплоть до вылета частиц из ловушки.

Литература

1. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. В., Печеркин В. Я., Попов Д.И. Сепарация полидисперсных заряженных микрочастиц в воздухе электродинамической линейной ловушкой. // Прикладная физика. 2023. № 3. С. 39-44. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-39-44.

2. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. В., Печеркин В. Я. Устойчивые и неустойчивые траектории заряженной частицы в квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе. // Прикладная физика. 2023. № 2. С. 29-34. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-29-34.

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.

Теоретическое исследование механизмов вращения пылевых структур под действием магнитных полей в тлеющем разряде

Ранее нами был описан механизм вращения в магнитном поле пылевой структуры внутри вставки, сужающей канал тока и служащей для стабилизации разряда, и предложена соответствующая расчетная модель для объяснения результатов эксперимента, выполненного в Санкт-Петербургском государственном университете. Результаты расчета на основе данной модели, предполагающей увлечение пылевых частиц ионами, хорошо соответствовали экспериментальным данным при $B \leq 0.5$ Тл, но с увеличением магнитного поля теоретическая модель показывала уменьшение скорости вращения, выходящее за пределы экспериментальной погрешности. В прошедшем году мы вернулись к объяснению результатов этого эксперимента при $B > 0.5$ Тл и предположили, что внутри вставки, где зависает пылевая структура ниже самого узкого ее места, происходит расширение канала тока и появляется радиальная составляющая тока. Тогда должен работать другой механизм вращения, аналогичный влиянию вихревых токов в голове страты. В страте под действием сил Ампера этих токов происходит вращение нейтрального газа, а вместе с ним и пылевых частиц в направлении противоположном вращению в результате ионного увлечения, происходит инверсия вращения. Но в голове страты, где зависает пылевая структура, вихревой ток направлен к оси разряда, а внутри вставки при предполагаемом расширении канала тока его радиальная составляющая направлена от оси разряда. Поэтому здесь оба механизма вращения − увлечение ионами и нейтральным газом работают в одном направлении. Предложена простая расчетная модель, которая объясняет результаты эксперимента при полях $B > 0.5$ Тл и, по-видимому, сможет объяснить наблюдавшиеся большие скорости вращения пылевых частиц внутри вставки в других экспериментах.

Литература

1. Е.С. Дзлиева, Л.Г. Дьячков, В.Ю. Карасев, Л.А. Новиков, С.И. Павлов. Пылевая плазма в условиях тлеющего разряда в магнитном поле до 2.5 Тл. Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 1. С. 7–11. DOI: 10.31857/S0367292122600947
2. В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, Л.Г. Дьячков, Л.А. Новиков, С.И. Павлов. О влиянии магнитного поля на характеристики пылевых структур в тлеющем разряде. Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 2. С. 186–192. DOI: 10.31857/S0367292122601138
3. С.И. Павлов, Е.С. Дзлиева, Л.Г. Дьячков, Л.А. Новиков, М.В. Балабас, В.Ю. Карасев. Двойные пылевые структуры в различных фазах страты в умеренном магнитном поле. Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 10. С. 995–1002. DOI: 10.31857/S036729212360053X

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

Плавление больших кулоновских кластеров и приближение ячеек Вигнера–Зейтца

В работе показано, что плавление кластера является комбинацией двумерного (2D) и трехмерного (3D) плавлений. При числе частиц $N > 300$ кулоновский параметр неидеальности Γ принимает независимо от N значение 60–70 для 2D плавления (плавления в оболочках) и 160–180, как в неограниченной системе, для 3D плавления (плавления ядра). Обнаружена универсальность двумерной кристаллической структуры сферических оболочек и характера ее плавления. Впервые исследована система заряженных частиц на фоне равномерно распределенного заряда противоположного знака, ограниченного сферой, с неподвижным центром масс (кластер). Оказывается, что данная система отличается от традиционно рассматриваемого ансамбля частиц в ловушке, в частности, тем, что при 2D плавлении кластера начинается его интенсивное испарение. Предложено соотношение, определяющее параметр кулоновской неидеальности межчастичного взаимодействия через среднеквадратичные скорости и ускорения частицы и не включающее среднеквадратичного отклонения частицы от центра ячейки Вигнера–Зейтца. Данное соотношение проверено в численном эксперименте и доказано, что оно выполняется с высокой точностью не только для твердого, но и для жидкого состояния системы. Предложенное соотношение должно быть особенно эффективно в том случае, когда невозможно выделить достаточно протяженный участок траектории частицы, на котором можно пренебречь самодиффузией. Данное соотношение может быть использовано для анализа экспериментальных данных, в частности, в области пылевой плазмы, когда заранее неизвестны ни заряд частиц, ни их кинетическая температура. Показано, что классическая модель ячеек Вигнера–Зейтца может быть использована для рассматриваемой системы и обеспечивает достаточно высокую точность.

Литература

1. Shpil'ko E.S. and Zhukhovitskii D.I. Relevance of the Wigner–Seitz cell approximation for the Coulomb clusters, Plasma Physics Reports, 2023, Vol. 49, No. 10, P. 1207. DOI: 10.1134/S1063780X23600937.

Лаборатория №15.1 - электрофизики и плазменных процессов
Найдис Георгий Вениаминович, г.н.с., д.ф.-м.н.,
Бабаева Наталья Юрьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.

Конверсия CO_2 в высокочастотных разрядах

Методом численного моделирования исследуется конверсия CO_2 в микроволновом плазменном факеле атмосферного давления. С использованием 2D и 1D моделей рассмотрены различные этапы процесса конверсии. Показано, что эффективность конверсии можно повысить, используя импульсно-периодический режим работы СВЧ-установки, регулируя скорость потока, длительность импульсов и частоту их повторения.

Моделирование тлеющих разрядов в CO_2

Развит новый подход к моделированию тлеющих разрядов низкого давления в углекислом газе в длинных трубках, основанный на решении уравнений, описывающих радиальные профили параметров плазмы. Рассчитаны характеристик разрядов (температура газа, колебательная температура асимметричной моды молекул CO_2, концентрации электронов, напряженности электрического поля, степени конверсии CO_2) в зависимости от давления газа и тока разряда. Показано, что полученные в рамках нового подхода результаты согласуются с представленными в литературе экспериментальными данными лучше, чем полученные ранее в рамках традиционно используемых усредненных по радиусу моделей.

Исследование роли убегающих электронов в формировании стримеров в воздухе и гелии

Методом численного моделирования исследовано формирование отрицательных стримеров в воздухе и гелии в перенапряженном промежутке игла-плоскость. В качестве источника электронов перед фронтом стримера учтен, дополнительно к объемной фотоионизации, процесс ионизации газа пучком быстрых (убегающих) электронов, формируемым в процессе развития разряда. Установлено, что учет ионизации газа быстрыми электронами приводит к увеличению скорости стримера и к изменению его формы.

Динамика распространения стримеров в воздухе в однородных электрических полях

В рамках аналитического подхода проведен анализ недавно опубликованных результатов численного моделирования положительных и отрицательных стримеров в воздухе, распространяющихся в однородных электрических полях. Показано, что полученные аналитические соотношения между радиусом, скоростью и длиной стримера в широком диапазоне значений приложенного электрического поля хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

Разработка методов расчета напряжения зажигания разрядов

Предложен метод расчета напряжения зажигания объемных разрядов в газах и жидкостях. На его основе рассчитано напряжение зажигания разряда в воздухе высокого давления для различных конфигураций электрического поля в разрядном промежутке.

Литература

1. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, Modeling of vibrational excitation dynamics in a nanosecond CO_2 discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2023, v.56, paper 015202. DOI: 10.1088/1361-6463/ac9c10
2. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, D.V. Tereshonok, V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, D.A. Sorokin. Formation of Wide Streamers in Air and Helium: the Role of Fast Electrons. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2023, v.56, paper 035205. DOI: 10.1088/1361-6463/aca776
3. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, Low-pressure CO_2 discharges: 1D modeling. *Physics of Plasmas* 2023, v.30, paper 013506. DOI: 10.1063/5.0130672
4. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, V.F. Tarasenko, D.A. Sorokin, Ch. Zhang, T. Shao. Evolution of ionization waves in the multi-pulsed plasma jet: role of memory charges. *Plasma Science and Technology* 2023, v.25, paper 035406. DOI: 10.1088/2058-6272/aca18e
5. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, D.V. Tereshonok, T. Chernishev, L. Volkov, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov, CO2 conversion in a microwave plasma torch: 2D vs 1D approaches. *Plasma Sources Science and Technology* 2023, v.32, paper 054001. DOI: 10.1088/1361-6595/acce66
6. Babaeva N.Y., Naidis G.V. Shao T., Tarasenko V.F. Atmospheric Pressure Plasma Jets and Their Interaction with Dielectric Surfaces. In: Shao, T., Zhang, C. (eds) *Pulsed Discharge Plasmas.* Springer Series in Plasma Science and Technology. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-1141-7_21

7. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, On propagation of positive and negative streamers in air in uniform electric fields. *Physics Letters A* 2023, v.482, paper 129037. DOI: 10.1016/j.physleta.2023.129037
8. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, N.A. Popov, On CO_2 conversion in discharges in CO_2-N_2 mixtures. *Plasma Sources Science and Technology* 2023, v.32, paper 085019. DOI: 10.1088/1361-6595/aceead
9. R.M.S. Almeida, P.G.C. Almeida, G.V. Naidis, M.S. Benilov, Validating Townsend criterion for ignition of volume gas discharges. *Plasma Sources Science and Technology* 2023, v.32, paper 105014. DOI: 10.1088/1361-6595/ad02bb
10. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, D.V. Tereshonok, V.F. Tarasenko, Ch. Zhang, T. Shao, Backward Fast Electrons Supported by Ionization Wave Passing Through the Grid Cathode. *Physics of Plasmas* 2023, v.30, paper 123902. DOI: 10.1063/5.0165129

Лаборатория кулоновских систем 17.3
Майоров Сергей Алексеевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

Изучение физических процессов в кулоновских системах

Газоразрядная плазма как в лабораторных исследовательских установках, так и в различного рода плазмохимических реакторах обычно контактирует с металлическими поверхностями (электроды, стенки реакторов и т.д.). В приповерхностном слое ионы приобретают значительную энергию порядка нескольких сотен эВ, что в свою очередь приводит к распылению металлических поверхностей и появлению в рабочем газе паров металлов. При разряде в инертных газах наличие даже малых примесей атомов из-за их более низкого потенциала ионизации приводит к резкому изменению плазменных параметров – понижается температура электронов, появляется значительное количество ионов металла. В работе построена физико-математическая модель для учета влияния распыления металлических материалов на характеристики газоразрядной плазмы. Она позволяет оценить влияние примесей атомов металла (меди, никеля, алюминия и вольфрама) в инертных газах на ионный состав плазмы, ее транспортные характеристики в зависимости от конструктивных особенностей (объема рабочей зоны, расстояния между электродами, формы разрядной камеры) и режима работы (сорт рабочего газа, давление и скорость прокачки, напряжение и вкладываемая мощность и т.д.).

Литература

1. А. С. Светлов, М. М. Васильев, Р. И. Голятина, С. А. Майоров, О. Ф. Петров Активное броуновское движение микрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения Прикладная физика, 2023, № 5, 53-60DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-53-60
2. С. Х. Гаджимагомедов, А. Э. Рабаданова, М. Х. Рабаданов, М. Х. Гаджиев, В. С. Курбанисмаилов, Г. Б. Рагимханов, С. А. Майоров, А. А. Амирова, Н. А. Демиров, Р. М. Эмиров, Ш. П. Фараджев Исследование воздействия импульсной плазмы на наноструктурированные YBCO материалы излучения Прикладная физика, 2023, № 1, 27-32 DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-27-32

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

Плазменные солитоны акустического типа наряду с энергией и импульсом переносят вещество.

Представлено теоретическое исследование явления однонаправленного переноса заряженных частиц классическими солитонами акустического типа в плазме без

магнитного поля. На примере одномерного ионно-акустического солитона показано, что перенос фоновых ионов является фундаментальным свойством классических солитонов, которым нельзя пренебрегать при малых амплитудах волн. Вычисления проведены в рамках традиционных гидродинамических моделей плазмы и одночастичного приближения с использованием псевдопотенциала Сагдеева и уравнения КдВ. Также проведено краткое обобщение результатов на электронно- и пылеакустические моды. Полученные результаты указывают на то, что известные свойства волн могут быть пересмотрены. В частности утверждение о том, что волны не переносят вещество, не распространяется на нелинейные волны и солитоны. Результаты представлены в сравнении с известным нелинейным явлением дрейфом Стокса, которое описывает слабый однонаправленный дрейф вещества, индуцируемый периодическими волнами. Важным следствием полученных результатов является возможность солитонов возбуждать электрические токи в плазме с ненулевой постоянной составляющей. Таким образом, необходимо учитывать влияние нелинейных волн на процессы переноса, причем это влияние не ограничивается таким известным эффектом как аномальная диффузия в условиях плазменной турбулентности.

Литература

1. Trukhachev F.M., Gerasimenko N.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Matter transport as fundamental property of acoustic solitons in plasma // Phys. Plasmas 30, 112302 (2023) https://doi.org/10.1063/5.0172462

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

Численное и экспериментальное исследование тепловых режимов термоэмиссионных катодов дуговых плазмотронов

Метод моделирования, основанный на отделении моделирования катодной части дуги (катода и прикатодного неравновесного слоя плазмы) от моделирования дуги в целом, распространен на катоды дуговых плазмотронов, состоящих из вставка с коническим наконечником из чистого или легированного вольфрама и окружающий ее медный держатель с водяным охлаждением. Валидация метода проверена сравнением с экспериментом, выполненным на дуге постоянного тока силой 200 А в аргоне атмосферного давления. Для моделирования вставки из чистого вольфрама была использована стандартная работа выхода поликристаллического вольфрама 4,54 эВ, и было обнаружено хорошее согласие с экспериментом как по форме вершины вставки, так и по распределению температуры в игле, зафиксированному в стабильном режиме работы. Однозначных данных о работе выхода дуговых катодов из легированного вольфрама нет, хотя натурные измерения эффективной работы выхода катодов дуговых разрядов высокого давления дают полезные подсказки. С другой стороны, проведенные в данной работе эксперименты показывают, что температуры острия вставок из вольфрама, легированного торием , или лантаном, или иттрием, зафиксированные в стабильном режиме при токе дуги 200 А, изменяются в довольно узкий диапазон 3100–3200 К. Это говорит о том, что работы выхода вставок из легированного вольфрама, работающих в стабильном режиме, также близки друг к другу. Действительно, результаты моделирования при одинаковом значении работы выхода 3 эВ дают достаточно хорошее согласие с экспериментом во всех трех случаях.

Литература

1. Cunha M.D., Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh *et al.* Numerical and experimental investigation of thermal regimes of thermionic cathodes of arc plasma torches. 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** 395204, DOI: 10.1088/1361-6463/ace063

Некоторые методы диагностики струи холодной плазмы, генерируемой на основе микроволнового разряда атмосферного давления

С помощью различных диагностических методов исследована струя холодной плазмы атмосферного давления, представляющая собой стекающее послесвечение межэлектродного микроволнового разряда в Ar. В качестве источника холодной плазмы использовался волноводный плазмотрон 2,45 ГГц с внешним 6-стержневым плазмотроном. С помощью высокоскоростной теневой съемки была получена пространственно-временная структура струи холодной плазмы. Периодический характер генерации плазмы изучался с помощью измерения плавающего потенциала электрического зонда с помощью осциллографа.

Литература

1. Antipov, S.N., Chepelev, V.M., Gadzhiev, M.K. *et al.* Some Techniques for Diagnostics of the Cold Plasma Jet Generated on the Base of the Atmospheric-Pressure Microwave Discharge. *Plasma Phys. Rep.* **49**, 559–562 (2023). https://doi.org/10.1134/S1063780X23600299

Совместно с научно-исследовательским центром “Кристаллография и фотоника” РАН

Синтез микрочастиц в равновесной и неравновесной плазме

Исследовано возможность синтеза пленок ZrON со свойствами комбинационного рассеяния света и окисление микрочастиц цинка СВЧ-плазмой с образованием эффективных солнечно-чувствительных фотокатализаторов, электродуговой синтез фотоактивных композиционных микрочастиц Ti/TiN/TiO_2, ZnO/TiO_2/Nb_2O_5 и формирование медьсодержащих композитных слоев.

Литература

1. Muslimov, A.; Antipov, S.; Gadzhiev, M.; Kanevsky, V. Synthesis ZrON Films with Raman-Enhancement Properties Using Microwave Plasma // Metals (MDPI) 2023, 13, 1927. https://doi.org/10.3390/met13121927
2. Muslimov, A.; Antipov, S.; Gadzhiev, M.; Ulyankina, A.; Krasnova, V.; Lavrikov, A.; Kanevsky, V. Oxidation of zinc microparticles by microwave plasma to form effective solar-sensitive photocatalysts Applied sciences (Appl. Sci. MDPI) 2023, Volume 13, Issue 22. https://doi.org/10.3390/ app132212195
3. Гаджиев М.Х., Оруджев Ф.Ф., Муслимов А.Э., Ильичев М.В. Фотокаталитические свойства в видимой области света композиционных микрочастиц Ti/TiN/TiO2, полученных электродуговым синтезом // Письма в ЖТФ. 2023, том 49, вып. 7 10.21883/PJTF.2023.07.54912.19321
4. Гаджиев М.Х., Муслимов А.Э. Формирование медьсодержащих композитных слоев в процессе воздействия низкотемпературной плазмы // Прикладная физика. 2023. № 5, С.34-40. 10.51368/1996-0948-2023-5-34-40
5. Гаджиев М.Х., Оруджев Ф.Ф., Муслимов А.Э. Электродуговой синтез фотоактивных композиционных микрочастиц ZnO/TiO2/Nb2O5 // Письма в ЖТФ. 2023, том 49, вып.18. С.3-7. 10.21883/PJTF.2023.18.56168.19644
6. Антипов С.Н., Муслимов А.Э., Ульянкина А.А., Царенко А.Д., Гаджиев М.Х., Лавриков А.С., Тюфтяев А.С. Активность микроструктур ZnO, синтезированных с использованием микроволновой плазмы, в процессах фотодеградации 2,4-динитрофенола // Письма в ЖТФ. 2023, том 49, вып. 20, С. 11-15. 10.21883/PJTF.2023.20.56339.19688

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46
Шалашов Александр Геннадиевич, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Источник экстремального ультрафиолетового излучения диапазона 11.2 нм ±1% на основе лазерного разряда в потоке ксенона для литографии

Развита концепция источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения на основе лазерного разряда с многозарядными ионами в потоке ксенона высокой плотности. Экспериментально продемонстрировано, что при фокусировке излучения Nd:YAG лазера с энергией 0.8 Дж и длительностью импульса 7 нс на сверхзвуковую струю ксенона можно получить ЭУФ излучение в диапазоне 11.16±0.13 нм с энергией до 10 мДж, что отвечает эффективности конверсии 1%. Исследован новый механизм распространения разряда за пределы фокальной области, связанный с фотоионизацией окружающего газа ультрафиолетовым излучением и последующим нагревом образующейся плазмы потоком тепла из фокальной области за счет электронной теплопроводности. Предложенный механизм позволяет объяснить полученные в экспериментах данные и указать пути увеличения эффективности конверсии лазерного излучения в источниках ЭУФ излучения для проекционной литографии высокого разрешения.

Авторы: И. С. Абрамов, С. В. Голубев, Е. Д. Господчиков, А. Г. Шалашов (ИПФ РАН), В.Е. Гусева, А. Н. Нечай, Н. Н. Салащенко, А. А. Перекалов, Н. И. Чхало (ИФМ РАН)

Литература

1. S. Abramov, S. V. Golubev, E. D. Gospodchikov, and A. G. Shalashov, Expansion of laser discharge in xenon jet improves EUV-light emission, **Appl. Phys. Lett.**, accepted (2023)
2. V. E. Guseva, A. N. Nechay, A. A. Perekalov, N. N. Salashchenko, N. I. Chkalo, Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets, **Appl. Phys. B 129**, 155 (2023)
3. S. Abramov, E. D. Gospodchikov, and A. G. Shalashov. Extreme ultraviolet radiation source based on a discharge sustained by a radiation pulse from a terahertz free-electron laser. **JETP 132**, No. 2, 223–232. (2021)
4. S. Abramov, E. D. Gospodchikov, A. G. Shalashov. Extreme-ultraviolet light source for lithography based on an expanding jet of dense xenon plasma supported by microwaves. **Phys. Rev. Appl. 10**, 034065 (2018)
5. ПАТЕНТ Заявка No 2023116539/07(035430), авторы: И.С. Абрамов, С.В. Голубев, А.Н. Нечай, А.А.Перекалов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало,Р.А. Шапошников, ”Мощный источник направленного экстремальногоультрафиолетового излучения с длиной волны 9 - 12 нм для проекционной литографии высокого разрешения”. Решение получено приоритет от 23.06.2023

Вихарев Анатолий Леонтьевич, зав. отделом, д.ф.-м.н.

Электролюминесценция SiV центров в алмазных диодах

Исследована электролюминесценция центров окраски кремний-вакансия (SiV центров) в алмазных p-i-n диоде и диоде со структурой, предполагающей параллельное включение p-i-n диода и диода Шоттки. В спектре электролюминесценции, кроме излучения на длине волны 738 нм, соответствующего излучению центров в отрицательном зарядовом состоянии (SiV^- центр), зарегистрировано излучение на длине волны 946 нм, соответствующее излучению центров в нейтральном зарядовом состоянии (SiV^0 центров). Получена высокая интенсивность излучения SiV^- центров при высокой

плотности тока в p-i-n диоде (порядка 500 А/см^2). Показано, что при создании не ансамбля центров, а одиночного SiV центра во внутренней области p-i-n диода, достигнутые условия обеспечат скорость излучения одиночных фотонов при электролюминесценции более, чем 10^6 фотонов в секунду. При возбуждении p-i-n диода импульсами напряжения наносекундной длительности показана возможность получения коротких импульсов излучения на длине волны 738 нм, что позволяет рассматривать диод исследованной конструкции в качестве источника одиночных фотонов.

Авторы: М.А. Лобаев, Д.Б Радищев, А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, С.А. Богданов, В.А. Исаев, С.А. Краев, А.И. Охапкин, Е.А. Архипова, В.Е. Демидов, М.Н. Дроздов (ИПФ РАН, ИФМ РАН)

Литература

1. M.A. Lobaev, D.B. Radishev, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, S.A. Bogdanov, V.A. Isaev, S.A. Kraev, A.I. Ohapkin, E.A. Arhipova, E.V. Demidov, M.N Drozdov, SiV center electroluminescence in diamond merged diode, Physica Status Solidi Rapid Research Letters, 2200432, 2022
DOI: 10.1002/pssr.202200432

2 .M.A. Lobaev, D.B. Radishev, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, S.A. Bogdanov, V.A. Isaev, S.A. Kraev, A.I. Ohapkin, E.A. Arhipova, E.V. Demidov, M.N Drozdov, SiV center electroluminescence in high current density diamond p-i-n diode, Applied Physics Letters, 2023 (на рецензии)

Вихарев Анатолий Леонтьевич, зав. отделом, д.ф.-м.н.

Фотокатод на основе легированных фосфором нанокристаллических алмазных пленок

Экспериментально исследована фотоэмиссия электронов из легированных фосфором нанокристаллических алмазных (НКА) пленок толщиной от 50 до 1200 нм под действие лазерного излучения с длиной волны 266 нм и длительностью импульса 15 нс. Установлена связь между условиями роста, толщиной НКА пленок и величиной измеренной квантовой эффективности алмазных фотокатодов. Показано, что максимальную квантовую эффективность 3×10^{-5} демонстрировали сильно легированные НКА пленки толщиной 50 нм с пассивированной водородом поверхностью. Высокая квантовая эффективность пленок, на порядок превышающая медный фотокатод, не критичность к вакууму и загрязнениям поверхности, возможность варьирования высоты энергетического барьера за счет создания долгоживущего гидрогенизированного слоя на поверхности определяют перспективность применения пленок для фотоинжекции электронов в современных ускорителях.

Авторы: А.М. Горбачев, А.А. Вихарев, А.В. Афанасьев, А.Л. Вихарев, И.В. Бандуркин, Д.Б. Радищев, М.Н. Дроздов, С.А. Богданов
Отд.110, 140 и 340 (ИПФ РАН) и отд.140 (ИФМ РАН)

Литература

1. A.M. Gorbachev, A.A. Vikharev, A.V. Afanasiev, A.L. Vikharev, I.V. Bandurkin, D.B. Radishev, M.N. Drozdov, S.A. Bogdanov, Investigation of phosphorus-doped nanocrystalline diamond films for photocathode application, Vacuum 215 (2023) 112335
DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112335

2. A.M. Gorbachev, A.A. Vikharev, A.V. Afanasiev, A.L. Vikharev, I.V. Bandurkin, D.B. Radishev, M.N. Drozdov, S.A. Bogdanov, Investigation of photocathodes based on phosphorus doped nanocrystalline diamond films, Proc. 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2023 , pp.1-2, **DOI:** 10.1109/IVEC56627.2023.10157816

Водопьянов Александр Валентинович, зав. отделом, д.ф.-м.н.

Увеличение конверсии CO_2 в плазме СВЧ разряда за счет подавления обратных реакций встречным потоком газа

В плазме, поддерживаемой непрерывным СВЧ-излучением гиротрона с частотой 24 GHz в волноводном плазмотроне в потоке углекислого газа продемонстрирован трехкратный рост степени конверсии CO_2 и энергоэффективности за счет охлаждения (закалки) постразрядной области встречным потоком газа. На основе численного моделирования показано, что рост степени конверсии при разрушении структуры плазменного факела обусловлен увеличением теплообмена с окружающей атмосферой, а эффективность этого разбиения определяется скоростью и плотностью закалочного газа.
Авторы: Водопьянов А.В., Чекмарев Н.В., Мансфельд Д.А., Преображенский Е.И., Синцов С.В., Ремез М.А.

Литература

1. Чекмарев Н.В., Мансфельд Д.А., Преображенский Е.И., Синцов С.В., Ремез М.А, Водопьянов А.В., «Подавление обратных реакций при разложении углекислого газа в плазме микроволнового разряда», Письма в ЖТФ, 2023, принято в печать (2023)

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

119991, Москва, Россия, Ленинский пр. 53
Отдел физики плазмы (совместно с ИОФ РАН и ИЭФ УрО РАН)
Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик РАН
Баренгольц Сергей Александрович, г.н.с.

Дуговые характеристики наноструктурированной поверхности вольфрама, сформированной под действием плазменных нагрузок в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы

Униполярная дуга, возникающая в контакте металл-плазма - явление крайне нежелательное для будущих термоядерных установок. Функционирование дугового разряда сопровождается выбросом различного рода примесей, загрязняющих термоядерную плазму, таких как жидкометаллические капли, микрочастицы, низкотемпературные атомы и ионы, и т.д. Установлено, что формирование наноструктурированной поверхности вольфрама (материал дивертора в ИТЭР) под действием плазменных нагрузок в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы приводит к снижению на порядок порогового тока инициирования униполярного дугового разряда, уменьшению среднего заряда ионов и температуры дуговой плазмы по сравнению с чистыми вольфрамовыми электродами. Изменение взрывоэмиссионных и теплофизических характеристик при образовании наноструктурированного слоя сопровождается также резким увеличением эрозии поверхности диверторных пластин в процессе функционирования дугового разряда и появлением капельной фракции эрозии с ростом толщины наноструктурированного слоя. Показано, что радиационные потери при проникновении капель в термоядерную плазму могут составлять значительную долю мощности ее нагрева уже при относительно небольших токах дугового разряда.

Литература

1. Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Взрывоэмиссионные процессы в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы и линейных электрон-позитронных коллайдерах. // Успехи физических наук. 2023. Т.193, № 7. – С.751-769. DOI: 10.3367/UFNr.2022.02.039163. [Barengolts S.A., Mesyats G.A., Explosive emission proceses in thermonuclear facilities with magnetic plasma confinement and in linear electron—positron colliders. // Physics- Uspekhi. – 2023. – V. 66. P.704–721. DOI: 10.3367/UFNe.2022.02.039163]

2. Mikhailov P.S., Muzukin I.L., Mamontov Y I., Zemskov Y.A., Uimanov, I.V., Kaziev A.V., Barengolts, S. A., Threshold parameters of vacuum arcs with W-fuzz cathodes. // Journal of Nuclear Materials. – 2023. – V. 582. – P. 154479. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154479.
3. Barengolts S.A., Hwangbo D, Kajita S., Arc erosion characteristics of W-fuzz samples with different thicknesses of the nanostructured layer. // Nuclear Materials and Energy. – 2023. – V. 37. – P. 101541. DOI: 10.1016/j.nme.2023.101541.

Отдел физики плазмы
Урюпин Сергей Александрович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Вагин Константин Юрьевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Влияние столкновений электронов на электромагнитные моды плазмы, образованной при многофотонной ионизации инертного газа

Для неравновесной слабоионизованной плазмы, полученной в результате многофотонной ионизации атомов инертного газа коротким импульсом лазерного излучения аналитически и численно исследованы поперечные электронные моды. Новые свойства рассмотренных мод связаны с учетом эффекта Рамзауэра-Таунсенда, заключающемся в резкой немонотонной зависимости сечения упругого рассеяния электронов на нейтральных атомах именно в интервале типичных для многофотонной ионизации энергий фотоэлектронов.

Показано, что при разных значениях энергии фотоэлектронов в рассматриваемой плазме возможно развитие двух различных видов электромагнитной неустойчивости. При сравнительно небольшой энергии фотоэлектронов порядка одного электрон-вольта возможно усиление электромагнитных волн. Усиление возможно, как в случае редких столкновений фотоэлектронов с нейтральными атомами, так и при частотах столкновений больших плазменной частоты электронов. При энергиях фотоэлектронов несколько больших одного электрон-вольта возможно развитие апериодической неустойчивости с инкрементом, величина которого сравнима с плазменной частотой электронов. Тем самым, реализуются условия для усиления внешнего пробного электромагнитного излучения рассматриваемой фотоионизованной плазмой, в частности, в терагерцовом диапазоне частот. Представлен детальный аналитический и численный анализ влияния столкновений фотоэлектронов с нейтральными атомами на закон дисперсии электромагнитной волны и инкременты неустойчивостей. Как в слабо, так и в сильно столкновительной фотоионизованной плазме в коротковолновой области существует слабо затухающая высокочастотная волна с линейным законом дисперсии и частотой, которая превышает электронную ленгмюровскую частоту.

Литература

1. Vagin, K.Y., Uryupin, S.A. Influence of Electron Collisions on Electromagnetic Modes of Plasma Produced by Multi-Photon Ionization of an Inert Gas // Plasma Physics Report. 2023, V. 49, P. 1104–1117. DOI: 10.1134/S1063780X23600998 [К. Ю. Вагин, С. А. Урюпин. Влияние столкновений электронов на электромагнитные моды плазмы, образованной при многофотонной ионизации инертного газа. // Физика плазмы, 2023, Т. 49, № 9, стр. 903-917. DOI: 10.31857/S0367292123600711].

Отдел физики плазмы (совместно с ИСЭ СО РАН и ИЭФ УрО РАН)
Орешкин Евгений Владимирович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Орешкин Владимир Иванович, зав. отделом (ИСЭ СО РАН)
Шмелев Дмитрий Леонидович, с.н.с., к.ф.-м.н. (ИЭФ УрО РАН)

Метод расчета радиационных характеристик неравновесной лабораторной плазмы

При решении задач, связанных с исследованием плотной высокотемпературной плазмы, одним из принципиально важных вопросов является описание ее собственного излучения с целью определения радиационных потерь, а также спектральный состав этих потерь. Предложен новый метод расчета излучения высокотемпературной неравновесной плазмы. Метод основан на использовании ударно-излучательной модели, которая позволяет рассчитывать зарядовое распределение плазмы и распределение по возбужденным состояниям ионов. В рассмотренном методе уравнения переноса решаются отдельно для излучения в сплошном спектре, который формируется за счет тормозного и рекомбинационного излучений, и отдельно для излучения в спектральных линиях. Особенностью этого метода является то, что при расчете средних коэффициентов поглощения в спектральных линиях используются безразмерные весовые коэффициенты, которые позволяют учесть вклад наиболее сильных линий. Использование весовых коэффициентов приводит к тому, что уже одно-групповое приближение дает хорошее согласие с расчетами, в которых решается полная спектральная задача. Показано, что использование предложенного метода позволяет существенно расширить область применимости многогруппового приближения, по сравнению с методами, в которых используются коэффициенты поглощения, вычисленные традиционным способом.

Литература

1. Oreshkin V. I., Oreshkin E. V., Shmelev D. L. A method for calculating the radiation characteristics of nonequilibrium laboratory plasmas // Physics of Plasmas. - 2023. – V. 30. – P. 113301. DOI 10.1063/5.0160649.

ФГБУН Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН)

117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект д.36 к.1

Лаборатория микроструктурирования и субмикронных процессов

Кузьменко Виталий Олегович, м.н.с.

Мяконьких Андрей Валерьевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Руденко Константин Васильевич, г.н.с., зам. директора по научной работе

Исследование возможностей селективного атомно-слоевого травления в установке плазменного травления ICP

Высокая актуальность применения метода атомно-слоевого травления и невысокая доступность специализированного оборудования приводят к необходимости исследования возможности исследования реализации этого процесса в обычных установках непрерывного травления. Исследованный процесс основан на модификации поверхности путем осаждения фторуглеродной пленки из плазмы $Ar/CF_4/H_2$ и последующей активации травления бомбардировкой ионами Ar из плазмы. Показано, что равновесие поверхностных реакций смещается от травления к осаждению в зависимости от состава плазмы, что позволило оптимизировать стадию осаждения. Плазмообразующая смесь с низким содержанием CF_4 обеспечивает формирование пленки с низким содержанием фтора, которая не приводит к травлению SiO_2 и TiN, улучшая селективность по отношению к материалу потенциальной маски в процессе травления. Разработанный процесс демонстрирует насыщающийся характер в широком процессном окне. Скорость травления соответствует монослойному режиму. Относительно короткая продолжительность цикла обеспечивает приемлемую скорость травления с точки зрения затрат времени. Достигнута значительная селективность более 20 по отношению к TiN и высокая однородность.

Литература

1. Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. Selective atomic layer etching of Al_2O_3, AlN_x and HfO_2 in conventional ICP etching tool // Vacuum – 2023 – V.207 – 111585. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111585
2. Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V., Rudenko K.V. Investigation of Fluorocarbon Film Deposition from $Ar/CF_4/H_2$ Plasma for the Implementation of the Atomic Layer Etching Process // High Energy Chemistry – 2023 – V.57 – p.100-104. DOI: 10.1134/S0018143923070238