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

Научный совет Российской академии наук по физике низкотемпературной плазмы

ОТЧЕТ
Научного совета за 2024 год

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

МОСКВА 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы 3

ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА.....3

МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА 4

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2024 г. 5

АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») 5

Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”.....9

Институт механики и машиностроения – структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»» (ИММ КазНЦ РАН).....10

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» 11

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» 12

ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН) 14

ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук 15

ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).....15

ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).....20

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН).....26

ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).....27

ЗАДАЧИ
Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы

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

ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА

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

МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА

Заседания

1. 19 ноября – Заседание бюро Научного совета.
2. 24 декабря – Заседание Научного совета

Основные 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. XLI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 18–22 марта 2024 г., г. Звенигород Московской обл., Россия.
3. Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике (WSMPA 2024), 23-25 апреля, 2024 г., Москва.
4. X Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 9–13 сентября 2024 г., Иваново, Россия.
5. 9-й Международный Конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты», 16–21 сентября 2024 г., Томск, Россия.
6. XIII Всероссийская конференция по физической электронике ФЭ-2024, 25–29 сентября 2024 г., Махачкала, Россия.
7. 11 Международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (NEPCAP-2024), 7–11 октября 2024 г., Адлер, Сочи, Россия.
8. XVI Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», 4–6 ноября 2024 г., Казань, Россия.
9. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», 4–5 декабря 2024 г., Москва, Россия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2024 г.

АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»
(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)
108840, Москва, ул. Пушковых 12.
Лаборатория материаловедения
Отделения магнитных и оптических исследований
Кутуков Антон Константинович, начальник лаборатории.

Создание технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения

Завершен цикл исследований по созданию технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения.

Создана установка Z-пинч для обработки изделий с формой вращения импульсными потоками плазмы со следующими параметрами: длительность импульса в диапазоне 5 – 20 мкс; тепловая нагрузка на поверхность обрабатываемого образца в диапазоне 2 – 6 Дж/см^2; разброс значений тепловой нагрузки от импульса к импульсу не более ± 10 %; разброс значений тепловой нагрузки по высоте обрабатываемого изделия не более ± 10 %; возможность обрабатывать изделия с диаметром до 10 см; возможность обрабатывать изделия с длиной до 20 см; рабочие газы: гелий, азот, воздух.

Создана установка лазерного наклепа для обработки промышленных изделий со следующими параметрами: длина волны лазерного излучения 1,054 мкм; энергия в импульсе 30–50 Дж; длительность импульса 10–30 нс; неравномерность пространственного профиля не превышает 15 %; плотность мощности на поверхности обрабатываемого изделия в диапазоне 1–10 ГВт/см^2.

Выбраны оптимальные режимы обработки импульсным потоком плазмы и методом лазерного наклепа образцов материалов конструкционных сталей, цветных сплавов, чугунов, титанового сплава ВТ6 и никелевого сплава ЖС6У-ВИ при которых происходит увеличение показателей износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности, а именно: улучшение коррозионной стойкости до 5,9 раз, износостойкости до 5,6 раз, усталостной прочности до 1,6 раз.

Разработанная технология апробирована при обработке промышленных изделий, на которых после воздействия импульсных потоков плазмы и лазерного излучения образовывался модифицированный слой, аналогичный получаемому на образцах материалов.

Создан паспорт технологии комплексного воздействия импульсных потоков плазмы и лазерного наклепа на конструкционные материалы и технологические карты обработки промышленных изделии обработанных импульсными потоками плазмы и лазерным наклепом.

Литература

1. Поверхностная закалка конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА импульсными потоками плазмы / А.К. Кутуков, А.А. Сергеечев, М.А. Миллер, Е.М. Миронова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 7. С. 315–321. DOI: 10.36652/1813-1336-2024-20-7-315-321.
2. Моделирование кинетики лазерного упрочнения титанового сплава / А.Г. Сухарев, Р.В. Смирнов, М.Д. Таран, А.К. Кутуков // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 8. – С. 1331-1340. DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58561.275-23

Лаборатория плазмодинамики
Отделения магнитных и оптических исследований
Климов Николай Сергеевич, директор по науке и стратегии – директор отделения,

Экспериментальное исследование параметров плазменного потока, генерируемого квазистационарных сильноточных плазменным ускорителем с собственным магнитным полем

Развиты методы диагностики и выполнен ряд исследований плазменного потока, создаваемого квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем (КСПУ).

Применены аппаратура и метод измерения скорости потока плазмы КСПУ на основе высокоскоростной спектроскопии доплеровского сдвига. Дискретизация измерений по времени может достигать 100 кГц, что позволяет подробно исследовать процессы длительностью порядка 1 мс и более. Продемонстрировано согласие значений скорости потока, полученных методом спектроскопии доплеровского сдвига и времяпролетным методом. Представлены результаты измерений, показывающие, что скорости плазменного потока КСПУ лежат в диапазоне 30 – 160 км/с в зависимости от энерговклада в разряд и состава рабочего газа.

Изучена пространственно-временная структура излучения разряда в межэлектродном промежутке. Был определен диапазон изменения длины области свечения плазмы в межэлектродном промежутке в течение импульса разряда.

Исследованы пространственные и временные зависимости характеристик потока водородной плазмы, генерируемого в КСПУ. Наблюдалась область с ярким излучением плазмы, расположенная на выходной поверхности электродной системы ускорителя, которая характеризуется наличием примесей и повышенным значением концентрации электронов. Были зарегистрированы колебания интенсивности излучения плазменного потока по всей длине его распространения и показано, что эти периодические изменения связаны с направленным движением плазменного потока. Зависимость концентрации электронов в потоке свободной плазмы от времени была получена одновременно двумя методами. Измерения проводились на расстоянии, которое значительно превышает характерный размер электродной системы и на котором уменьшается влияние межэлектродных процессов на генерацию плазменного потока. Первый метод основан на измерении штарковского уширения линии Hβ. В качестве второго метода была использована гетеродинная интерферометрия.

Исследование пространственно-временных характеристик разряда и потока плазмы, генерируемого КСПУ, позволит оптимизировать геометрию и режимы работы КСПУ с целью формирования более однородных плазменных потоков и обеспечения устойчивой работы.

Литература

1. Kartasheva, A. A., Gutorov, K. M., Podkovyrov, V. L., Muravyeva, E. A., Lukyanov, K. S., Klimov, N. S. // Physics of Plasmas. 2024. V.31. №4. P.043107 https://doi.org/10.1063/5.0198341
2. A.D. Yaroshevskaya, K.M. Gutorov, V. L. Podkovyrov and Yu. I. Litvinenko // Plasma Physics Reports. 2024. V. 50. №. 6. P. 689. DOI: 10.1134/S1063780X24600634

Лаборатория плазменных генераторов излучения
Отделения магнитных и оптических исследований,
Булейко Алла Борисовна, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.

Источник мощного микроволнового излучения с электронной перестройкой частоты в диапазоне 2 октав

В рамках государственного контракта на НИОКР «Создание источника мощного микроволнового излучения с электронной перестройкой частоты в диапазоне 2 октав. Этап 2023 – 2024 годов» были выполнены исследования в области плазменной релятивистской СВЧ-электроники, в которой СССР был, а РФ остается признанным мировым лидером.

В результате выполнения НИОКР достигнуты следующие результаты:

1) в ходе испытаний компактного варианта мощного плазменного мазера – усилителя внешнего сигнала в режиме нижней частоты 8-10 ГГц (в конфигурации с магнетроном МИ-525) определены: пиковая мощность излучения равная 53,1 МВт, основная частота выходного излучения равная 9,1 ГГц. По распределению спектральной плотности мощности установлено, что большая ее часть приходится на основной пик 9,1 ГГц. Уровень сигнала более чем на порядок превышает уровень шума 2,5 МВт/ГГц и составляет 82,9 МВт/ГГц. Коэффициент усиления компактного варианта мощного плазменного мазера - усилителя внешнего в режиме нижней частоты 9,1 ГГц составил ~1000, при этом отношение мощностей сигнал/шум в выходном сигнале на частоте составило ~33.

2) в ходе испытаний компактного варианта мощного плазменного мазера – усилителя внешнего сигнала в режиме высокой частоты 14-15 ГГц (в конфигурации с магнетроном МИ-489А) определены: пиковая мощность излучения равная 15,1 МВт, основная частота выходного излучения равная 14,8 ГГц. По распределению спектральной плотности мощности установлено, что большая ее часть приходится на основной пик 14,8 ГГц. Уровень сигнала на порядок превышает уровень шума 0,9 МВт/ГГц и составляет 10,2 МВт/ГГц. Коэффициент усиления компактного варианта мощного плазменного мазера – усилителя внешнего в режиме высокой частоты 14,8 ГГц составил ~300, при этом отношение мощностей сигнал/шум в выходном сигнале составило ~11.

В ходе выполнения работы исследована возможность электронного управления шириной спектра излучения плазменного мазера от импульса к импульсу наряду с электронным управлением частотой [1] и экспериментально зарегистрировано эффективное усиление шума при взаимодействии релятивистского электронного пучка с медленными волнами плазмы в коаксиальном плазменно-металлическом волноводе [2].

Литература

1. A.E. Donets, V.I. Rogozhin, V.P. Bakhtin, A.B. Buleyko, A.G. Bykov, O.T. Loza and A.A. Ravaev // Physics of Wave Phenomena, 2024, Vol. 32, No. 4, pp. 268-272 https://doi.org/10.3103/S1541308X24700250
2. V.I. Rogozhin, A.E. Donets, A.B. Buleyko, O.T. Loza, A.G. Bykov, V.P. Bakhtin and A.A. Ravaev // Physics of Wave Phenomena, 2024, Vol. 32, No. 6, pp. 436-440 https://doi.org/10.3103/S1541308X24700444

Лаборатория импульсных плазменных процессов
Отделения магнитных и оптических исследований
Топорков Дмитрий Анатольевич, с.н.с.

Исследование взаимодействия мощных потоков водородной плазмы с газовыми и твердотельными мишенями

Проведено исследование взаимодействия мощных потоков водородной плазмы, создававшихся импульсным ускорителем 2МК-200, с газовой завесой азота/неона перед вольфрамовой мишенью. Газ перед поверхностью мишени эффективно преобразует энергию плазменных потоков в энергию излучения и является мощным ~ 1 ГВт источником линейчатого ВУФ-МР излучения, в спектрах которого наблюдаются только линии ионов газа, формирующего струю. Установлено, что неон почти вдвое эффективнее азота переизлучает энергию падающего водородного плазменного потока. Результаты спектрального анализа и регистрации двумерных изображений плазмы с пространственно-

временным разрешением показали, что присутствие газа перед мишенью приводит к локализации паров вольфрама на расстояниях менее 1 см от поверхности и предотвращает распространение тяжелых примесей вдоль силовых линий магнитного поля навстречу налетающему плазменному потоку. Показано, что газовая завеса с плотностью $\approx 10^{17}$ см$^{-3}$ снижает плотность поглощаемой мишенью энергии до ≈ 25 Дж/см^2, что оказывается вдвое меньше уровня энергии, поглощаемой вольфрамом при импульсном воздействии мощного потока водородной плазмы без газовой завесы ≈ 50 Дж/см^2. Максимальная температура поверхности вольфрама за газовой завесой находится в окрестности точки плавления, в то время как при отсутствии завесы достигает точки кипения.

Дополнительно проведены исследования воздействия мощного потока водородной плазмы, на слой висмута толщиной 7,5 мкм, предварительно вакуумно напылённого на вольфрамовую пластину. При плотности энергии плазменного потока ≈ 600 Дж/см^2 длительностью ≈ 15 мкс мишень с висмутом благодаря эффекту экранировки адсорбировала ≈ 12 Дж/см^2. На фронтальной поверхности висмута температура, не превышала ≈ 1900 К за всё время воздействия водородной плазмы. Благодаря низкой температуре кипения висмута происходит его интенсивное испарение и формирование экранирующего слоя, излучающегося в диапазоне длин волн λ = 2-20 нм. Максимальная температура вольфрама, на который нанесён слой висмута, за всё время взаимодействия остаётся почти вдвое меньше температуры плавления вольфрама, что значительно снижает возможные температурные напряжения, являющиеся причиной формирования трещин на вольфраме. Однако предложение использовать слой висмута в качестве возможной защиты вольфрама бесперспективно по причине невозобновляемости слоя. В то время как наличие возобновляемой газовой завесы не только снижает тепловую нагрузку на вольфрам, но и препятствует распространению паров вольфрама на расстояние более 1 см от поверхности.

Литература

1. С.Д. Лиджигоряев, Д.А. Бурмистров, В.В. Гаврилов, И.М. Позняк, А.В. Пушина, Д.А. Топорков // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, с.58-65; Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol. 87, Suppl. 1, pp. S140–S146. DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-2-58-65.
2. S. D. Lidzhigoryaev, D. A. Burmistrov, V. V. Gavrilov, V. A. Kostyushin, I. M. Poznyak, A. V. Pushina, D. A. Toporkov // Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 12, pp. 1567–1576. DOI: 10.1134/S1063780X24601524.
3. Д.А. Топорков, Д.А. Бурмистров, В.А. Барсук, В.В. Гаврилов, С.В. Карелов, Н.С. Климов, С.Д. Лиджигоряев, А.В. Пушина // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, с.66-72; Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol. 87, Suppl. 1, pp. S147–S152. DOI: 10.1134/S1063778824130222.

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

Облучение мезенхимальных стволовых клеток аргоновой плазменной струёй с различной примесью кислорода

Проведены экспериментальные исследования по использованию струи низкотемпературной плазмы (НТП) для активации питательной жидкой среды αMEM, в которой находились мезенхимальные стволовые клетки (МСК), выделенные из костного мозга крыс Withstar. Интерес к мезенхимальным стволовым клеткам обусловлен тем, что МСК – это плюрипотентные клетки, способные, с одной стороны, эффективно делиться, а с другой - дифференцироваться в клетки различных мезенхимальных тканевых линий, таких как остеобласты, хондроциты и адипоциты. Эти свойства МСК используются для их применения в регенеративной медицине для восстановления после серьезных травм и заболеваний соединительной ткани. После введения в поврежденную ткань, МСК

мигрируют в места повреждений, где приживаются и дифференцируются в функциональные клетки, что приводит к регенерации поврежденных тканей.

МСК могут быть выделены из костного мозга или жировых тканей пациента и после выращивания *in vitro* и введения обратно пациенту, они не отторгаются его организмом. Однако выращивание МСК *in vitro* низко эффективно и требует множественных пассажей. Такие пассажи могут сопровождаться частичной дифференциацией, хромосомными аберрациями и другими изменениями в клетках, поэтому создание методов, позволяющих усиливать пролиферацию клеток на первых пассажах, является важной задачей. Одним из решений данной задачи может быть воздействие плазмы на раннюю культуру МСК.

Струя НТП создавалась аксиально-симметричным барьерным разрядом с тонким стержневым электродом, расположенным внутри кварцевой трубки вдоль ее оси. Трубка продувалась аргоном со скоростью потока на выходе трубки около 25 м/с. Выяснялись условия, в которых НТП-активация αMEM среды может ускорять пролиферацию МСК. Показано, что конечный эффект воздействия активированной жидкой среды на клетки сильно зависит от чистоты аргона, используемого для формирования плазменной струи. Наличие малой примеси кислорода в аргоне на уровне 700 ppm приводит к формированию в разряде и в плазменной струе активных форм кислорода, а также озона с достаточно высокой концентрацией. Озон, поставляемый струей в жидкую среду, хорошо в ней растворяется, и, как сильный окислитель, может губительно воздействовать на стволовые клетки. Установлено существенное различие состава активных частиц в плазменных струях в чистом аргоне и в аргоне с малой примесью кислорода. Результаты физических исследований двух типов плазменных струй сопоставлены с результатами микробиологических исследований по воздействию этих струй на мезенхимальные стволовые клетки.

Литература

1. Ermolaeva, S. A., Varfolomeev, A. F., Chernukha, M. Y., Yurov, D. S., Vasiliev, M. M., Kaminskaya, A. A., Petryakov A.V., Akishev Yu. S. (2011). Bactericidal effects of non-thermal argon plasma in vitro, in biofilms and in the animal model of infected wounds. *J. Med. Microbiol.* 2011, **60** (Pt 1):75-83. doi: 10.1099/jmm.0.020263-0

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

Существование истинных равновесий плазмы в асимметричном магнитном поле

Решена фундаментальная теоретическая проблема существования равновесия плазмы в несимметричном магнитном поле со вложенными магнитными поверхностями. Отсутствие примеров гладких решений уравнений равновесия для плазмы в отсутствие какой-либо симметрии в течение многих лет служило аргументом в поддержку гипотезы Г. Грэда о том, что невырожденного трехмерного плазменного равновесия не существует.

Впервые представлены явные аналитические контрпримеры к гипотезе Грэда. В рамках стандартной формулировки задачи о равновесии плазмы получено семейство гладких решений уравнений равновесия. Эти решения описывают набор “истинных” несимметричных магнитных поверхностей, совместимых с непрерывными профилями давления плазмы и вращательного преобразования. Использована ранее полученная система уравнений равновесия в виде обобщения подхода Грэда-Шафранова на случай неосесимметричных магнитных конфигураций без использования формализма потоковых координат.

Выявлена и наглядно продемонстрирована неприменимость простых прототипных моделей плоской или цилиндрической топологии для прогнозных выводов о равновесии

тороидальной плазмы. Разработанный формализм доказывает ошибочность гипотезы Грэда и открывает возможности для адекватного моделирования трехмерных равновесных плазменных конфигураций.

Литература

1. E.A. Sorokina and V.I. Ilgisonis // Physical Review E. 2024. V. V. 110. № 6. Article # 065209. DOI: 10.1103/PhysRevE.110.065209

Институт механики и машиностроения – структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»» (ИММ КазНЦ РАН)

420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31
Кашапов Наиль Фаикович, Заместитель руководителя по инновационно-экономической деятельности д.т.н., профессор

Изучение физических процессов в электролитах в различных практических задачах

В текущем году были продолжены экспериментальный исследования разрядов с жидкими электродами и получены вольтамперные характеристики катодного режима плазменно-электролитного процесса с использованием щелочного водного раствора электролита NaOH, использовались 1%, 3%, 5% растворы. Все полученные вольтамперные характеристики можно условно разделить на три области. Первая соответствует протеканию только электрохимических реакций, в второй происходит одновременное инициирование одиночных разрядов на поверхности катода и протекание электрохимических реакций, в третьей области в зависимости от формы напряжения либо стабильное горение разряда в паровоздушной оболочке, либо прерывистое возникновение новых разрядов в соответствии с пульсациями напряжения. Анализ полученных результатов показывает возможность применения газового разряда с жидким электролитическим анодом для процессов получения порошка цинка из щелочных растворов. Следует отметить, что для этой цели является пригодным использование пульсирующей формы прикладываемого напряжения. Это обусловлено чередованием в одном периоде электрохимических процессов и горения разряда, что нельзя сказать про сглаженный режим, при котором металлический электрод отделен от электролита паровоздушной оболочкой, образующейся в результате нагрева катода. В данной конфигурации происходит горение дугового разряда с торца металлического катода и приводит к его интенсивному нагреву с последующим плавлением. Было продолжено моделирование получения цинкового осадка в электролите с более детальной проработкой фазы зародышеобразования.

Так же было проведено моделирование получения титановой пленки с помощью магнитронного распыления при вращении подложки. Результаты показывают, что вращение подложки во время осаждения приводит к получению более тонкой пленки, которая является более однородной и менее шероховатой, также было обнаружено, что коэффициент вариации распределения толщины пленки улучшился с 3,96% в случае невращающейся подложки до 0,33% в случае вращающейся подложки.

Литература

1. Ayachi Omar, A., Ayachi Amar, C., Kashapov, N.F., ... Al-Otoom, A.Y., Mokrani, O.B.E. Materials Today Communications, Effect of substrate rotation on the growth behavior and

topography of the Ti film deposited over a large area using DC magnetron sputtering with a rectangular target: Simulation approach and experiment (2024) , 41, 110895 (scopus Q2) DOI:10.2139/ssrn.4552717
2. Kashapov, L.N., Kashapov, N.F. & Chebakova, V.Y. Mathematical Simulation of Cathode
3. Processes During Hydrogen Production. Theor Found Chem Eng (2024). https://doi.org/10.1134/S0040579524601031 (scopus Q3, wos Q4)
4. Chebakova V., Dmitriev M., Kashapov N., Kormushin K Nonlinearity of the heterogeneous
5. process of zinc release in flow Batteries// E3S Web of Conferences , 2024, vol. 531 , Is.3. - Art. №01023. DOI: 10.1051/e3sconf/202453101023 (Scopus)

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

Импульсно-периодические плазменные реакторы с протяженным полым катодом для прецизионных плазма-стимулированных аддитивных технологий

Разработан, исследован и запатентован генератор высокочастотной плазмы на основе трехсекционного полого катода для использования в плазменных реакторах для прецизионных аддитивных технологий в качестве источника низкоэнергетичных широкоапертурных ионных потоков с регулируемой энергией ионов [1].

Исследовано влияние внешнего поперечного магнитного поля на характеристики плазменного реактора на основе высоковольтного импульсно-периодического разряда в гелии при давлении 30 Торр. Представлена двумерная модель, описывающая высоковольтный импульсный разряд в гелии в поперечном слабом магнитном поле (B=0,4 Тл), которая использует эмпирическое соотношение для учета магнитного поля. Показано, что результаты использования эмпирического соотношения для эффективного поля хорошо согласуются с результатами эксперимента [2]. Численными методами исследовано влияние внешнего поперечного слабого магнитного поля на процессы образование метастабильных атомов гелия и возбужденных молекул гелия в высоковольтном импульсном разряде в гелии при среднем давлении. Установлены закономерности изменения плотности метастабильных атомов гелия и эксимерных молекул гелия при наложении на разряд поперечного магнитного поля [3].

Проведены исследования по расчету функции распределения электронов по энергиям в плазменном столбе наносекундного разряда в аргоне с протяженным полым катодом методом Монте-Карло. Описана методика расчета ФРЭЭ в импульсном разряде методом Монте-Карло. Приведены результаты расчетов ФРЭЭ для разных стадий развития разряда при давлении газа 10 Торр на различных расстояниях от дна полости в катоде. Анализ полученных результатов показывает формирование высокоэнергичных электронов в разрядной области с энергией электронов выше 500 эВ [4].

Проведено одномерное и двумерное моделирование распределения параметров плазмы микроразряда в гелии с учетом хорошо известного набора плазмохимических реакций из литературы и с учетом скорректированного набора плазмохимических реакций. Расчеты были выполнены с использованием модели приближения локальной средней энергии, которая решает уравнения непрерывности и сохранения энергии электронов в области разряда. Сравнение результатов показало, что разница в профилях основных параметров плазмы невелика как в *1D*, так и в *2D* случаях. Однако наблюдалась

сильная разница в некоторых параметрах, таких как плотность метастабильных частиц и электронная температура [5].

Исследованы общие закономерности формирования нестационарных оптических спектров пропускания плазмы наносекундных разрядов с полыми электродами в неоне с учетом процессов когерентного взаимодействия коротких наносекундных световых импульсов с плазмой в неоне вблизи узких оптических резонансов поглощения света. Показана возможность повышения точности диагностики кинетики метастабильных атомов неона в нестационарной неравновесной плазме, генерируемой высокоскоростными волнами ионизации в длинных разрядных трубках [6].

Литература

1. Ашурбеков Н.А., Шахсинов Г.Ш. Патент РФ Uенератор высокочастотной плазмы на многосекционном полом катоде Патент на изобретение RU 2824651 C1, 12.08.2024. Заявка от 30.12.2023.
2. Chen C., Rabadanov K.M., Ashurbekov N.A., Yuan C., Shakhrudinov A.M. Transverse magnetic field effects on the high-voltage pulsed discharge plasma in helium./ Journal of Plasma Physics. 2024. Vol. 90. № 1. C. 905900115. https://doi:10.1017/S0022377824000138
3. Rabadanov K. M., Ashurbekov N. A., Iminov K. O., Shahsinov G. Sh., Zakaryaeva M.Z., Murtazaeva A. A.. Metastable Helium Atom Creation Dynamics in High-Voltage Pulsed Discharge with Transverse Magnetic Field Effects. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2024. Vol. 44. pp. 1563–1574. https://doi.org/10.1007/s11090-024-10478-4
4. Н.А. Ашурбеков, М.З. Закарьяева, К.О. Иминов, К.М. Рабаданов, Г.Ш. Шахсинов, А.А. Муртазаева. Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2024) Tomsk, Russia/ C. 574-579. https://doi: 10.56761/EFRE2024.S5-O-024901
5. Y. Wanga, Y. Zhoua, K. M. Rabadanova, and C. Yuana. Simulation of 1D and 2D Atmospheric Pressure Microdischarge Plasma in Helium.// High Energy Chemistry, 2024, Vol. 58, Suppl. 2, pp. S281–S285. https://doi.org/10.1134/S0018143924701005
6. М.Б.Курбангаджиева. Кинетика оптического пропускания неоднородной плазмы импульсного электрического разряда с полыми электродами в неоне. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Казань КФУ. 2024.

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

- **Исследованы каналы преобразования энергии при взаимодействии ударной волны с импульсным разрядом в профилированном канале**

Проведено комплексное исследование тепловых и газодинамических полей течения, образующихся при взаимодействии плазмы импульсного объемного разряда с высокоскоростным потоком в канале. Проведена сравнительная визуализация с использованием методов высокоскоростной инфракрасной термографии и теневой съемки. Исследованы явления, связанные как с плазменными, так и с газодинамическими взаимодействиями в специальном тестовом участке

газодинамического канала. Проанализированы пространственно-временные характеристики тепловых полей, связанных с плазменными и газодинамическими воздействиями, а также построены диаграммы интенсивности инфракрасного излучения. Исследована также динамика разрывов и неоднородностей, возникающих при взаимодействии ударных волн с плазмой импульсного объемного разряда, называемая распадом разрыва. Сравнивались два физических механизма преобразования энергии в инфракрасное излучение, регистрируемых тепловизором в диапазоне 1,5–5,1 мкм. К этим механизмам относятся: низкотемпературное плазменное излучение субмикросекундного локализованного объемного разряда и субмиллисекундное излучение внутренних поверхностей стеклянных стенок, нагретых за счет теплопроводности на границе с пограничным слоем газового потока.

- **Показано, что остывание нагретой локализованным наносекундным разрядом области вставки в подветренной зоне в потоке в канале с выступом происходит за время менее миллисекунды;**

Проведено исследование термографическим методом динамики тепловых полей в пограничном слое на обтекаемой поверхности стенки канала рабочей камеры ударной трубы около прямоугольной вставки. Исследован нестационарный процесс нагрева и остывания зоны за отраженной от вставки ударной волной и зоны локализации импульсного приповерхностного разряда в потоке за вставкой в области отрыва потока. Регистрация излучения стенок в диапазоне 1.5-5.1 μm ведется через боковые окна рабочей камеры, прозрачные как для теплового излучения стенок, так и для видимого излучения разряда. Показано, что в ударно-нагретой в течение сотен микросекунд поверхности канала в наветренной зоне перед вставкой остывание происходит за несколько миллисекунд. Остывание импульсно нагретой локализованным разрядом обтекаемой области стенки в подветренной зоне происходит за субмиллисекундное время.

- **Исследован режим развития поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха с наклонной ударной волной и проведена оценка тепловыделения в разрядном канале**.

Экспериментально исследовано излучение поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с наклонной ударной волной в ударной трубе при числах Маха потока 1.20−1.60 и плотности 0.01−0.50 kg/m3. Разряд с длительностью тока около 500 ns инициировался в рабочей секции ударной трубы при импульсном напряжении 25 kV. Излучение разряда анализировалось на основе разверток и девятикадровых изображений с наносекундным разрешением. Установлено, что в сверхзвуковых потоках излучение разрядного канала на временном интервале 2−3 μs после окончания тока спадает ступенчато (в две стадии) и затем затухает с временем 800−1300 ns, значительно большим времени затухания в однородном воздухе.

Литература

1. E. Karnozova, I. Znamenskaya, I. Doroshchenko et al. Energy conversions at shock wave interaction with pulse discharge in profiled channel / // Physics of Fluids. — 2024. — Vol. 36, no. 12. — P. 126120. [DOI]
2. Знаменская И. А., Карнозова Е. А. Динамика тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и импульсным разрядом // Журнал технической физики. — 2024. — Т. 94, № 6. — С. 849–856.
3. И. А. Знаменская, М. И. Муратов, М. А. Богданова и др. Эволюция тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и плазмой импульсного поверхностного разряда / // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2024. — Т. 25, № 6. — С. 1150. [DOI]

4. Мурсенкова И. В., Зиганшин А. Ф. Излучение наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха. // Письма в Журнал технической физики. — 2024. — Т. 50, № 10. — С. 11–14.

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 воде с барботажем метана при атмосферном давлении: эксперимент и моделирование.

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. Эта проблема рассметривалась в публикациях предыдущих лет.

В 2024 г были проведены эксперименты и моделирование процесса паровой конверсии метана при барботировании метана в воду, находящуюся в СВЧ поле. Это обеспечивало взаимодействие метана с парами испаряющейся воды в условиях СВЧ разряда в окрестности микроволновой антенны.

Продукты СВЧ-разряда в воде с барботированием метана при атмосферном давлении исследованы методом газовой хроматографии. Получены зависимости скорости образования продуктов от мощности падающего СВЧ-излучения (500-650 Вт) и скорости потока метана (25-75 мл/мин). Основным компонентом газовой смеси на выходе из реактора является водород, его концентрация достигает 75 %. Расход энергии на образование водорода достигает 25 л/кВт-ч. Остальные компоненты газа на выходе из реактора - метан, CO и CO2. Концентрация CO2 в ряде экспериментов превышает концентрацию CO. Отметим, что при традиционном паровом риформинге метана концентрация CO значительно превышает концентрацию CO2.

Анализ полученных экспериментальных результатов проводился с использованием разработанной нульмерной нестационарной модели разряда, учитывающей процесс закалки продуктов реакции. Результаты расчета находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными результатами. Расчеты показали необходимость учета стадии закалки.

Принципиальным отличием рассматриваемого процесса от традиционного парового риформинга является закалка, которая обеспечивается поступлениям паров воды в газовую область с продуктами. Это естественный процесс в условиях разрядом в жидкостях.

Литература

1. T. S. Batukaev, I. V.Bilera, G. V. Krashevskaya, I. L. Epstein, Y. A.Lebedev, A. V. Tatarinov, A. Y. Titov, Hydrogen production in microwave discharge in water with barbotage of methane at atmospheric pressure: Experiment and modeling. Plasma. Process. Polym. 2024, e2400139. https://doi.org/10.1002/ppap.202400139
2. Yu. A. Lebedev, T. S. Batukaev, I. V. Bilera, A. V. Tatarinov, A. Yu Titov, and I. L. Epstein. 0D Model of Microwave Discharge in Water with Barbotage of Methane through the Discharge Zone. Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 8, pp. 999–1010. DOI: 10.1134/S1063780X24601238

ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

620016 Екатеринбург, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Россия
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, 634055 Томск, Россия

Локальные и нелокальные критерии убегания электронов в газовом зазоре с коническим катодом с варьируемым углом раствора

Теоретически установлено, что условия генерации убегающих электронов (УЭ) в газовом зазоре качественно отличаются при разной степени неоднородности распределения электрического поля, обеспечиваемой вариацией угла конического катода. В слабонеоднородном поле (по предлагаемой классификации это соответствует конусам с углами, превышающими угол Тейлора 98.6º) переход электронов в режим убегания определяется его распределением вблизи катодного острия. Локальное поле должно превышать значение, критическое для убегания в однородном поле. В сильнонеоднородном поле (углы меньше 98.6º) этого условия недостаточно. Электроны, убегающие в прикатодной области, могут перестать убегать в слабом поле на периферии. Условие убегания принимает тогда нелокальный характер – требуется, чтобы приложенное к зазору напряжение превысило определённый порог. Описанные сценарии подтверждены экспериментально – был определён порог генерации УЭ при использовании сменных графитовых конических катодов с углами раствора от 40º до 120º.

Литература

1. A.V. Kozyrev, L.N. Lobanov, G.A. Mesyats, N.S. Semeniuk, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, O.V. Zubareva. Local and nonlocal conditions for electron runaway in a gas gap with a conical cathode with a variable opening angle – Physics of Plasmas, 2024. – Vol. 31. – Article № 103109. – DOI: 10.1063/5.0225881.

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

Генерация радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике электронов с многодуговым плазменным катодом

В источнике электронов с плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления получен радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной

длительности. Параметры созданного источника электронов: ток дугового разряда до 200 А, ток в ускоряющем промежутке до 50 А, ускоряющее напряжение до 50 кВ, длительность импульса до 500 мкс, частота следования импульсов 1 $с^{-1}$, плотность энергии электронного пучка до 15 $Дж/см^2$ при диаметре коллектора 16 мм. Эмиссионная область плазменного катода имеет диаметр 220 мм и ширину 50 мм, а диаметр коллектора составляет от 10 до 30 мм. Для снижения неоднородности плотности тока пучка на коллекторе, приводящей не только к локальному оплавлению его поверхности, но и даже к электрическому пробою высоковольтного ускоряющего зазора, плазменный эмиттер изготовлен секционированным. Секционирование позволяет ограничить области горения дуговых разрядов друг от друга, тем самым уменьшить влияние локально возникающих процессов на коллекторе (дегазация, плавление, испарение и др.), которые развиваются азимутально, дестабилизируют работу источника электронов и нарушают процесс отбора электронов из эмиттера. Таким образом, происходит снижение неоднородности распределения плотности тока электронного пучка и неоднородности плавления поверхности коллектора. Сгенерированным электронным пучком удалось модифицировать поверхность цилиндрического коллектора из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 10, 16 и 28 мм и коллектора из титана ВТ1–0 диаметром 16 мм, что перспективно для его дальнейших применений в научных и технологических целях.

Литература

1. М.С. Торба, А.А. Гришков, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, Пространственная фокусировка радиально сходящегося электронного пучка в источнике на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation. Tomsk: TPU Publishing House, 799–802, 2024; doi: 10.56761/EFRE2024.C1-P-023002

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники, лаборатория пучково-плазменной инженерии поверхности

Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Прокопенко Никита Андреевич, м.н.с.; Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.; Тересов Антон Дмитриевич, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.

Формирования поверхностных сплавов в условиях, далеких от равновесных, реализующихся при комплексной обработке стали 20Х23Н18

Комплексным электронно-ионно-плазменным методом, сочетающим (1) вакуумно-дуговое плазменно-ассистированное напыление пленки титана толщиной 1, 3 и 5 мкм; (2) насыщение системы «пленка/подложка» атомами азота в плазме газового разряда низкого давления; (3) высокоскоростное (до 10^7 К/с) плавление системы «пленка (Ti+N)/(сталь) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком; осуществлено формирование упрочненных поверхностных слоев стали 20Х23Н18. Показано, что твердость модифицированного слоя увеличивается с ростом толщины напыленной пленки титана, достигая значения 7,0 ГПа, что превышает твердость исходной стали в ≈4 раза. Выявлено девятикратное увеличение износостойкости стали после комплексной обработки при толщине покрытия 3 мкм. Показано, что физической причиной кратного увеличения твердости и износостойкости стали является формирование в поверхностном слое в результате комплексной обработки градиентной многоэлементной многофазной нано(субмикро)кристаллической структуры. Актуальность и практическая значимость полученных результатов обусловлены сравнительно низким уровнем твердости и износостойкости исходных сталей данного класса, имеющих широкий спектр применения в современной промышленности.

Литература

1. Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, И.В. Лопатин, Н.А. Прокопенко, А.Д. Тересов, О.С. Толкачев. Комплексная модификация хромистой стали: анализ механизмов

упрочнения. // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2024), Tomsk, Russia, C. 974-979. doi: 10.56761/EFRE2024.C3-P-014701

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники
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.

Исследования in situ процесса формирования металлической пленки ВЭС состава TiNbZrTaHfCu, выполненные методом рентгенофазового анализа с использованием синхротронного излучения

Методом рентгенофазового анализа на установке ВЭИПС-1 с использованием синхротронного излучения (накопитель электронов ВЭПП-3, ИЯФ СО РАН) выявлены закономерности формирования фазового состава пленки ВЭС системы Ti-Nb-Zr-Ta-Hf-Cu, осажденной на подложку ВК8 вакуумно-дуговым методом при испарении катодов состава TiNbZrTaHf и Cu в режиме с плазменным ассистированием. Выявлено формирование аморфно-кристаллического состояния, представленного фазами состава Ti-Nb-Zr-Ta-Hf-Cu (основная фаза), TiZr, NbZr, и CuTiZr, образующимися на различных этапах напыления пленки. Применение in situ исследований позволило выявить временные интервалы формирования и перестройки обнаруженных фаз. Показано, что на первой стадии напыления формируется ВЭС (ОЦК кристаллическая решетка, a = 0,34748 нм). Одновременно с этим наблюдается поднятие фона дифракционной линии, указывающее на образование аморфно-кристаллического состояния пленки. На завершающей стадии напыления в угловом интервале 34-44° обнаруживаются дифракционные линии фаз с гексагональной кристаллической решеткой с параметрами: a = 0,46636 нм, c = 0,27872 нм и a = 0,31261 нм, c = 0,47846 нм.

Литература

1. Yu.F. Ivanov, Yu.H. Akhmadeev, N.A. Prokopenko, O.V. Krysina, N.N. Koval, E.A. Petrikova, V.V. Shugurov, A.N. Shmakov. An in situ x-ray diffraction study of the growth of TiNbZrTaHf high-entropy alloy thin films using synchrotron radiation. // High Temperature Material Processes (принята в печать), DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2024055614

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

Малоугловая ионно-плазменная полировка поверхности материалов и изделий

Была разработана и реализована ионно-плазменная система финишной ионно-плазменной полировки металлических материалов и изделий на основе установки «ТРИО», входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации (УНУ «УНИКУУМ» (http://www.ckp-rf.ru/usu/434216/)). Принцип работы системы заключается в извлечении из тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов, ускоренных в его прикатодной области ионов, производимом через эмиссионное окно Ø 100 мм перекрытое мелкоструктурной сеткой и направление их под малым углом к обрабатываемой поверхности образцов и изделий. Встречно ионам, из плазмы генератора с накаленным катодом «ПИНК» извлекаются электроны, поддерживающие горение тлеющего разряда с полым катодом. Образцы размещались в рабочей камере так, чтобы обрабатываемые поверхности были параллельны оси распространения ионного потока, а не требующие обработки проекции, во избежание перегрева, прикрывались специальным керамическим экраном. Угол падения ионов на обрабатываемые поверхности образцов регулировался дополнительным

источником отрицательного потенциального смещения, обеспечивающим образование катодного слоя в плазме генератора «ПИНК» у поверхности образцов. Именно катодный слой, образованный вблизи обрабатываемой поверхности, обеспечивал необходимое отклонение ионов от аксиального направления распространения и падение их под малым углом к обрабатываемой поверхности образцов и распыление выступающих неровностей. В результате 4-х часовой финишной полировки ионами образцов шероховатость их поверхности уменьшилась в 4 раза, с 0.12 до 0.03, что перспективно для использования в промышленности.

Лаборатория оптических излучений
***Национальный исследовательский Томский государственный университет**
Соснин Эдуард Анатольевич, в.н.с., д.ф.-м.н.; Панарин Виктор Александрович, н.с., к.ф.-м.н.; Скакун Виктор Семенович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Сурнина Елена Николаевна*, ст. лаб.; Нужных Светлана Анатольевна*, н.с., к.б.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н.

Влияние воды, активированной плазмой, на всхожесть и продуктивность яровой пшеницы (Triticum aestivum L.)

В лабораторных условиях проведено экспериментальное сравнение действия водными растворами, активированными плазмой и УФ-Б-излучения, на прорастание семян яровой пшеницы (Triticum aestivum L.). Растворы получали в пузырьковом разряде на основе грунтовой воды, которая подвергалась защелачиванию импульсным высоковольтным разрядом. Проведенные исследования подтверждают эффективность использования обоих факторов для предпосевной стимуляции пшеницы. Показано, что оба указанных фактора повышают основные параметры, характеризующие развитие пшеницы на ранних этапах отногенеза, а именно, увеличивают способность семян к влагопоглощению, ускоряют развитие корневой системы и развитие ростков. Полученные данные были использованы для проведения исследований в полевых условиях. В полевых условиях экспериментально обоснован способ повышения урожайности мягкой яровой пшеницы, который обеспечивается поливом семян в первые несколько дней после посева. При этом полив осуществляли растворами воды, активированной с помощью плазмы в режимах обработки, выявленных на этапе лабораторных исследований. Сделан анализ структуры урожая и качества полученного зерна. Показано, что стартовый девятидневный полив семян такими растворами ускоряет их прорастание, существенно повышает урожайность с сохранением качества зерна по сравнению с контрольным вариантом с поливом обычной грунтовой водой. Такая обработка значительно повысила содержание белка в зерне.

Литература

2. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Сурнина Е.Н., Нужных С.А. Влияние воды, активированной плазмой, на всхожесть и продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum L.*) // Прикладная физика. – 2024. – № 2. – С. 43–50. doi: 10.51368/1996-0948-2024-43-50
3. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Сурнина Е.Н. Действие УФ-Б излучения и плазма активированной воды на прорастание пшеницы (*Triticum aestivum L.*) // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024). – 2024. – Art. no. S4-P-048701. – P. 522–527. doi: 10.56761/EFRE2024.S4-P-048701

Соснин Эдуард Анатольевич, в.н.с., д.ф.-м.н.; Панарин Виктор Александрович, н.с., к.ф.-м.н.; Скакун Виктор Семенович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич,

зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н.; Печеницын Дмитрий Сергеевич, инж.; Сурнина Елена Николаевна*, ст. лаб.; Нужных Светлана Анатольевна*, н.с., к.б.н.

Устройство для активации водных растворов воздушной плазмой

Создано устройство для активации водных растворов воздушной плазмой. Оно предназначено для плазменной обработки водно-солевых растворов. Полученные плазменно-активированные растворы (ПАР) используются для полива растений на ранних этапах развития. Устройство включает: разрядную ячейку, в которой осуществляется разряд в воздухе атмосферного давления в пузырьках воды; блок питания разрядной ячейки; блоки нагнетания воздуха, а также напуска и откачки воды из внешнего контейнера; ресивер воздуха, применяемый для компенсации скачков давления в разрядной ячейке. Блок питания оснащён защитой от короткого замыкания. Технические параметры установки: габариты – 500×500×200 мм^3; масса – 9 кг; питание от сети – 220 В / 50 Гц; потребляемая мощность – до 20 Вт; непрерывное время работы – до 8 часов; объём обрабатываемой воды – от 8 до 20 л; скорость прокачки воды и воздуха – 0.2–5 и 0.1–1 л/мин, соответственно; напряжение в разрядной ячейке – 8–10 кВ. Производительности установки достаточно, чтобы проводить лабораторные и полевые исследования действия ПАР на семена растений. При необходимости установку можно масштабировать.

Литература

1. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Сурнина Е.Н., Сорокин Д.А. Способ стимуляции роста растений (МПК A01C 1/00; A01G 7/04; A01G 31/00) // Заявка на патент № 2024129165. Приоритет: 01.10.2024.

Лаборатория оптических излучений
***ФГБУН Институт химии нефти СО РАН**
Белоплотов Дмитрий Викторович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н.; Соснин Эдуард Анатольевич, в.н.с., д.ф.-м.н.; Кудряшов Сергей Владимирович*, г.н.с., д.х.н.; Петренко Татьяна Васильевна*, с.н.с., к.х.н.; Рябов Андрей Юрьевич*, с.н.с., к.х.н.

Деградация фенола и метилэтилкетона в грунтовой воде при воздействии низкотемпературной плазмой импульсно-периодического наносекундного разряда в атмосферном воздухе

Исследовалась эффективность деградация фенола и метилэтилкетона в грунтовой и дистиллированной водах, обработанных низкотемпературной плазмой импульсно-периодического наносекундного разряда в воздухе над поверхностью раствора. Установлено, что фенол и метилэтилкетон в грунтовых водах деградирует значительно хуже, чем в дистиллированной воде. Разница объясняется тем, что грунтовые воды содержат вещества и частицы различного рода, которые «отвлекают» на себя часть химически активных частиц (окислителей), образующихся в плазме и в слое плазма-жидкость. Показано, что значение имеет не средняя мощность разряда, а продолжительность воздействия. Причина – ограниченная скорость абсорбции реакционноспособных частиц плазмы водой. При воздействии плазмой разряда с частотой следования импульсов напряжения 100 Гц и продолжительностью воздействия 3 часа 20 минут степень деградации фенола в грунтовой воде объёмом 100 мл составила 92%, а метилэтилкетона – 94% при концентрации растворов 17,5 мг/л и 99.6 мг/л, соответственно. При этом эффективность деградации достигала 171 мг/кВт·ч для фенола и 1296 мг/кВт·ч для метилэтилкетона.

Литература

1. Сорокин Д.А., Белоплотов Д.В., Петренко Т.В., Рябов А.Ю., Соснин Э.А., Кудряшов С.В. Разложение метилэтилкетона в водном растворе при воздействии плазмой

высоковольтного наносекундного разряда // Успехи прикладной физики. – 2024. – Т. 12. – № 5. – С. 408–418. doi: 10.51368/2307-4469-2024-12-5-408-419

2. Белоплотов Д.В., Сорокин Д.А. Сравнение режимов обработки водных растворов фенола плазмой наносекундного разряда // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024). – 2024. – Art. no. S5-P-021601. – P. 623–626. doi: 10.56761/EFRE2024.S5-P-021601

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

Генерация многозарядных ионов металлов в магнетронном разряде планарной геометрии с инжекцией электронов

Установлено, что в сильноточном (до 100 А) импульсном магнетронном разряде в планарной геометрии электродов с инжекцией электронов, обеспечивающих устойчивое горение разряда в области предельно низкого рабочего давления (0.03-0.04 Па), в разрядной плазме генерируются многозарядные ионы металла материала катода. Показано, что в случае материалов катода магнетрона с коэффициентом ионного распыления меньше 1 (Ta, Zr, Ti) в плазме генерируются ионы с более высокими зарядовыми состояниями до 3+, тогда как для материалов катода с коэффициентом ионного распыления больше 1 (Cu, Ag, Cr, Zn), наибольшая зарядность ионов не превышает 2+.

Литература

1. M.V. Shandrikov, A.A. Cherkasov, E.M. Oks, K.P. Savkin, Low-pressure high-current magnetron discharge with electron injection: From self-sputtering with multiply charged metal ions to non-sputtering with “pure” gas ions // Vacuum. (2024) Vol. 228. P. 113512. https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac688f

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.

Кузнецов Сергей Вячеславович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Электронные и ионный токи ионно-звукового солитона в бесстолкновительной неизотермической плазме

Выполнено теоретическое исследование нелинейного движения неизотермической бесстолкновительной плазмы в виде ионно-звукового солитона в модели плазмы, в которой ионы описываются уравнениями холодной гидродинамики, а электронная компонента плазмы уравнением Власова с учетом скорости перемещения солитона.

Впервые обнаружено, что в лабораторной системе координат, наряду с ранее известными переносом солитоном захваченных электронов и смещением ионов плазмы в направлении распространения солитона, существует поток пролетных электронов, направленный в противоположную сторону. Физической причиной появления тока пролетных электронов является отсутствие симметрии по скоростям в функции распределения электронов вследствие движения солитона, в результате чего электронов, нагоняющих солитон, меньше, чем электронов, которых нагоняет солитон. В итоге

возникает ток пролетных электронов в направлении противоположном току захваченных электронов и сопоставимый с ним по величине.

Показано, что токи пролетных и захваченных электронов обеспечивают такое интегральное смещение отрицательного заряда через любое поперечное сечение плазмы, перпендикулярное направлению распространения солитона, которое полностью компенсирует смещение положительного заряда ионов в плазме, так что плазма после прохождения солитона остается квазинейтральной. Учет тока пролетных электронов является необходимым для правильной интерпретации экспериментальных данных, получаемых при исследовании электронных токов, протекающих в области ионно-звуковых солитонов, например, при обработке измерений, производимых спутниками в космической плазме.

Литература

1. Кузнецов С.В. Электронные токи ионно-звукового солитона. // Вестник ОИВТ РАН. 2024. Т.13. С. 4-8.
2. Кузнецов С.В. Уединенная ионно-звуковая волна в бесстолкновительной неизотермической плазме. // Теплофизика высоких температур. 2025. Т.63. №1. (в печати).

Лаборатория №1.4. - лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы

Зеленер Борис Борисович, г.н.с., зав. лабораторией

Стационарная ультрахолодная плазма, созданная путем непрерывной фотоионизации атомов охлажденных лазером

В этом работе была впервые создана стационарная ультрахолодная плазма с различными плотностями и температурами с помощью непрерывного двухступенчатого оптического возбуждения атомов кальция в магнитооптической ловушке. Сильнонеидеальная ультрахолодная плазма может быть использована в качестве отличной тестовой платформы для изучения взаимодействий многих тел, связанных с различными плазменными явлениями. Параметры плазмы поучены с помощью лазерно-индуцированной флуоресценции ионов кальция. Экспериментальные результаты хорошо описываются простой теоретической моделью, включающей непрерывный источник заряженных частиц, гидродинамический поток ионов и рекомбинацию трех тел. В эксперименте была получена ультрахолодная плазма с пиковой плотностью ионов $2{,}7\times10^{6}$ $см^{-3}$ и минимальной температурой электронов около 2 К. Наш подход, включающий стационарное состояние ультрахолодной плазмы в сочетании с сильным магнитным удержанием плазмы, может позволить достичь чрезвычайно сильной неидеальности в такой системе.

Литература

1. Zelener B. B. et al. Steady-State Ultracold Plasma Created by Continuous Photoionization of Laser Cooled Atoms //Physical Review Letters. – 2024. – Т. 132. – №. 11. – С. 115301. (Q1 WoS), https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.115301

Лаборатория №2.3. – плазмы

Амиров Равиль Хабибулович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Самойлов Игорь Сергеевич, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Исследование наносекундного разряда в жидком азоте

Проведено экспериментальное исследование наносекундного разряда в некипящем жидком азоте. Разряд инициировался в зазоре в центральной сердцевине коаксиального волновода с сопротивлением 50 Ом. Зазор варьировался в пределах 10 мкм – 3 мм. Диэлектриком волновода и разрядной средой был некипящий жидкий азот при

атмосферном давлении и температуре 63-77 К. Амплитуда импульса напряжения составляла +/- 12-25 кВ, длительность - 7 нс, время нарастания напряжения - 150 пс. Было обнаружено, что передний фронт разрядного тока составлял менее 80 пс, а скорость нарастания тока составляла более 5 кА/нс. За разрядным промежутком в волноводе за 0,2-4 нс до возникновения разряда была обнаружена проходящая электромагнитная волна связи амплитудой около 150 А и длительностью 150 пс. Была измерена зависимость времени задержки развития разряда (200 пс – 4 нс) от электрического поля в зазоре. Длительность и локализация свечения разряда регистрировались с помощью наносекундной ICCD-камеры.

На поверхности электродов было обнаружено образование эрозионных кратеров размером около 20 мкм со сложной структурой. Обсуждена роль ионизации и микровзрывных процессов в механизме разряда. Согласно расчетам, скорость ионизации электронов составила более $7{,}5\cdot10^{10}$ сек$^{-1}$ в некипящем жидком азоте при 65 К и $2\cdot10^{10}$ сек$^{-1}$ в кипящем азоте при 77 К. Соответствующий коэффициент скорости ионизации k_i составил $4{,}2\cdot10^{-12}$ см$^{-3}$ сек$^{-1}$ в некипящем жидком азоте при 65 К и $1{,}1\cdot10^{-1}2$ см$^{-3}$ сек$^{-1}$ в жидком азоте при 77 К.

Литература

1. A.A. Petrov, S.Yu. Savinov, R.Kh. Amirov and I.S. Samoylov // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation (sent to print)

Шавелкина Марина Борисовна, в.н.с., д.ф.-м.н.

Амиров Равиль Хабибулович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Лаборатория численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики

Филимонова Елена Александровна, в.н.с., д.ф.-м.н.

Роль химической кинетики газовой фазы в формировании графена в плазменных потоках

Проведено экспериментальное и численное исследование взаимосвязи между свойствами графена и составом газовой фазы в плазменной струе при синтезе графена. Исходными плазмообразующими смесями были Ar-CH_4 и Ne-(C_3H_8+C_4H_{10}). Синтезированный многослойный графен состоял из нескольких слоев графена в форме чешуек, что дает ему преимущество при использовании в технологиях 2D-печати. Показано, что морфология графена определяется компонентным составом высокотемпературной области и скоростью охлаждения плазменного потока, генерируемого плазмотроном постоянного тока.

Численное моделирование эволюции состава этих смесей вдоль струи показало, что увеличение скорости охлаждения плазменной струи приводит к ускорению образования молекул C_2 - предшественников для образования твердого углерода. В результате остается больше времени для роста твердых наночастиц, что согласуется с экспериментом. Не смотря на разницу в температурных и композиционных профилях для обеих смесей, образование пересыщенного пара C_2 происходит в диапазоне температур T = 2500-3500 К. Массовая доля основных продуктов пиролиза H_2 и C_2H_2, полученная в результате моделирования химической кинетики, близка к массовой доле, измеренной в эксперименте со смесью Ar-CH_4.

Сравнение состава конечного и промежуточного (вдоль струи) продуктов, рассчитанного с использованием химической кинетики и в предположении локального термодинамического равновесия, показало, что термодинамический подход неприменим в диапазоне температур ниже 3000 К в условиях проведенного эксперимента.

Литература

1. M.B. Shavelkina, E.A.Filimonova, P.P. Ivanov, R.Kh. Amirov //Journal Physics. D (sent to print)

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

Заряженные частиц микронного размера в линейной квадрупольной электродинамической ловушке при атмосферном давлении

Для квадрупольной линейной ловушки с частотой удерживающего гармонического напряжения 50 Гц в поперечном сечении экспериментально получены изображения устойчивых и неустойчивых траекторий в воздухе, которые согласуются с выполненным ранее компьютерным моделированием. Диаметр и длина линейных электродов равны 4 мм и 300 мм соответственно, расстояние между их осями равно 19 мм. Амплитудное значение синусоидального напряжения частотой 50 Гц менялось от 1,4 до 14 кВ. В экспериментах использовались полидисперсная смесь микрочастиц оксида алюминия (Al_2O_3) размером от 2 до 100 мкм. Микрочастицы заряжались положительно методом индукционной зарядки на плоском металлическом электроде, на который подавалось постоянное напряжение 1-7 кВ. Экспериментально исследовано воздействие дополнительного внешнего электрического поля в виде прямоугольных знакопеременных импульсов формы меандр с разной частотой. Обнаружено, что при понижении частоты внешнего воздействия размах колебаний частиц увеличивается и при частоте ниже 20 Гц они вылетают из ловушки. При повышении частоты внешнего электрического поля до 125 Гц происходит стабилизация траекторий частиц, а также уменьшается расстояние между траекториями, что свидетельствует об увеличении силы, направленной к области стабильного удержания частиц. Раскачка траекторий и их стабилизация согласуются с ранее выполненными расчетами. Экспериментально продемонстрирована возможность очистки диэлектрических поверхностей от пыли, причем не только в поверхности стеклянной пластины, ближней к ловушке, но и с нижней поверхности пластины.

Литература

1. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. В., Василяк Л. М. Удержание микрочастиц квадрупольной ловушкой с импульсно периодическим напряжением прямоугольной формы. // Прикладная физика. 2024. № 3. С. 93-98. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-93-98
2. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. В., Василяк Л. М. Траектории заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с удерживающим напряжением прямоугольной формы. // Прикладная физика. 2024. №4, С. 96-100. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-96-100
3. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. В., Василяк Л. М. Влияние знака заряда на траектории движения микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с удерживающим напряжением прямоугольной формы. // Прикладная физика. 2024. № 5, С. 99-104. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-99-104
4. Доброклонская М. С., В. Я. Печеркин, В. В. Владимиров, Л. М. Василяк. Траектории заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с удерживающим напряжением прямоугольной формы. // Вестник ОИВТ РАН. 2024. Т. 15. С. 44-48. https://doi.org/10.33849/2024308

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 в тлеющем разряде в магнитном поле

Трехмерные пылевые структуры формируются в плазменно-пылевых ловушках в области головы страты тлеющего разряда с сильной неоднородностью плазмы. Динамика и равновесие пылевой частицы определяется балансом действующих на неё сил, На основании экспериментальных результатов, полученных в Санкт-Петербургском государственном университете, выполнен сравнительный анализ действия ионного потока, идущего через объемную пылевую структуру, на её динамические характеристики в магнитном поле в двух инертных газах – неоне и аргоне – с заметно различающимися потенциалами ионизации. В этом случае пылевые частицы рассматриваются как «пылевые зонды» для определения действия ионного потока на угловую скорость вращения плазменно-пылевых структур. Определена азимутальная составляющая этого потока в магнитном поле, его действие оценивается через силу ионного увлечения. Показано, что невозможно сопоставить характеристики вращения пылевых структур в неоне и аргоне в идентичных разрядных условиях из-за «насыщения» структур вне областей оптимальных условий их формирования, которые для неона и аргона существенно различны. Для аргона это давление не выше 0.35 Торр, а для неона оно превышает 0.7 Торр; соответственно скорости вращения для аргона 2.7 рад/с, а для неона 1.3 рад/с. Показано, что в страте в аргоне в области значений магнитной индукции до 500 Гс скорость вращения пылевой структуры на два порядка превосходит скорость в этом же газе, наблюдаемую в монослое в ВЧ разряде. Сопоставлены геометрические размеры структур, формируемых в обоих инертных газах в магнитном поле. Определено, что для устойчивого вращения объемной плазменно-пылевой структуры необходимо наличие от пяти до десяти горизонтальных сечений, состоящих из минимум 19 частиц (т.е. двух замкнутых оболочек из частиц).

Литература

1. Л.Г. Дьячков, Е.С. Дзлиева, Л.А. Новиков, С.И. Павлов, В.Ю. Карасев. Быстрое вращение пылевой структуры в области сужения канала тока тлеющего разряда в магнитном поле ~1 Тл. ТВТ. 2024. Т. 62. № 3. С. 324-328. DOI:10.31857/S0040364424030014
2. S.I. Pavlov, E.S. Dzlieva, L.G. Dyachkov, M.S. Golubev, M.B. Morozova, L.A. Novkov, and V.Yu. Karasev. Effect of Plasma Flows in a Magnetic Fieldon the Dusty Structures in Different Inert Gases. Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 8, pp. 981–986. DOI:10.1134/S1063780X24600774

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

Структурный переход в сильнонеидеальных кулоновских кластерах

Рассмотрен вопрос о наличии термодинамического предела для кулоновского кластера (КК) путем МД-моделирования больших кластеров, содержащих до 5000 частиц. Показано, что при высоком значении кулоновского параметра неидеальности Γ = 500 и N > 2000 КК претерпевает структурный переход, заключающийся в появлении кристаллизованного ядра, на что указывает изменение вида радиальной функции распределения частиц. Тип кристаллической решетки, определенный методом структурной идентификации системы, оказывается поликристаллическим, состоящим преимущественно из микрокристаллитов со структурой hcp с включениями bcc и fcc. При уменьшении Γ ниже 180 происходит плавление ядра, что соответствует известному порогу плавления для бесконечной ОКП. Показано, что КК достаточно большого размера при высоких Γ представляет собой кристаллизованное ядро, окруженное поверхностным слоем вложенных сферических оболочек, число которых, также как и толщина поверхностного слоя, не зависит от размера КК. Такая структура может быть обнаружена в экспериментах с КК в комплексной плазме. Продемонстрировано, что высокий порог по

числу частиц, соответствующий структурному переходу, связан с близостью потенциальных энергий кластера с hcp-решеткой и реального кластера, состоящего из ядра и сферических оболочек.

Обнаружение кристаллического ядра, доля частиц в котором возрастает с ростом N, делает возможным экстраполяцию свойств КК к неограниченной ОКП. В широком диапазоне размеров с помощью как вириала сил, так и потенциальных энергий межчастичного взаимодействия и взаимодействия частиц с фоном определен фактор сжимаемости частиц КК при высоком Г. Показано, что он приблизительно равен -0.04 ± 0.06, а его экстраполяция до значения $N = 10^6$ порядка -0.09, что можно отождествить с результатом для бесконечной системы. С учетом погрешностей численного эксперимента можно сделать вывод о неотличимости фактора сжимаемости от нуля. Данный результат хорошо согласуется с предложенным в работе методом расчета фактора сжимаемости, основанным на модели ячеек Вигнера–Зейтца.

Литература

1. Д.И. Жуховицкий, Е.Е. Первощиков // ТВТ. 2024. Т. 62. №4.

Лаборатория №17.3. – активных кулоновских систем

Петров Олег Федорович, г.н.с., проф., д.ф.-м.н., академик РАН
Васильев Михаил Михайлович, в.н.с., д.ф.-м.н.

Экспериментально изучена динамика и эволюция активных броуновских капель эмульсии сложного состава при воздействии лазерного излучения

В работе представлены результаты экспериментального исследования динамики активных броуновских капель эмульсии сложного состава в классических коллоидных системах при воздействии лазерного излучения. В качестве движителя таких капель использовались включения твердых светопоглощающих наночастиц магнетита с характерным размером 10 нм. В природе такой же размер имеют молекулярные моторы в клетках.

С помощью микрофлюидной техники создавались близкие по свойствам монодисперсные капли эмульсии сложного состава. Экспериментально обнаружено возможность управляемого активного броуновского движения таких капель эмульсии сложного состава при воздействии лазерного излучения как результат внутрикапельного движения наночастиц магнетита, поглощающих лазерное излучение. Лазерное излучение приводило к нагреву наночастиц магнетита, в результате чего возникала движущая термофоретическая сила.

Литература

1. E.A. Kononov, M.M. Vasiliev et. al, Active Brownian motion of emulsion droplets driven by nanoscale effects under laser irradiation // Physics of Fluids, Vol.36, Issue 11, 2024

Лаборатория №18 – плазменных технологий

Гаджиев Махач Хайрудинович, зав. лаб., с.н.с., к.ф.-м.н.

Синтез люминесцентной керамики β-Ga_2O_3 методом газотермического напыления

Представлены первоначальные результаты синтеза со скоростью до 2 мкм/с люминесцентной керамики β-Ga_2O_3 методом плазменного газотермического напыления, в котором использовалась низкотемпературная плазма смеси аргона и азота. Источником плазмы служил электродуговой генератор постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги и расширяющимся каналом выходного электрода. Исходный материал состоял из полидисперсного порошка монокристаллического β-Ga_2O_3 с размерами частиц от 5 до 50 мкм. Полученные образцы керамики были исследованы с помощью

сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Результаты исследований показывают, что в процессе синтеза была получена керамика со слоистой текстурой. В стехиометрическом составе керамики наблюдался сдвиг в сторону увеличения содержания галлия. Данные рентгеноструктурного анализа показали уменьшение параметров кристаллической решетки и объема элементарной ячейки керамической структуры β-Ga_2O_3. Открытая пористость образцов составляла приблизительно 5%. Спектры радиолюминесценции керамики β-Ga_2O_3 показали интенсивную полосу излучения в диапазоне от 300 до 600 нм с максимумом на длине волны ~ 360 нм и неэкспоненциальным затуханием.

Литература

1. Gadzhiev M.Kh., Muslimov A.E., Yusupov D.I., Il'ichev M.V., Kulikov Y.M., Chistolinov A.V., I.D. Venevtsev, Volchkov I.S., Kanevsky V.M., Tyuftyaev A.S. Gas-thermal spraying synthesis of β-Ga_2O_3 luminescent ceramics // Materials. 2024, 17, 6078. https://doi.org/10.3390/ma17246078

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Лаборатория прикладной физики плазмы

Голубев Сергей Владимирович, г.н.с., руководитель научного направления, д.ф.-м.н.

Синцов Сергей Владиславович, снс, к.ф.-м.н.

Неравновесный СВЧ разряд атмосферного давления

Проведены исследования микроволнового разряда атмосферного давления, поддерживаемого непрерывным излучением субтерагерцового гиротрона с частотой 263 ГГц. Свободно-локализованный разряд создавался в области перетяжки сфокусированного СВЧ пучка в сонаправленном с волновым вектором электромагнитной волны потоке плазмообразующей газовой смеси, сформированном внутри специализированной электродинамической структуры с характерными размерами 4λ. Введенная мощность субтерагерцового излучения на уровне 200 – 1200 Вт обеспечивала нагрев плазмы до температуры 4000 – 6000 К. Плазмообразующая смесь формировалась из молекулярного газа с избыточным содержанием аргона. Методами оптической эмиссионной спектроскопии было проведено исследование плазменных параметров разряда. Методами скоростной видеосъемки была изучена пространственно-временная динамика свободно-локализованного СВЧ разряда. На основании выполненных исследований была разработана физическая модель стационарного субтерагерцового разряда высокого давления.

- Электронная плотность имеет неоднородное пространственное распределение, среднее значение близко к критическому для частоты электромагнитного излучения на уровне 10^{15} $см^{-3}$.
- Использование субтерагерцового излучения для нагрева плазмы обуславливает слабостолкновительный режим поддержания разряда при атмосферном давлении.
- Механизм поддержания стационарного разряда высокого давления связан с пиковым усилением электрического поля СВЧ волны в области плазменного резонанса, возникающего в условиях слабостолкновительного режима со значительной газовой теплопроводностью.
- В узком слое вблизи границы плазменного резонанса микроволновая энергия с высокой эффективностью поглощается и преобразуется в энергию электронов

плазмы, что обуславливает кратный отрыв электронной температуры от поступательной.

- В свободно-локализованном СВЧ разряде навстречу сфокусированному субтерагерцовому пучку за счет теплопроводностного механизма распространяются мелкомасштабные плазмоиды, имеющие закритическую электронную плотность, с частотой формирования несколько килогерц.

Свободно-локализованный СВЧ разряд был использован в плазмохимическом процессе фиксации азота при атмосферном давлении. В качестве молекулярного газа в плазмообразующей смеси был использован атмосферный воздух. Конверсия молекул кислорода в оксиды азота достигала 58±6%, энергоэффективность синтеза 9 – 16 МДж/моль. Содержание оксидов азота в 2 – 2,5 раза превышает равновесную концентрацию при реализованных в эксперименте температуре и компонентного состава газовой смеси.

Литература

1. Gildenburg, V. B., Golubev, S. V., Gospodchikov, E. D., Sintsov, S. V., Vodopyanov, A. V. // Phys. Plasmas, 2024, 31(2), 023507, https://doi.org/10.1063/5.0173489.
2. Sintsov, S.V., Vodopyanov, A.V., Mansfeld, D.A., A. P. Fokin, A. A. Ananichev, A. A. Goryunov, E. I. Preobrazhensky, N. V. Chekmarev, M. Yu. Glyavin. // J Infrared Milli Terahz Waves, 2024, 45, 454–465, https://doi.org/10.1007/s10762-024-00987-w.

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

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

Диагностика плазмы в условиях возмущений зондом Ленгмюра

Проведен цикл исследований, посвящённый учету возмущений при исследованиях плазмы методом зондов Ленгмюра конечного размера. Получены следующие результаты:

- Проведено сравнение измерений цилиндрическими зондами разных радиусов, установлено влияние радиуса зонда на измерение концентрации электронов. Впервые проведен совместный учет "эффекта стока" электронов на зонд, конечного сопротивления плазмы и зондового слоя [1], предложены методы коррекции возмущенных экспериментальных ВАХ.
- Исследование влияния размера изолятора зонда на результаты измерений. Обнаружено, что влияние размера изолятора различно в отношении разных параметров плазмы. Увеличение диаметра изолятора приводит к уменьшению измеряемого значения потенциала плазмы и увеличению средней энергии и концентрации электронов. Степень влияния размера изолятора различна в разных областях пространства неоднородной плазмы и коррелирует с локальными значениями средней энергии электронов. В разряде с полым катодом наибольшие различия в параметрах, измеренных с помощью зондов с сильно различающимися размерами изолятора, наблюдаются вблизи катода. [3, 4].
- Сопоставлены результаты определения потенциала плазмы разными методами: по нулю второй производной ВАХ с использованием алгоритма Savitzky-Golay (SG), по максимуму шума ВАХ, по методу касательных к ВАХ. Для цифровой записи ВАХ предложена новая версия метода определения потенциала плазмы по шуму ВАХ. Установлены зависимости ФРЭЭ, средней энергии и концентрации электронов, потенциала плазмы, от параметров фильтра SG, используемого для обработки экспериментальной ВАХ [5].

- С использованием техники подвижных зондов измерены 3D распределения концентрации электронов в плазме с полым катодом [1, 2].

Литература

1. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Spatial distribution of electron concentration in a DC glow discharge supported by a hollow cathode // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2024, V. 44, No. 1, P. 651-666. https://doi.org/10.1007/s11090-023-10378-z
2. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin. 3D-electron density distributions in a hollow cathode discharge // High energy chemistry. 2024, V. 58, Supplement issue 2, P. S108-S110. https://doi.org/10.1134/S0018143924700693
3. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Influence of the size of the Langmuir probe insulator on the measurements of inhomogeneous plasma parameters in a discharge with a hollow cathode // Vacuum. 2024, V. 226, 113338 (8pp). https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113338
4. И.И. Драганов, А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин. Сравнение результатов измерений электронных параметров плазмы зондами Ленгмюра с изоляторами разных размеров // Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2024, т. 16, № 2 (62), с. 103-111. https://elibrary.ru/item.asp?id=68579517
5. A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, I.V. Kochetov, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin. Determination of gas discharge plasma potential by Langmuir probe using different methods // Vacuum. 2024, V. 225, 113279 (9pp). https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113279