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

Научный совет Российской академии наук по физике низкотемпературной плазмы

ОТЧЕТ
Научного совета за 2022 год

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

МОСКВА 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы 3
ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА....3
МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА 4
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2022 г. 5
Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”....5
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси 6
Казахский национальный университет имени аль-Фараби....8
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» 11
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» 13
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)....15
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ) 19
ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН) 20
ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)....21
ФГУФИЦ Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН) 33
ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения РАН (ИЭФ УрО РАН) 33
ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)....34
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)....48
ФГБУН Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН)....52

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 2022 г.:

1. XXXVII Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2022), March 1–6, 2022, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, Россия.
2. XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 14 - 18 марта 2022 г., Россия.
3. XXI Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике. 26-28 апреля 2022 г., г. Москва, Россия.
4. 10th International Conference on PLASMA PHYSICS AND PLASMA TECHNOLOGY (PPPT-10), 12-16 сентября 2022 г., Минск, Беларусь.
5. 8-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты», 2-8 октября 2022 г., Томск, Россия.
6. XII Всероссийская конференция по физической электронике (ФЭ-2022). 19-22 октября 2022, Махачкала, Россия.
7. XIV Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», 1-4 ноября 2022 г., г. Казань, Россия.
8. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», 30 ноября - 1 декабря 2022 г., Москва, Россия.
9. III Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», 1-4 декабря 2022 г., Казань, Россия.
10. XIII Конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение», 7-9 декабря 2022 г., НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

Планируемые 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, март 2023 г., г. Звенигород Московской обл., Россия.
3. XXII Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике, май 2023 г., Москва, Россия.
4. Всероссийская (с международным участием) конференция "Физика низкотемпературной плазмы" (ФНТП -2023), июнь 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», декабрь 2023 г., Москва, Россия.
8. IV Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», декабрь 2023 г., Казань, Россия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2022 г.

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

Собственные моды низкочастотных зональных течений в плазме токамака

Зональными течениями (ЗТ) в тороидальных магнитных системах называют низкочастотные колебания электрического потенциала плазмы $m = 0$, $n = 0$ (m – полоидальное волновое число, n – тороидальное волновое число), сопровождаемые осцилляциями плазменного потока. ЗТ широко наблюдаются в экспериментах на токамаках и стеллараторах, а интерес к ним связан с распространенной концепцией о важной роли шировых течений в регуляризации турбулентного переноса плазмы.

В тороидально вращающейся плазме существуют две ветви таких колебаний. Высокочастотная ветвь соответствует геодезическим акустическим модам, низкочастотная ветвь – зональным течениям, индуцированным стационарным вращением плазмы. Динамика ЗТ определяется равновесным распределением давления и плотности плазмы на магнитной поверхности. Устойчивые ЗТ проявляются в виде низкочастотных колебаний с частотой порядка 1 кГц, но ЗТ могут быть и неустойчивыми.

В [1] выполнен нелокальный анализ *собственных мод* низкочастотных зональных течений в тороидально вращающейся плазме токамака с применением разработанной одножидкостной идеальной магнитогидродинамической модели. Впервые рассчитана радиальная структура и собственная частота глобальной моды низкочастотного ЗТ. Показано, что для типичных радиальных профилей параметров плазмы тороидальное вращение плазмы приводит к образованию глобальных зональных течений на периферии плазменного столба. Условия устойчивости таких течений определяются параметрами динамического равновесия вращающейся плазмы и зависят от стратификации давления и плотности плазмы в полоидальном направлении на магнитной поверхности. Показано, что для некоторых типов равновесий эти течения являются апериодически неустойчивыми, что, в свою очередь, приводит к возбуждению дифференциального вращения плазмы на краю плазмы токамака. Представлены примеры двух типов ЗТ: устойчивого ЗТ, существующего в конфигурации с изотермическими магнитными поверхностями, и неустойчивого ЗТ в равновесии с постоянной плотностью плазмы на магнитных поверхностях.

Ключевые слова: зональные течения, токамак, геодезические акустические моды, тороидальное вращение, собственные моды, магнитная гидродинамика.

Литература

1. V.I. Ilgisonis, V.P. Lakhin, N.A.Marusov, A.I. Smolyakov and E.A. Sorokina. Low-frequency zonal flow eigen-structures in tokamak plasmas. Nucl. Fusion 62 (2022), issue 6, 066002 (10pp). https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac3f4c

Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ")
108840 Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12
Лазарев Владимир Борисович, начальник лаборатории физики плазменных процессов; к.ф.-м.н.

Исследование осаждения лития на диагностических мишенях в камере токамака Т-11М.

Современными методами анализа исследован налёт (смыв) с рабочей поверхности лимитера-коллектора лития, длительно экспонированного в разряде токамака Т-11М. Комбинация прямого кислотно-основного титрования (ПКОТ) с методом спектрального анализа позволила оценить причину завышения содержания лития, определяемого методом ПКОТ, как результат присутствия в смыве матричного эффекта – (оксо)гидроксидов переходных металлов, входящих в состав стали (в первую очередь – железа) и аммиака, который образуется при гидролизе нитрида лития и становится серьёзной причиной завышения результатов при определении лития методом ПКОТ. Регистрируемое в итоге по методу ПКОТ количество лития складывается из следующих составляющих: собственно количества лития, его кажущегося количества, обусловленного присутствием в смывных водах аммиака, а также кажущегося количества, обусловленного присутствием в смывных водах ржавчины ((оксо)гидроксида железа (III)) и других продуктов коррозии стали первой стенки токамака. Селективное определение аммиака осуществлялось колориметрическим методом и методом обратного титрования, тогда как многоэлементные методы спектрального анализа (ИСП-МС/АЭС) позволили отдельно оценить влияние коррозии первой стенки и привести данные по относительной скорости выноса из неё ряда элементов (самая высокая – у фосфора и серы, значительная – у вольфрама и меди).

Сравнение результатов ПКОТ и прямого определения количества осаждённого лития методом пламенного анализа с учётом роли аммиака может быть использовано как качественный показатель уровня эрозии первой стенки.

Ключевые слова: токамак, литиевые плёнки, диагностические мишени, спектральные методы определения содержания лития.

Литература

1. Н.Т. Джигайло, С.И. Кравчук, В.Б. Лазарев, Н.П. Петрова. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами исследования состава литийсодержащих пленок на диагностических мишенях в камере токамака Т-11М. ВАНТ, Термоядерный синтез, 2022, Т.45, №1, с.79-90. DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-1-79-90

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 показано, что воздействие компрессионным плазменным потоком на образцы титана с тонким композиционным покрытием Nb-Ti-Zr-Al приводит к плавлению покрытия и части титановой основы, жидкофазовому перемешиванию всех элементов в расплавленном слое и, как следствие, к формированию модифицированного слоя титана, содержащего твердые растворы на основе фаз α-Ti и мартенсита α-Ti, и легированного цирконием, ниобием и алюминием. Легированный слой характеризуется увеличением микротвердости и снижением коэффициента трения модифицированной поверхности титана. Воздействие компрессионным плазменным потоком на титановый сплав Ti-6Al-4V с предварительно нанесенным тонким слоем меди приводит к синтезу модифицированного титанового слоя, легированного алюминием, ванадием и медью с равномерным распределением элементов. Модифицированный слой характеризуется увеличением микротвердости в 1,3 раза (до 4,7 ГПа) и снижением (в ~ 1,5 раза) коэффициента трения обработанной поверхности.

Впервые показана возможность модифицирования структурного состояния заэвтектического силуминового сплава Al-Si при воздействии на его поверхность компрессионным плазменным потоком. Такое воздействие вызывает плавление поверхностного слоя и последующую сверхбыструю закалку из расплава, а также измельчение крупных первичных кристаллов кремния и формирование мелкокристаллической структуры со средним размером кремниевых включений ~300 нм. Установлено, что с увеличением плотности поглощенной энергии из-за увеличения времени существования расплава и эффективности гидродинамического перемешивания кремния, алюминия и атомов примесных металлов, происходит гомогенизация элементного состава сплава, способствующая диспергированию структуры. Воздействие компрессионного плазменного потока на образцы заэвтектического силумина с предварительно нанесенным тонким слоем Nb приводит к формированию легированной атомами ниобия модифицированной области толщиной до 45 мкм, содержащей интерметаллическое соединение (Al,Si)3Nb и характеризующейся упрочнением до 2 раз поверхностного слоя силумина.

Изучены процессы модификации импульсным воздействием компрессионных плазменных потоков износостойких термоградиентных порошковых покрытий, полученных последовательным плазменным напылением самофлюсующегося сплава NiCrBSi и мелкодисперсного карбида TiC. Впервые показано, что после высокоэнергетического воздействия формируется модифицированный слой, представляющий собой кермет с равномерным распределением TiC в матричном сплаве. Установлено, что в модифицированном слое образуется жесткая система карбидов, воспринимающая значительную часть контактной нагрузки трибосопряжения, и характеризующаяся повышением прочности за счет постепенного изменения теплофизических свойств градиентных слоев от подложки к рабочей поверхности и снижением уровня остаточных макронапряжений.

Литература

1. A.V. Basalai, N.N. Cherenda, A.B. Petukh, V.V. Uglov, A.P. Laskovnev, A.Yu. Isobello, V.M. Astashinski, A.M. Kuzmitski. The formation of surface Ti-Al-V-Cu alloy by combined ion-plasma treatment // High Temperature Material Processes. – 2022. – V. 26, iss. 1. – P. 33-39. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022042089
2. N.N Cherenda, I.S Rogovaya, V.I. Shymanski, V.V. Uglov, I.A. Saladukhin, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, Yu.F. Ivanov, E.A Petrikova. Element and phase composition, mechanical properties of titanium surface layer alloyed by Zr, Nb, Al under the action of compression plasma flows // High Temperature Material Processes. – 2022. – V. 26, iss. 2. – P. 1-9. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022043003
3. V.I. Shymanski, A. Jevdokimovs, V.V. Uglov, N.N. Cherenda, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitsky, N. . Bibik, E.A. Petrikova. Modification of the Structure of the Hypereutectic

Silumin Alloy Al-44Si under the Action of Compression Plasma Flows // Inorganic Materials: Applied Research. –2022. – Vol. 13, No. 3. – P. 701–709. https://link.springer.com/article/10.1134/S2075113322030340

4. N.N.Cherenda, N.V.Bibik, V.M.Astashynski, A.M. Kuzmitski. Modification of hypereutectic Al-Si alloy surface layer structure by Nb alloying under high temperature plasma impact // High Temperature Material Processes. – 2022. – V. 26, iss. 2 . – P. 91-100 . (DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022043681)
5. A.Ph. Ilyuschenko, A.I. Shevtsov, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, A.N. Chumakov, N.A. Bosak, A.I. Letsko, I.V. Fomikhina, K.V. Buikus, E.A. Kostyukevich, T.A Leonova. Research of formation processes of wear-resistant gradient thermal coatings containing NiCrBSi matrix alloy and TiC carbides and modified by high-power pulse processing // High Temperature Material Processes. – 2022. – V. 26, iss. 1. – P. 75-91. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022042071

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики (НИИЭТФ)

050040, Казахстан, Алматы, проспект аль-Фараби, 71

Лаборатория пылевой плазмы и плазменных технологий

Досболаев Мерлан Кылышулы, ВНС, зав.лабораторией, к.ф.-м.н., доцент

Тажен Айгерим Бегимханкызы, НС

Рамазанов Тлеккабул Сабитович, ГНС, д.ф.-м.н., профессор, академик НАН РК

Исследование собственного магнитного поля и динамики импульсного плазменного потока

Была выполнена модификация коаксиального плазменного ускорителя. Использованы электрические кабели с низким реактивным сопротивлением, высокоемкие и низкоиндуктивные накопительные конденсаторы. Также для того, чтобы избежать обратного рассеяния плазменного шнура от торца ускорителя была установлена специальная плазмопоглощающая мишень. Таким образом, эти конструктивные изменения экспериментальной установки позволили нам получить относительно долгоживущие (~300 μc) и длинные плазменные шнуры. Исследованы физические характеристики плазменного шнура. Для этой цели проведена комплексная диагностика плазмы, которая включает пояс Роговского, магнитные зонды и цилиндр Фарадея. В результате получены данные о плотности ионов и температуры электронов в плазменном шнуре, о временной эволюции величины собственного магнитного поля плазменного шнура в разрядном промежутке и на расстоянии 23,5 см от электродной системы. Кроме того, получены осциллограммы тока, вольтамперная характеристика. В экспериментах нами было обнаружено разделение зарядов во время ускорения потока плазмы по осциллограммам токов электронного и ионного пучков. Эти данные могут быть полезными при экспериментальном моделировании взаимодействия плазменного шнура с поверхностью кандидатных материалов в термоядерных установках, к примеру, для нахождения необходимых условий экспериментов (расположения мишени, области компрессии плазменного потока) и для определения оптимальных параметров плазменного шнура (давления газа, напряжения конденсаторов, плотности и температуры плазменных частиц).

Исследование процесса пылеобразования при изменении структурных и поверхностных свойств облученных плазмой материалов

На основе коаксиального плазменного ускорителя было экспериментально исследовано взаимодействие плазменного потока с кандидатными материалами термоядерных реакторов (ТЯР), такими как вольфрам и графит. До и после облучения плазменным потоком, для анализа структуры и морфологии поверхности были использованы следующие методы: сканирующая электронная микроскопия и рентгеновский дифракционный анализ. В результате было показано, что:

а) С увеличением числа плазменных импульсов, усиливается вклад в пылеобразование дефектов, образующихся на поверхности кандидатных материалов (трещины, кратеры, блистеры, тонкие пленки). Это означает, что показатели выброса пыли (твердых частиц) в ТЯР сильно зависят от исходных поверхностных и структурных свойств данных конструкционных материалов.

б) После взаимодействия плазменного потока с кандидатными материалами образуется горячее пылевое облако мишени, которое негативно воздействует на находящиеся вблизи элементы. Вырванные из поверхности так называемые снарядовые пылевые частицы могут иметь достаточно большие скорости. Следовательно, они могут вырваться из облака и ударяться о твердые поверхности. Более того, сильно нагретые пылевые частицы в облаке могут быть радиационно активными.

в) После взаимодействия с плазменным потоком изменяются не только поверхностные свойства кандидатных материалов, но и структурные свойства. По данным рентгеноструктурного анализа, нами было обнаружено смещение рентгеновских дифракционных пиков, что свидетельствует о рекристаллизации, и о появлении сжимающих и растягивающих напряжении в приповерхностных слоях материалов.

г) Обнаружены основные механизмы пылеобразования на поверхности вольфрама. К таким механизмам относятся хрупкое разрушение и плавление острых краев трещин, а также выброс каплевидных пылевых частиц с расплавленной поверхности металла.

Литература

1. M.K. Dosbolayev, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov. Investigation of self-generated magnetic field and dynamics of a pulsed plasma flow, Plasma Science and Technology. 2022; Vol. 24, Issue 5, 055403, doi: 10.1088/2058-6272/ac5018.
2. M.K. Dosbolayev, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov, Ye.A. Ussenov, Investigation of dust formation during changes in the structural and surface properties of plasma-irradiated materials, Nuclear Materials and Energy. 2022; Vol. 33, 101300, https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.

Лаборатория физики пылевой плазмы и плазменных технологий
Утегенов Алмасбек Улубекович, н.с., PhD
Оразбаев Саги Амзеевич, с.н.с., PhD
Батрышев Дидар Галымович, с.н.с., PhD
Досболаев Мерлан Кылышулы, в.н.с., к.ф.-м.н., зав. лабораторией
Рамазанов Тлеккабул Сабитович, г.н.с., , д.ф.-м.н., академик НАН РК

Исследование динамических характеристик пылевой плазмы в импульсном высокочастотном разряде

Проведены экспериментальные работы по исследованию транспортных характеристик пылевой плазмы, состоящей из монодисперсных частиц двух размеров, меламинформальдегида (MF) – 2,55 мкм и диоксида кремния (SiO_2) – 1,05 мкм. Плазма, содержащая структуру из микрочастиц с двумя разными диаметрами, показала сильную зависимость от параметров ВЧ модулированного напряжения [1]. Также с помощью зондовой диагностики обнаружено, что импульсно-временная модуляция высокочастотного (ВЧ) напряжения позволяет изменять температуру электронов в плазме. Так как температура электронов доминирует при зарядке пылевых частиц, в настоящей

работе было показано, что с помощью импульсно-временной модуляции можно контролировать положение пылевых частиц. Более того, с помощью модулированной ВЧ плазмы стало возможным сепарировать микрочастицы. Таким образом, как показывают результаты экспериментов, можно удалять из плазмы более крупные частицы, в то время как мелкие частицы остаются в плазме.

Пылевая плазма с наночастицами углерода синтезированных в плазме импульсного высокочастотного разряда

Синтезированы углеродные наночастицы с помощью плазмы ВЧ разряда в импульсном режиме для контроля размеров наночастиц. Были проведены экспериментальные работы по синтезу наночастиц углерода в плазме смеси газов аргон-метан ($Ar + CH_4$) в импульсном ВЧ разряде. Экспериментальные наблюдения показали, что размер углеродных наночастиц увеличивается с ростом частоты модуляции импульсного сигнала. Также было обнаружено, что с помощью частотно-модулированного импульсного ВЧ сигнала можно контролировать размер углеродных наночастиц в диапазоне от ~ 40 до ~ 70 нм. В данных экспериментах, химическое осаждение из паровой фазы, усиленной плазмой, является основным механизмом роста наночастиц. Анализ изображений, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии, показал два типа наночастиц, одни из которых представляют собой агломерат наночастиц с аморфной структурой, а другие – нанометрового размера с кристаллической структурой. Также было обнаружено, что изменение частоты модуляции и времени синтеза позволяет получить различные пленки с разными поверхностными характеристиками [2].

Литература

1. J. Lin, K. Hashimoto, R. Togashi, A. Utegenov, M. Henault, K. Takahasahi, L. Boufendi, T. Ramazanov, “Transport control of dust particles by pulse-time modulated RF in dusty plasmas”, J. Appl. Phys., vol. 126, 043302, 2019.
2. D. Batryshev, A. Utegenov, R. Zhumadilov, N. Akhanova, S. Orazbayev, S. Ussenkhan, J. Lin, K. Takahashi, N. Bastykova, S. Kodanova, M. Gabdullin, T. Ramazanov, “Carbon nanoparticles characteristics synthesized in pulsed radiofrequency discharge and their effect on surface hydrophobicity”, Contrib. Plasma Phys., Vol. 62, Issue 10, e202100238, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/ctpp.202100238

Отдел физики плазмы, лаборатория математического моделирования процессов в плазме
Исанова Молдир Кенесовна, с.н.с., PhD
Коданова Сандугаш Кулмагамбетовна, в.н.с., к.ф.-м.н., профессор
Габдуллин Маратбек Тулебергенович, в.н.с., к.ф.-м.н., профессор
Алдакул Есенбек, н.с.,
Исмагамбетова Томирис, н.с.,
Рамазанов Тлеккабул Сабитович, г.н.с., д.ф.-м.н., академик НАН РК, зав.отделом

Исследование структурных, транспортных, и термодинамических свойств неидеальной многокомпонентной плотной плазмы с тяжелыми ионами

Разработаны эффективные потенциалы взаимодействия (псевдопотенциалы) частиц с учетом эффектов сильных межчастичных корреляций, ионного остова и квантовых эффектов вследствие частичного квантового вырождения электронов. Псевдопотенциальный подход был использован для исследования влияния ионного остова на электрон-ионное рассеяние в плотной плазме. Экранирование заряда иона учитывалось с помощью функции отклика плотности в длинноволновом пределе. Кроме того, эффект электронной неидеальности учитывается с использованием правила сумм сжимаемости,

связывающего поправку на локальное поле и обменно-корреляционную часть плотности свободной электронной энергии. Используя экранированный псевдопотенциал, были рассчитаны фазовые сдвиги электрон-ионного рассеяния, полное сечение упругого рассеяния и транспортное сечение, коэффициенты переноса и кулоновский логарифм. Установлено, что ионный остов приводит к сильному уменьшению сечений рассеяния. Кроме того, показано, что транспортное сечение имеет немонотонную зависимость от изменения параметров поля ионного остова. Подход, основанный на эффективном потенциале в сочетании с методом молекулярной динамики (МД) был использован для изучения влияния ионного остова на транспортные свойства ионов в режиме разогретого плотного вещества. В качестве примера рассмотрен ударно-сжатый кремний. Результаты МД моделирования в рамках микроканонического ансамбля анализировались путем вычисления среднеквадратичного смещения и автокорреляционной функции скорости частиц, которые были использованы для вычисления коэффициента диффузии ионов. Результаты сравниваются с данными, рассчитанными без учета эффекта ионного остова. Обнаружено, что эффект ионного остова приводит к значительному снижению коэффициента диффузии. Кроме того, получены результаты для коэффициента вязкости ионов на основе соотношения Грина-Кубо, связывающего вязкость и автокорреляционную функцию напряжения. Выяснилось, что эффект ионного остова может привести к увеличению или уменьшению коэффициента вязкости в зависимости от силы связи ионов. Рассчитаны структурные и термодинамические свойства плотной неидеальной плазмы с тяжелыми ионами. Термодинамические свойства этой плазмы изучались на основе трех типов потенциалов взаимодействия. Получены результаты компьютерного моделирования оптических свойств при различных параметрах многокомпонентной неидеальной плазмы с тяжелыми ионами.

Литература

1 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Nurusheva M.M., Issanova M.K. Ion core effect on scattering processes in dense plasmas // Physics of Plasmas. 2021; Vol. 28 (9), 092702. DOI 10.1063/5.0059297.

2 Ramazanov T.S., Issanova M.K., Ye.K. Aldakul, Kodanova S.K. Ion core effect on transport characteristics in warm dense matter // Physics of Plasmas. 2022; Vol. 29 (11), 112706. DOI: 10.1063/5.0102528.

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

(ДГУ)

367001, Махачкала. М.Гаджиева, 43а

Научно-образовательный Центр «Физика плазмы»

Ашурбеков Назир Ашурбекович, научный руководитель НОЦ «Физика плазмы», д.ф.-м.н., профессор

Исследование кинетических процессов в плазменных реакторах, перспективных для применения в прецизионных аддитивных технологиях

Исследованы динамика ионизационных процессов, структура фронтов ионизации и энергетические характеристики импульсных разрядов с протяженным полым катодом, перспективных для использования в плазменных реакторах для технологий атомно-слоевого осаждения и травления материалов электронной техники.

Предложен удобный метод расчета функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в газоразрядной плазме, где присутствие электронов высокой энергии приводит к формированию частичной анизотропии ФРЭЭ. Приведено подробное описание этого метода. Продемонстрирована эффективность предложенного метода для расчета ФРЭЭ в плазменном столбе высоковольтного наносекундного разряда в аргоне и неоне с протяженным полым катодом в диапазоне давлений газа от 5 до 40 Торр.

С помощью экспериментальных исследований и численного моделирования установлена динамика формирования и развития фронта волны ионизации наносекундного разряда с полым катодом при различных профилях полости катода. Показано, что катод с прямоугольной полостью позволяет получить однородный плоский плазменный столб по центру промежутка с более высокой концентрацией заряженных частиц по сравнению полукруглой полостью.

Выполнены исследования влияния микрочастиц на ФРЭЭ в плазменном столбе.

Исследование морфофункциональных свойств биотканей (in vivo) при воздействии низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления

Исследованы спектрально-флуоресцентных и диффузно-оптические характеристики биотканей при воздействии низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления в смеси воздуха с аргоном. Выявлены потенциальные флуорофоры и определены коэффициенты оптического поглощения и транспортного рассеяния биотканей. Обнаружено, что зондирование биотканей холодной плазмой приводит к росту интенсивности флуоресценции и коэффициента диффузного отражения, что связано с двукратным увеличением коэффициента транспортного рассеяния и изменением концентрации эндогенных хромофоров — снижением содержания воды, липидов и билирубина до 20%, а также ростом показателя насыщения кислородом до 10%. На основе проведенного анализа показано, что терапевтическое действие низкотемпературной плазмы может быть связано с усилением антиоксидантной защиты и развитием процессов компенсаторной дегидратации.

Литература

1. N.A.Ashurbekov, M.Z.Zakaryaeva, K.M.Rabadanov, K.O.Iminov, M.B.Kurbangadzhieva, and A. A. Kudryavtsev. Numerical simulation of a partially anisotropic electron distribution function in a pulsed discharge with a hollow cathode. Phys. Plasmas 29, 123905 (2022); doi: 10.1063/5.0122364
2. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, K. M. Rabadanov, G. S.Shakhsinov, M. Z. Zakaryaeva and M. B. Kurbangadzhieva. Simulation of the spatio-temporal evolution of the electron energy distribution function in a pulsed hollow-cathode discharge. Plasma Sci. Technol. 2022. https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac9aa8
3. Shubo Li , Zhe Ding , Kurban M. Rabadanov, Anatoly A. Kudryavtsev , Nazir A. Ashurbekov,Jingfeng Yao, Chengxun Yuan , and Zhongxiang Zhou. Specificities of the Nonlocal EDF Formation in a Dusty Plasma With the Different Spatial Distribution of the Microparticle Density. IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Т. 50. № 6. С. 1653-1660. DOI: 10.1109/TPS.2022.3152394
4. ZheDing JingfengYao K.M.Rabadanov E.A.Bogdanov A.A.Kudryavtsev N.A.Ashurbekov ShuboLi ChengxunYuanG. ShShakhsinov ZhongxiangZhou.. Specificity of the eedf formation in a dusty plasma with nonmonotonic profiles of charged particles and reversal ambipolar field. Chinese Journal of Physics. Volume 77, June 2022, Pages 36-44. https://doi.org/10.1016/j.cjph.2022.01.015.
5. К.М. Гираев, Н.А. Ашурбеков, Э.Х. Исрапов, Г.Ш. Шахсинов, В.Р. Абдулаев, К.М. Рабаданов, З.М. Исаева. Исследование морфофункциональных свойств биотканей (in vivo) при воздействии низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления. Оптика и спектроскопия, 2022, том 130, вып. 5. С.792-803. DOI: 10.21883/OS.2022.05.52439.2697-21
6. Н.А. Ашурбеков, М.З. Закарьяева, К.О. Иминов, К.М. Рабаданов, Г.Ш. Шахсинов / Функция распределения электронов по энергиям в высоковольтном импульсном разряде с протяженным полым катодом // Письма в ЖТФ. - 2022. - Т. 48, Вып. 10. - С. 20-23. DOI: 10.21883/PJTF.2022.10.52551.19180. (переводная версия: Technical Physics Letters, 2022, Vol. 48, No. 5 DOI 10.21883/TPL.2022.05.53480.19180

7. Н.А. Ашурбеков, М.Б. Курбангаджиева, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, К.М.Рабаданов /Асимметрия оптических спектров пропускания импульсного разряда с протяженным полым катодом при резонансном взаимодействии коротких полихроматических лазерных импульсов с возбужденными атомами неона //Журнал прикладной спектроскопии. - 2022. - Т. 89, № 6. - С. 815-819. doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-6-815-819.
8. Н.А. Ашурбеков, М.З. Закарьяева, К.О. Иминов, К.М. Рабаданов, Г.Ш. Шахсинов / Динамика развития ионизационных фронтов и распределения плотности основных параметров плазмы в наносекундном разряде с протяженным полым катодом в аргоне //Теплофизика высоких температур. - 2022. - Т. 60, № 6. - С. 1-7.(в печати) DOI: 10.31857/S0040364422050015.
9. Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, М.Б. Курбангаджиева, К.М. Рабаданов. Влияние типа функции распределения электронов на характеристики наносекундного разряда в протяженных экранированных трубках с цилиндрическими полыми электродами. Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022). 2022. - С.515-519. doi: 10.56761/EFRE2022.S5-O-018902
10. Н.А. Ашурбеков, М.З. Закарьяева, К.О. Иминов, К.М. Рабаданов, Г.Ш. Шахсинов /Импульсные плазменно-пучковые разряды с протяженным щелевым катодом и их технологические приложения // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022). 2022. - С. 511-514. doi: 10.56761/EFRE2022.S5-O-018901
11. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ, №2022613853. Программа численного моделирования протяженного плазменного реактора с протяженным полым катодом: № 2022611819: пост. 10.02.2022: гос. рег. в Реестре программ для ЭВМ 15.03.2022 / Ашурбеков Н.А, Шахсинов Г.Ш., Курбангаджиева М.Б., Рабаданов К.М.
12. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ, №2022614247. Программа численного моделирования струйного источника низкотемпературной плазмы атмосферного давления в смеси воздуха с аргоном: №2022611820: пост. 10.02.2022: гос. рег. в Реестре программ для ЭВМ 17.03.2022 / Ашурбеков Н.А, Рабаданов К.М., Шахсинов Г.Ш., Муртазаева А.А.
13. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ, №2022667792. Программа численного моделирования плазменного реактора в поперечном магнитном поле: №2022663589: пост. 19.07.2022: гос. рег. в Реестре программ для ЭВМ 26.09.2022 / Рабаданов К.М., Ашурбеков Н.А, Муртазаева А.А.

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. Лаборатория плазменной газодинамики и визуализации потоков.

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

Обнаружение самолокализации импульсного объемного разряда с предионизацией в потоке в канале с выступом.

Импульсный объемный разряд с предионизацией УФ излучением от плазменных листов инициировался в нестационарном потоке воздуха в канале с препятствием (диэлектрическим выступом). Разряд инициировался в разные моменты движения плоской

ударной волны (и газового потока за ней) в канале. Длительность электрического тока разряда составляла 200-500 нс. Энергия импульсного объемного разряда перераспределялась в неоднородном поле потока (эффект самолокализации плазмы). Проанализировано влияние локализованного разряда на сверхзвуковой поток в канале: динамика взрывных волн, создаваемых самолокализованной плазмой в зонах отрыва вблизи выступа, а также разрывы, возникающие в результате пробоя разрывов при ионизации наклонной ударной области. Первоначальная конфигурация потока, нарушенная импульсным объемным разрядом, была восстановлена за интервал времени до 120 мкс.

Термографическая регистрация нагрева и остывания стенки при воздействии импульсных поверхностных сильноточных разрядов.

Исследован нагрев и остывание участков профилированного прямоугольного канала при воздействии импульсных поверхностных сильноточных разрядов, скользящих по поверхности диэлектрика с учетом особенностей сверхзвукового течения в канале с препятствием. Исследовался импульсный поверхностный разряд, инициированный в канале 24х48 мм^2 в изначально покоящемся газе и в высокоскоростном потоке. Плазма разряда локализуется преимущественно в подветренной области за обратным уступом (прямоугольной вставкой). Разряд создает импульсный (субмикросекундный) энерговклад протяженностью 30 мм в зоне своей локализации. В результате, происходит кратковременный нагрев участка прилегающей к ней стенки канала. С помощью термографической съёмки через кварцевые окна камеры, прозрачные для ИК излучения, зафиксировано, что плазма импульсного разряда заметно нагревает поверхность плоской стенки канала. По полученным данным регистрации в диапазоне 1.5-5.1 мкм с экспозицией от 200 мкс была исследована эволюция остывания стенок канала как в неподвижном воздухе, так и при различных скоростях набегающего потока – в подветренной области за диэлектрической вставкой.

Исследование режима развития поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха с наклонной ударной волной и оценка тепловыделения в разрядном канале.

Проведено экспериментальное и численное исследование поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха с наклонной ударной волной. Эксперименты проводились в ударной трубе, совмещенной с разрядной камерой, при числах Маха потоков 1.20–1.68. Разряд инициировался высоковольтным импульсом 25 кВ; длительность разрядного тока составляла ~500 нс. Поверхностный скользящий разряд развивался в виде локализованного канала в зоне взаимодействия косого скачка уплотнения с пограничным слоем на верхней стенке разрядной камеры. Разрядный канал как линейный источник тепла индуцировал ударную волну. Пространственно-временная визуализация поля течения в разрядной камере осуществлялась с помощью высокоскоростной теневой съемки с частотой до 525 000 кадров в секунду. Эксперименты показали, что возмущенный поток восстанавливал исходную структуру за время более 100 мкс. Численное моделирование с локальным энергоподводом в сверхзвуковой поток в плоском канале проведено на основе нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса. Установлено, что динамика индуцированной ударной волны зависит от режима энерговклада и параметров течения. Из сравнения экспериментальных данных и численного моделирования оценено выделение тепловой энергии в разрядном канале величиной 0,22–0,29 Дж.

Литература

1. Pulse volume discharge behind shock wave in channel flow with obstacle / I. A. Znamenskaya, D. I. Dolbnya, I. E. Ivanov et al. // Acta Astronautica. 2022. Vol. 195. P. 493–501. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.03.031

2. The discharge heated channel region visualization based on thermal imaging registration // Znamenskaya I. A., Karnozova E. A., Kuli-zade T. A. Scientific visualization. Научная визуализация. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 52–61. DOI: 10.26583/sv.14.4.05
3. Experimental and numerical investigation of a surface sliding discharge in a supersonic flow with an oblique shock wave / I. V. Mursenkova, I. E. Ivanov, Y. Liao, I. A. Kryukov // *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 6. P. 2189. DOI: 10.3390/en15062189

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

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

Лаборатория физики низкотемпературной плазмы
Голубовский Юрий Борисович, проф., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Измерение электрических полей и температур электронов спектроскопическим методом в смеси газов

В работе развивается идея, предложенная группой Очкина В.Н. по измерению электрических полей и электронных температур в смеси инертных газов с сильно различающимися потенциалами возбуждения и ионизации. В статье приведено решение кинетического уравнения Больцмана для смеси неона и криптона при низких давлениях и токах. Получены ФРЭ для концентраций криптона в диапазоне 0.5%-11%. С помощью этих ФРЭ рассчитаны отношение интенсивностей спектральных линий криптона к неону в зависимости от приведенного электрического поля. Выполнены измерения отношений этих линий в диапазоне разрядных токов 0.5 - 5 мА при суммарном давлении газа в интервале 0.27 - 1 Тор. По полученным экспериментальным данным найдены приведенные поля и электронные температуры. Результаты спектроскопических измерений дают рациональные величины, которые соответствуют параметрам разряда при исследуемых разрядных условиях. Показано, к каким ошибкам может приводить обработка результатов эксперимента с использованием Максвелловской ФРЭ. Этот спектроскопический метод может быть использован для диагностики плазмы при наличии пылевых структур, что и будет являться предметом следующей работы.

Исследование протекания тока в разрядной трубке с металлической секцией в рамках модели проводящей жидкости

Работа посвящена исследованию протекания тока через стеклянную цилиндрическую разрядную трубку с металлической секцией. Рассматривается гидродинамическая модель однокомпонентной проводящей жидкости. Параметры проводящей жидкости задаются в соответствии с параметрами разрядом в неоне при давлении 1 Тор и токе 10 мА. Показано, что наличие металлической секции приводит к разветвлению разрядного тока на компоненту, протекающую через объем газа, и компоненту, протекающую по приблизительно эквипотенциальной металлической поверхности. Получены двумерные распределения потенциал, электрическое поле и плотность тока в зависимости от размера металлической секции и радиуса разрядной трубки. На основе вычисленного электрического поля рассчитано пространственное распределение источников возбуждения, описывающих излучение спектральных линий, и ионизации. Проанализировано возникновение объемного заряда на границе раздела стекло- металл.

Принцип минимальной мощности в газоразрядной плазме

Статья посвящена памяти Ю. П. Райзера, ушедшего из жизни в 2021 году. Он оставил заметный след в физике газового разряда. Принцип минимальной мощности (наиболее вероятно состояние, требующее минимальной мощности) часто упоминается в его книгах.

Хотя фундаментальные законы физики не подразумевают этот принцип, детальный анализ лежащих в его основе явлений часто может показать, почему природа предпочитает именно это состояние. Райзер проиллюстрировал этот принцип для стратифицированной плазмы, при образовании электродных пятен, при контракции разряда, при формировании дугового разряда и т. д. Авторы обосновывают, что нелинейность уравнений, описывающих газовые разряды, часто может оправдать реализацию состояния плазмы, поддерживаемого при минимальной электрической мощности. Эта нелинейность возникает из-за того, что небольшие группы энергичных электронов часто управляют процессами ионизации. Число этих электронов сильно зависит от отношения электрического поля к плотности газа, E/N. При определенных условиях скорость ионизации может также нелинейно зависеть от концентрации электронов за счет ступенчатой ионизации и кулоновских столкновений. Мы используем принцип минимальной мощности, чтобы проиллюстрировать некоторые из вкладов Райзера в физику газового разряда с единой точки зрения. Показано, что нелинейность процессов ионизации в газовых разрядах может обосновать этот принцип расслоения плазмы. Однако страты s-, p- и r-типа в неоне могут существовать с минимальным усилением ионизации или без него. Это напоминает нам о предупреждении Райзера о том, что применение принципа минимальной мощности может привести к ошибочным предсказаниям, и в каждом случае требуется правильная теория, чтобы оправдать его использование. «Явление стратификации удовлетворяет принципу минимальной мощности» — Ю. П. Райзер.

Литература

3. A. Siasko, Yu. Golubovskii, S. Pavlov, E. Dzlieva, L. Novikov, M. Golubev, and V. Karasev, About the measurement of electric field and electron temperature by the spectroscopic method in a gas mixture, Physics of Plasma (в печати).
4. A V Siasko, Yu B Golubovskii, and M V Balabas. About the current flow in a discharge tube with a metal section. I-model of a conductive liquid, Phys. Scr. 2023, 98, 015607. DOI 10.1088/1402-4896/aca62f
5. Kolobov V. I., Golubovskii Y. B. The principle of minimal power //Plasma Sources Science and Technology. – 2022. – V. 31. – №. 9. – P. 094003. DOI 10.1088/1361-6595/ac8b31

Лаборатория плазменно-пучковых разрядов
Сухомлинов Владимир Сергеевич, проф., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Кинетическая теория развития неустойчивостей при взаимодействии плазмы с электронным пучком

На основе кинетической теории исследована устойчивость электронного пучка, взаимодействующего с неоднородной плазмой, при числах Кнудсена порядка 1. Теория проверена на примере низковольтного пучкового разряда в инертном газе. Показано, что в случае неоднородной плазмы, даже если пренебречь затуханием пучка, могут одновременно распространяться несколько возмущений с одной и той же частотой, но с разными фазовыми, групповыми скоростями и инкрементами. Подробно исследован случай линейной зависимости плотности плазмы от координаты. В этом случае есть два решения: n- и p-волны, причем только n-волна имеет физический смысл. Установлено, что увеличение градиента плотности плазмы приводит к уменьшению инкремента и увеличению фазовой и групповой скоростей распространения возмущений с частотой порядка плазменной. Система с растущей плотностью плазмы вдоль направления луча более устойчива, чем с постоянной плотностью. Для существенного изменения скорости роста возмущения достаточно относительного градиента плотности плазмы на величину около 10% на длине волны. Все наблюдаемые особенности параметров возмущения в зависимости от градиента плотности плазмы имеют физическую интерпретацию. Расчеты подтверждаются экспериментальными данными.

Литература

1. Sukhomlinov V. S. et al. Kinetic theory of nonrelativistic electron beam–inhomogeneous plasma system instability //Physics of Plasmas. – 2022. – V. 29. – №. 9. – P. 093103. https://doi.org/10.1063/5.0097263
2. Grabovskiy A. Y. et al. High-temperature Knudsen thermionic converter with multicavity emitter //Journal of Applied Physics. – 2022. – V. 132. – №. 1. – P. 013302. https://doi.org/10.1063/5.0088220
3. Popova A. N., Sukhomlinov V. S., Mustafaev A. S. A New Intensity Adjustment Technique of Emission Spectral Analysis When Measured at the Upper Limit of the Dynamic Range of Charge-Coupled Devices //Applied Sciences. – 2022. – V. 12. – №. 13. – P. 6575. https://doi.org/10.3390/app12136575
4. Sukhomlinov V. S. et al. Dispersion effect on phase focusing of monochromatic waves in a low voltage beam discharge in rare gases. Kinetic theory //Chinese Journal of Physics. – 2022. – V. 77. – P. 1291-1304. https://doi.org/10.1016/j.cjph.2022.03.038
5. Mustafaev A., Grabovskiy A., Sukhomlinov V. Suppression of Instabilities in a Plasma Voltage Stabilizer //Applied Sciences. – 2022. – V. 12. – №. 8. – P. 3915. https://doi.org/10.3390/app12083915
6. Sukhomlinov V. et al. Influence of Beam and Plasma Noise on the Instability of the “Fast Electron Beam–Confined Collisional Plasma” System. Kinetic Consideration //Journal of the Physical Society of Japan. – 2022. – V. 91. – №. 2. – P. 024501. https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.024501
7. Sukhomlinov V. S. et al. Instability in the Interaction of an Electron Beam and Plasma with an Arbitrary Anisotropic Electron Velocity Distribution Function. Kinetic Theory //2022 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). – IEEE, 2022. – P. 1-1. DOI: 10.1109/ICOPS45751.2022.9813116

Лаборатория исследования пробойных явлений
Ионих Юрий Зиновьевич, проф., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Исследование пробойных явлений в длинных разрядных трубках

В работе основное внимание уделено изучению процессов пробоя в длинных разрядных трубках (длина которых велика по сравнению с диаметром) в инертных газах Ne, Ar и их смеси при низком давлении (~1 Торр). Пробой газа вызывали импульсами пилообразного напряжения положительной или отрицательной полярности, подаваемыми на активный электрод. Напряжение пробоя определяли по падению напряжения при пробое. Исследовано излучение волны ионизации (ВИ), предшествующей пробою. Разрядные трубки подвергались двум видам внешних воздействий. Первый — это освещение катода трубки светом видимого спектра, а второй — постоянное или импульсное смещение потенциала катода на величину ниже, чем при поддерживающем разряде. В обоих случаях напряжение пробоя возрастало до удвоения при некоторых условиях. Наблюдение за ВИ выявило наличие дополнительных волн, предшествующих регулярной предпробойной ВИ. Скорость дополнительной волны и интенсивность излучения отличались от таковых для регулярных волн. Их главная особенность в том, что они не преодолевают весь межэлектродный промежуток, а ослабевают и исчезают в промежутке. Предполагается, что дополнительные волны осаждают поверхностный заряд стенки, что, в свою очередь, влияет на напряжение пробоя. Повышенное значение напряжения пробоя сохраняется в течение десятков минут, что может свидетельствовать о времени жизни поверхностного заряда того же порядка. Это было подтверждено прямыми измерениями пристеночного потенциала с помощью электростатического вольтметра.

Литература

1. A V Meshchanov, A I Shishpanov, P S Bazhin and Y Z Ionikh. Breakdown voltage in long tubes: The effect of surface charge //Plasma Sources Science and Technology. . – 2022. – V. 31. – №. 11. – P. 114010. DOI 10.1088/1361-6595/ac801a

Лаборатория пылевой плазмы
Карасев Виктор Юрьевич, проф., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Распределение полидисперсных пылинок в смесях инертных газов

Размер левитирующих пылинок зависит от условий разряда. Варьируя параметры плазмы, можно управлять характеристиками пылевых структур. Представлен метод управления параметрами пылеуловителя в стоячем слое путем создания плазмообразующего газа в виде смеси инертных газов с разными потенциалами ионизации (ксенон и гелий). Методика эксперимента заключается в использовании полидисперсных зерен, из которых в ловушке отбираются зерна с размерами, соответствующими условиям в плазме. На основании учета примерно 1000 зерен были получены гистограммы распределения зерен по среднему размеру. Показано, что в выбранных условиях эксперимента при добавлении к гелию до 10% ксенона размеры частиц меняются в пределах от 8,9 до 3,3 мкм. Соотношение сил оценивалось численно.

Пылевая плазма в условиях тлеющего разряда в магнитном поле до 2.5 Тл

Исследование пылевой плазмы в сильном магнитном поле. Газоразрядная плазма в магнитном поле с индукцией до 2.5 Тл обладает замагниченными электронами и ионами. Например, циклотронный радиус электронов становится меньше размера пылевой частицы, а циклотронный радиус иона меньше длины экранирования. В такой анизотропной плазменной среде, созданной в эксперименте, для пылевой подсистемы формируются уникальные условия. Исследование "мягкой материи" при экстремально сильном воздействии магнитного поля сегодня является передовым краем науки. Касательно представленного проекта, авторский коллектив - единственный в мире, который проводит такие исследования с объемными пылевыми структурами, он обладает для этого квалификацией и необходимым оборудованием.

Литература

1. Dzlieva E. S. et al. Distributions of Polydisperse Dust Grains in Noble Gas Mixtures //Plasma Physics Reports. – 2022. – V. 48. – №. 10. – P. 1066-1070. https://doi.org/10.1134/S1063780X22700325
2. Дзлиева Е.С., Горбенко А.П., Голубев М.С., Ермоленко М.А., Новиков Л.А., Павлов С.И., "ФОРМАЛЬДЕГИДА В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ В ТЯЖЕЛОМ ИНЕРТНОМ ГАЗЕ", Физика Плазмы . – 2022. – Т. 49. – №. 1 (принята к печати)
3. Дзлиева Е.С., Дьячков Л.Г., Карасев В.Ю., Новиков Л.А., Павлов С.И. ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА В УСЛОВИЯХ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДО 2.5 Тл" Физика Плазмы . – 2022. – Т. 49. – №. 1 (принята к печати)

Лаборатория физики низкотемпературной плазмы
Кудрявцев Анатолий Анатольевич, доц., к.ф.-м.н.

Исследование отрицательной проводимости в нелокальной плазме тлеющего разряда постоянного тока

Показано, что явление абсолютной отрицательной подвижности электронов (АОП) в однородной стационарной плазме практически не сказывается, когда решение кинетического уравнения Больцмана сводится исключительно к локальному плазмохимическому балансу образования и гибели электронов. Даже если сильное прилипание электронов позволяет реализовать обратную функцию распределения электронов (ФРЭ), знак подвижности электронов зависит от того, учитывается или нет также вклад электроотрицательной примеси в увеличение транспортной частоты

рассеяния электронов. На примере типичной смеси аргона и фтора показано, что при использовании реальных сечений столкновений электронов АОП электронов не реализуется даже при обратной ФРЭ. Аналогичный результат получается при решении модельной задачи с сильным прилипанием электронов: даже инверсия ФРЭ вблизи нулевых энергий не обеспечивает создания АОП. Поскольку реальная лабораторная плазма пространственно неоднородна, для нахождения ФРЭ необходимо решить полное кинетическое уравнение, зависящее как от энергетических, так и от пространственных переменных. В этих условиях дивергенция пространственного потока является дополнительным источником (или стоком), который тем самым может обеспечить формирование стационарной абсолютной отрицательной проводимости.

Литература

1. Chengxun Yuan; Yan Chai; Eugene A. Bogdanov, Anatoly A. Kudryavtsev. Influence of Electron–Electron Collisions on the Formation of Inverse Electron Distribution Function and Absolute Negative Conductivity in Nonlocal Plasma of a DC Glow Discharge // IEEE Transactions on Plasma Science – 2022. – V. 50. – №. 6. – P. 1689-1694. DOI: 10.1109/TPS.2022.3173987
2. Yuan C. et al. On the Possibility of Creating Absolute Negative Conductivity in a Local Stationary Plasma With an Inverse EDF //IEEE Transactions on Plasma Science – 2022. – V. 50. – №. 6. – P. 1695-1699. DOI: 10.1109/TPS.2022.3174775
3. Ding Z. et al. Specificity of the EEDF formation in a dusty plasma with nonmonotonic profiles of charged particles and reversal ambipolar field //Chinese Journal of Physics. – 2022. – V. 77. – P. 36-44. https://doi.org/10.1016/j.cjph.2022.01.015

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

420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

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.

Кинетика многофазных сред плазменно-электролитных разрядов

В современных условиях при переходе к альтернативным источникам энергии актуальное значение придается водородной энергетике. Одним из наиболее распространенных способов получения водорода является электролиз.

Исследование низкотемпературной плазмы с жидкими электродами включает в себя теплоперенос, гидрогазодинамику, фотолиз и многофазную химию. Интерес к плазменно-жидкостным системам обусловлен тем, что в данной области исследований сложным образом переплетены три подсистемы, описывающие соответственно физику процессов в плазменном (газовый разряд), жидком (электролит) и газовом (окружающий воздух) фазовых состояниях. В этих системах насчитывается более 50 заряженных, нейтральных атомарных и молекулярных частиц, которые вступают в реакцию друг с другом и влияют на баланс энергии в разряде. Этим обусловлена сложность проведения численных расчетов, так как математическое моделирование плазменно-жидкостных систем может включать в себя более 30 уравнений в зависимости от количества учитываемых частиц. Все это затрудняет создание единой классификации плазменно-жидкостных систем аналогично той, которая существуют для разрядов с твердыми электродами (коронный, тлеющий, дуговой, искровой и др.)

Так на экспериментальных вольтамперных характеристиках плазменно-электролитного разряда можно выделить три области, соответствующие протеканию различных физико-химических процессов. Первая область (начальная) соответствует протеканию только электрохимических реакций. Вторая (промежуточная) – это

переходная область, ее начало определяется изменением угла наклона кривой ВАХ, это связано с интенсивным газо- и паровыделением вблизи в близи поверхности металлического электрода. Третья область – это устойчивое горение газовых разрядов. Определено, что в зависимости от свойств эдектролита (проводимость, кислотность, температура) наблюдаются различные формы разрядов (от дугового до лидерного). Выявлено, что интенсивное испарение электролита является причиной самоподдержания разряда.

Реализован численный метод оптимизации задач химической кинетики. Данный алгоритм позволяет определять скорости констант в приэлектродных процессах в соответствии с экспериментальными данными по выходу продукта и рассчитать концентрацию веществ, участвующих в приэлектродных процессах, на конкретный момент времени. Проведено численное моделирование процессов конкретного электролизера. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета выхода водорода и кислорода в процессе электролиза раствора гидроксида калия при постоянной температуре и данных, полученных в ходе натурного эксперимента. Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Данный метод также был применен в задачах гальванотехники для определения выхода твердого вещества.

Литература

1. С.Ю. Петряков, Д.Н. Мирханов, Ал. Ф. Гайсин, Р.Ш. Басыров, Н.Ф. Кашапов Разряд постоянного тока между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом // Прикладная механика и техническая физика., 2022, В.№5, стр.20-32
2. Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Математическое моделирование гетерогенных процессов в системах: твердое тело – жидкий электролит // XLIX Международная (звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (ICPAF-2022)– Звенигород, 2022. – 137 с.
3. Дрожжин С.А., Кашапов Н.Ф., Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н. Способ плазменно-электрохимического формирования наноструктурированного хромового покрытия и устройство для реализации способа // Патент на изобретение 2775013 С1, 27.06.2022. Заявка № 2022107743 от 24.03.2022.

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.

I. Изучение физических процессов в СВЧ разряде в жидкостях.

Завершен цикл исследований физики микроволновых разрядов в жидкостях, в частности, в жидких углеводородах. Методами скоростной фотосъемки, регистрации звуковых колебаний, эмиссионной спектроскопии, теневой и Шлирен-фотографий исследованы начальные стадии развития СВЧ-разряда в жидком нефтяном растворителе (Нефрас) при атмосферном давлении над поверхностью жидкости. Разряд в жидкости на частоте 2,45 ГГц и падающей мощности 50-600 Вт создавался у конца микроволновой антенны с помощью антенн разных конфигураций.

На основе проведенных экспериментов создана картина физических процессов, сопровождающих образование СВЧ разряда в жидких углеводородах.

- Разряд нестационарный и представляет собой последовательность разрядных импульсов, случайным образом распределенных во времени.
- Образование каждого разряда сопровождается созданием ударной волны.

- Ударная волна, возникающая на конце антенны, возбуждает затухающие звуковые колебания в объеме реактора над поверхностью жидкости. Частоты колебаний соответствуют частотам собственных колебаний газового столба в реакторе.
- Ударная волна, отраженная от поверхности жидкости, вызывает колебания газового пузыря, создаваемого разрядом в жидкости и движением жидкости к основанию антенны.
- Поскольку при разряде в плазме образуются углеродсодержащие частицы, это приводит к их осаждению в месте входа антенны в реактор. Следствием этого является нагрев и испарение жидкости у основания антенны и затруднение образования разряда на конце антенны.

Литература

1. Yuri A. Lebedev, Galina V. Krashevskaya, Timur S. Batukaev, Andrey V. Mikhaylyuk. Plasma Process. Polym. 2022, e2100215. https://doi.org/10.1002/ppap.202100215.
2. Т. С. Батукаев, Г. В. Крашевская, Ю.А. Лебедев, А. В. Михайлюк Физика плазмы, *2022, том 48, № 4, с. 370–374.* **DOI:** 10.31857/S0367292122040047

II. Проведен анализ публикаций по различным проблемам плазмохимии (разложение CO_2, получение ацетилена) и опубликован ряд обзоров:

1. Ю.А. Лебедев, В.А. Шахатов. Химия высоких энергий 2022, том 56, № 2, с. 87–103. DOI: 10.31857/S0023119322020073.
2. Ю.А. Лебедев, В.А. Шахатов. Журнал прикладной химии, 2022, Т.95, вып.1, С.5-25. DOI: 10.31857/S0044461822010017.
3. И.В. Билера, Ю.А. Лебедев. Нефтехимия 2022, 62(2), 154-180. DOI: 10.31857/S0028242122020010.
4. Ю.А. Лебедев, В.А. Шахатов. Успехи прикладной физики, 2022, том 10, № 2, С. 109-131, DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-109-131.
5. Yu.A. Lebedev, V.A. Shakhatov. Plasma Physics Reports, 2022, Vol. 48, No. 4, pp. 415–437. DOI: 10.1134/S1063780X22040092
6. Ю.А. Лебедев, В.А. Шахатов. Успехи прикладной физики, 2022, Т. 10, №4, 323-342. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-323-342

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

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

Лаборатория теоретической физики; лаборатория оптических излучений

Козырев Андрей Владимирович, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.; Тарасенко Виктор Федотович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Коковин Александр Олегович, м.н.с., аспирант

Смена механизма формирования коронного разряда в атмосферном воздухе при отрицательном острие

Проведены систематические экспериментальные и теоретические исследования режимов горения коронного разряда с отрицательно заряженного острия. Для коронного разряда, функционирующего в режиме импульсов Тричела, с субнаносекундным временным разрешением сняты профили импульсов тока разряда, которые сопоставлены с оптическими характеристиками свечения плазмы, зафиксированные с субмиллиметровым пространственным разрешением. Параллельно с экспериментами в рамках двумерной теоретической модели проведен расчет пространственно-временной динамики этого же коронного разряда, сделанный с учётом богатой плазмохимической кинетики плазмы искусственного воздуха.

Установлено, что увеличение скорости роста напряжения на промежутке, сопровождающееся также ростом протекающего тока, резко изменяет механизм

формирования коронного разряда с лавинного на стримерный. Моделирование показало, что при скорости роста напряжения ~3 В/нс в коронном разряде с отрицательно заряженного острия могут последовательно формироваться два разнонаправленных стримера. При этом формирование первого (катодонаправленного) стримера приводит к появлению субнаносекундного выброса тока положительной полярности, а последующее более медленное продвижение границы плазменной области к аноду (анодонаправленный стример) характеризуется отрицательным выбросом тока. Появление коротких импульсов тока может обогащать спектр электромагнитных излучений короны в СВЧ-диапазоне вплоть до сотни ГГц, что может иметь большое значение в практике использования таких разрядов.

Литература

1. Тарасенко В., Бакшт Е., Виноградов Н. Козырев А., Коковин А., Кожевников В. О механизме генерации импульсов Тричела в воздухе атмосферного давления // Письма в ЖЭТФ. − 2022. − Т. 115 (11) − С. 710-716. DOI: 10.31857/S1234567822110064.
2. Козырев А. В., Коковин А. О., Кожевников В. Ю., Тарасенко В. Ф. Смена механизма формирования коронного разряда в атмосферном воздухе при отрицательном острие // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. – № 10 (779). – С. 138-140. DOI: 10.17223/00213411/65/10/138.

Лаборатория оптических излучений
Панченко Алексей Николаевич, с.н.с., д.ф.-м.н.; Тарасенко Виктор Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Кожевников Владислав Викторович, инженер, аспирант

ВУФ F_2 и водородный лазеры

Впервые получена генерация в ВУФ области спектра на полосе Лаймана ($\Delta\lambda$ = 148–161 нм) молекул водорода H_2 при накачке диффузным разрядом (первый разрядный H_2 лазер запущен в 1970). Определены активные газовые смеси, для которых в режиме диффузного разряда достигается увеличение длительности импульса и энергии излучения водородного лазера.

Показано, что при накачке смесей водорода с гелием высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, реализуется четырехуровневый режим работы H_2 лазера, и за счет эффективной разгрузки нижнего лазерного уровня получено двухкратное увеличение длительности лазерного импульса. Измеренная в эксперименте длительность лазерного импульса составляет до 10 нс. При этом по данным научной литературы длительность импульса генерации H_2 лазера при накачке самостоятельным разрядом не превышает 1–2 нс.

В смесях водорода с неоном за счет передачи энергии с метастабильных атомов неона получено увеличение энергии и мощности генерации на полосе Лаймана.

При диффузном разряде в смеси гелия и фтора при давлении 10 атм получен КПД генерации F_2 – лазера на длине волны 157 нм 0,18%, который превышает КПД известных лазеров данного типа, накачиваемых объемным разрядам с предыонизацией от дополнительного источника. Полученные результаты могут быть использованы при разработке мощных эффективных электроразрядных лазеров ВУФ диапазона.

Литература

1. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Кожевников В.В. ВУФ генерация в водороде и фторе в диффузных разрядах, формируемых убегающими электронами // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – № 9. – С. 783–788. https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=18104&option_lang=rus

Тарасенко Виктор Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Виноградов Никита Петрович, инженер, аспирант; Бакшт Евгений Хаимович, с.н.с., к.т.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Свойства лабораторных аналогов трубчатых красных спрайтов

Разработаны установки, которые позволяют при низких давлениях атмосферного воздуха формировать как одну, так и две диффузные волны ионизации, распространяющиеся в противоположных направлениях, измерить скорости их распространения, спектры излучения и другие параметры. Проведённые исследования показали, что при давлениях воздуха и азота (0,04–3 Торр), создавая плазму импульсно-периодического барьерного разряда с различными конструкциями электродов, можно формировать плазменные диффузные струи (ПДС) – цилиндрические стримеры, с формой близкой к форме спрайтов «столбчатого» типа.

При этом в широком диапазоне давлений и напряжений цилиндрические стримеры имеют красный цвет, который обусловлен излучением 1+ системы азота. Однако плотности энергии излучения второй положительной системы азота, а при высоком электрическом поле и первой отрицательной, на порядок и более превышают плотность энергии излучения первой положительной системы. Установлено, что длина стримеров при напряжении генератора 7 кВ и давлении воздуха 0,4 Торр и менее, может превышать 1 м. Показано, что на цвет стримеров влияет величина приведённой напряженности электрического поля E/p. При высоких значениях E/p цвет разряда изменяется, и становится голубым вблизи электродов, а также в конце (ПДС). Голубой цвет определяется излучением 1- и 2+ систем молекулярного иона и молекулы азота, соответственно. При малых давлениях 0,04 Торр и ниже ПДС в воздухе имеют белый цвет. Белым цвет стримеров становится при низких давлениях воздуха за счёт увеличения E/p и диссоциации частиц воздуха, в том числе примеси паров воды. За счет молекулярных и атомарных переходов новых нейтральных частиц и ионов появляется широкополосное излучение в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

Литература

1. V. Tarasenko, N. Vinogradov, E. Baksht, D. Sorokin. Experimental Simulation of Red Sprites in a Laboratory // J. of Atmospheric Science Research. – 2022. – Vol. 05. – Iss. 03. – P. 26–36. DOI: 10.30564/jasr.v5i3.4858
2. Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П., Тарасенко В.Ф. Формирование стримеров в неоднородном электрическом поле при низких давлениях воздуха. // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 9. – С. 777–781. DOI: 10.15372/AOO20220911
3. D. Sorokin, V. Tarasenko, E.Kh. Baksht, N.P. Vinogradov. Ionization Waves, Propagating in Opposite Directions, as in Red Sprites // European Journal of Environment and Earth Sciences. – 2022. – Vol. 3. – Iss. 6. – P. 42–48. DOI: 10.24018/ejgeo.2022.3.6.322

Панарин Виктор Александрович, н.с., д.ф.-м.н.; Скакун Виктор Семенович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Бакшт Евгений Хаимович, с.н.с., к.т.н.; Соснин Эдуард Анатольевич, в.н.с., д.ф.-м.н.; Кузнецов Владимир Сергеевич, м.н.с., к.ф.-м.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Тонкая структура головки стримера

В условиях экспериментов по зажиганию апокампического разряда в воздухе при давлениях 30–150 Торр было обнаружено, что головка стримера, распространяющегося в открытое пространство и обеспечивающего формирование плазменного шлейфа, состоит из двух светящихся областей, которые были названы – основной волной и её предвестником.

Излучение предвестника обусловлено, преимущественно, спектральными переходами 1- полосы молекулярного иона азота N_2^+ и значительно менее интенсивно,

чем излучение основной волны, обеспечиваемым преимущественно переходами 2^+ полосу молекулярного азота N_2, а также 1- полосы молекулярного иона азота N_2^+. Поскольку эксперименты проводились при умеренных давлениях воздуха, это обстоятельство объясняет, почему ранее это свечение не наблюдалось.

Предложено объяснение полученной пространственной структуры головки стримера, заключающееся в том, что наличие двух светящихся фронтов может быть связано с различиями в величинах сечений фотоионизации для ионов и нейтральных атомов, а также различиями в концентрации частиц по оси движения стримера.

Обнаружение тонкой пространственной структуры головки стримера может оказаться полезным для лучшего понимания механизмов распространения волн ионизации в плазме по крайней мере для тех случаев, когда распространение происходит при умеренных давлениях воздуха. В частности, полученные данные можно использовать для построения проверочных теоретических моделей катодонаправленных стримеров.

Впоследствии планируется проверить наличие сопутствующей волны в анодонаправленных стримерах и получить детальные данные о влиянии условий формирования стримера на форму и дистанцию между главной плазменной пулей и сопутствующей волной.

Литература

1. Панарин В.А., Скакун В.С., Бакшт Е.Х., Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Сорокин Д.А. Обнаружение тонкой структуры плазменных пуль положительных стримеров // Физика плазмы. – 2022. – Т. 7. – № 7. – С. 664–670. DOI: 10.31857/S0367292122100158
2. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Бакшт Е.Х., Кузнецов В.С., Сорокин Д.А. Динамика управляемого стримерного разряда при умеренных давлениях воздуха // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. – №7. – С. 119–126. DOI: 10.17223/00213411/65/7/119

Лаборатория плазменных источников
***Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук**
Юшков Георгий Юрьевич, г.н.с., д.т.н.;
***Водопьянов Александр Валентинович, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.**
Николаев Алексей Геннадьевич, с.н.с., к.т.н.

Измерение функции распределения электронов по энергиям в импульсном вакуумном дуговом разряде многоэлектродным энергоанализатором

Измерение функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в плазме вакуумной дуги зондовыми методиками затруднено из-за нестабильности эмиссионных процессов вследствие взрывной природы катодного пятна. Для решения этой проблемы был создан многоэлектродный энергоанализатор плазмы вакуумной дуги. Калибровка энергоанализатора была проведена с помощью электронной пушки с пирсовской геометрией электронов и термокатодом косвенного накала из гексаборида лантана, генерирующей слаборасходящийся низкоэнергетичный электронный пучок. Было показано, что разрешающая способность энергоанализатора составляет $\leq \pm 2$ эВ, что достаточно для измерения ФРЭЭ плазмы дуги. На примере вакуумного дугового разряда с медным катодом и длительностью импульса 250 мкс с амплитудой 1 кА, были измерены ФРЭЭ плазмы. Показано, что ФРЭЭ плазмы вакуумного дугового разряда существенно отличаются от максвелловского распределения как в случае наложения на плазму магнитного поля, так и без него и более близки к распределению Дрювестейна. В случае наложения магнитного поля наблюдается "расширение" распределения в область больших энергий в течение импульса вакуумно-дугового разряда. Это может быть связано с осевой фокусировкой потока плазмы вакуумно-дугового разряда, реализуемой как в случае сходящейся конфигурации магнитного поля, так и расходящейся, а также для их

комбинаций. Показано, что энергетические параметры полученных ФРЭЭ приблизительно в два раза выше, чем общепринятые, основанные на практике аппроксимации распределением Максвелла, что может приводить к заниженным значениям энергии электронов плазмы при определении её в эксперименте и теоретических расчетах.

Лаборатория плазменных источников
***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники**
Юшков Георгий Юрьевич, г.н.с., д.т.н.; *Тюньков Андрей Владимирович, с.н.с., доцент, к.т.н.; Окс Ефим Михайлович, зав. лабораторией, д.т.н.; *Юшков Юрий Георгиевич, зав. лабораторией, доцент, д.т.н.

Конденсационный зонд для измерения ионного и атомного компонентов в процессе формирования покрытия плазменными методами

Предложен и реализован экспериментальный метод определения соотношения ионного и атомного компонентов в процессе формирования покрытия в плазме разрядов низкого давления. Метод основан на сравнительном анализе приращения веса подложек оригинальных конденсационных зондов с поперечным магнитным полем, препятствующим проникновению потока плазмы в область подложки и без него. В первом случае покрытие формируется за счет атомарного компонента, а во втором за счет атомарного и ионного. На примере нанесения покрытий бора магнетронным напылением и электронно-лучевым испарением проведено измерение каждого из компонентов. В результате показано, что при электронно-лучевом испарении определяющий вклад в формирование покрытия вносит ионная составляющая, а при магнетронном распылении - атомная. На основании оценки каждого из этих вкладов определено отношение концентрации атомарного и ионизованного компонентов бора в плазме электронного пучка и в плазме магнетронного разряда. Разработанное оригинальное устройство перспективно для исследований процессов формирования покрытий другими плазменными методами, например вакуумно-дуговым или распылением ионным пучком.

Литература

1. A.V. Tyunkov, A.A. Andronov, E.M. Oks, Yu.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin. Determination of the degree of ionization of vapors of conducting an d dielectric materials during electron - beam evaporation in the forevacuum range of pressure // Vacuum, 2022, 208(6):111722. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111722

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

Планарная магнетронная распылительная система с вакуумно-дуговым инжектором электронов

Разработана и исследована магнетронная разрядная система с эмиттером на основе вакуумного дугового разряда. Переход к безгазовому разряду в эмиттере электронов позволил осуществить дальнейшее снижение предельного рабочего давления планарного магнетрона, а также устранить нежелательный эффект ионизации рабочего газа в области выходной апертуры мишени магнетрона. Комплексное использование вакуумно-дугового эмиттера электронов и специального отражающего электрода, расположенного за выходной апертурой в мишени магнетрона на пути инжектированных электронов, позволило обеспечить режим с высокой долей ионов материала мишени (более 50 %) в области низкого давления, где самостоятельная форма магнетронного разряда

характеризуется высокой долей ионов рабочего газа, либо не реализуется в сильноточной форме.

Достижение предельно низких значений рабочего давления с высокой степенью ионизации материала мишени достигается при условии стабилизации тока магнетронного разряда на заданной величине при условии дополнительной инжекции в разряд пучка электронов с током величиной 0,2-0,5 от тока магнетронного разряда. Одновременное снижение парциальной доли атомов рабочего газа и рост напряжения горения магнетронного разряда при снижении рабочего давления обеспечивают, увеличение энергии инжектируемых электронов и реализацию условий перехода магнетронного разряда в режим самораспыления. Снижение рабочего давления обеспечивает увеличение скорости осаждения покрытий и кратное увеличение ионной составляющей в потоке частиц на подложку.

Устройство предназначено для осаждения металлических покрытий методом ионного распыления в области предельно низкого рабочего давления (менее 0,1 Па).

Лаборатория низкотемпературной плазмы
Ландль Николай Владимирович, зав. лабораторией, в.н.с., к.ф.-м.н.; Королев Юрий Дмитриевич, г.н.с., д.ф.-м.н.; Нехорошев Виталий Олегович, м.н.с.; Франц Олег Борисович, н.с.

Генерация оксидов азота в положительном столбе тлеющего разряда в потоке газа

Получены экспериментальные данные по режимам поддержания разряда в потоке воздуха для системы электродов типа коаксиального плазмотрона и скользящей дуги. Показано, что в широком диапазоне токов разряда электрические поля для скользящего тлеющего разряда и для разряда в плазмотроне практически одинаковы с разницей не более 10% и составляют (0,5 – 1) кВ/см при токе разряда (200 – 50) мА. В обоих случаях продольное электрическое поле в положительном столбе разряда уменьшается с ростом тока.

Показано, что в обоих случаях имеет место один и тот же тип разряда, то есть нормальный тлеющий разряд, на который накладываются спонтанные переходы в искру. В указанном диапазоне токов положительный столб разряда поддерживается в контрагированном режиме, с характерным диаметром около 0,4 мм. При этом плотность тока в столбе изменяется от 47 до 120 А/см^2, а плотность электронов в плазме положительного столба и температура газа - от $0{,}53\cdot10^{14}$ до $2{,}3\cdot10^{14}$ см$^{-3}$ и от 3000 до 3610 К, соответственно. Показано, что приведенное электрическое поле, необходимое для поддержания процессов ионизации в столбе, относительно невелико и уменьшается с ростом плотности тока от 13,5 до 7,8 В/см·Торр.

Получены данные по концентрации оксидов азота на выходе из сопла плазмотрона. Показано, что с увеличением мощности, рассеиваемой в разряде, концентрация оксидов азота увеличивается, а с увеличением расхода газа через плазмотрон уменьшается. Молекулы оксида азота генерируются в плазменном столбе, и скорость генерации уравновешивается скоростью потерь этих частиц. Лишь небольшая часть генерируемых молекул покидает столб плазмы под действием потока газа и оказывается на выходе из плазмотрона. Проведены оценки энергетических затрат на образование одной молекулы NO. Показано, что для рассматриваемых условий энергетические затраты составляют (30–50) эВ. Основной канал образования оксида азота связан с реакцией взаимодействия колебательно-возбужденного азота с атомарным кислородом. Получено максимальное содержание молекул монооксида азота [NO] = 4 г/м^3 (3500 ppm).

Литература

1. N.V. Landl, Y.D. Korolev, V.O. Nekhoroshev, O.B. Frants, G.A. Argunov, V.S. Kasyanov. Production of nitrogen oxides in a positive column of a glowtype discharge in air flow //

Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 42, p. 1187–1200, 2022. DOI: 10.1007/s11090-022-10262-2

Ландль Николай Владимирович, зав. лабораторией, в.н.с., к.ф.-м.н.

Формы импульсного разряда на начальных стадиях пробоя в водно-солевых растворах

Исследованы начальные стадии импульсного разряда в воде с добавками NaCl (90 г на литр дистиллированной воды) в окрестности так называемого порогового напряжения, которое достаточно для инициирования разряда в тонком паровом слое, формируемом на поверхности активного острийного электрода при кипении раствора. Типичный уровень порогового напряжения составляет около 1 кВ.

Показано, что при отрицательной полярности импульса напряжения, когда поверхность активного электрода является катодом, в слое пара возникает тлеющий разряд со случайными переходами к искре. При положительной полярности, когда катодом является поверхность жидкости, переход к искровому разряду затрудняется и разряд горит в форме тлеющего.

Показано, что в отличие от общепринятых представлений, полная экранировка поверхности электрода слоем пара не является обязательным условием для инициирования разряда. Разряд может возникать также и в случае, когда только часть поверхности активного электрода покрыта паровым слоем.

Литература

1. Y.D. Korolev, I.A. Shemyakin, V.S. Kasyanov, V.G. Geyman, N.V. Landl, A.V. Bolotov. Transient processes during an initial stage of breakdown in saline solution // J. Appl. Phys., vol. 129, no. 4, P. 043304, 2021. https://doi.org/10.1134%2FS0018151X19020202.
2. Y.D. Korolev, N.V. Landl, A.V. Bolotov, V.S, Kasyanov, V.O. Nekhoroshev, I.A. Shemyakin. Initial stages of pulsed discharge in saline solutions in a vicinity of threshold voltages // Plasma Sources Sci. Technol., vol. 31, no. 11, P. 115013, 2022. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/552/1/012005.

Лаборатория пучково-плазменной инженерии поверхности, лаборатория плазменной эмиссионной электроники

Денисов Владимир Викторович, зав. лабораторией, к.т.н.; Островерхов Евгений Владимирович, м.н.с.; Ковальский Сергей Сергеевич, м.н.с.; Яковлев Владислав Викторович, н.с.; Егоров Артем Олегович, инженер, аспирант; Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.

Влияние кулоновских взаимодействий на распределение концентрации низкотемпературной плазмы, генерируемой в полом катоде сильноточного несамостоятельного разряда низкого давления

Установлено, что в системах генерации газовых объемно-однородных пучково-плазменных образований с концентрацией $(1\div9)\cdot10^{17}$ м$^{-3}$, генерируемых при напряжениях горения (50÷500) В сильноточным (50÷1000 А) несамостоятельным тлеющим разрядом низкого (около 0,5 Па) давления с полым катодом большого (>0,1 м^3) объема, поддерживаемого внешней инжекцией электронов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, из двух и более источников электронов для прогнозирования распределения концентрации плазмы в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда при совместной работе источников электронов путем алгебраического сложения распределений концентрации плазмы, полученных при раздельной работе таких источников электронов, следует учитывать влияние кулоновских взаимодействий на характер движения заряженных частиц и соответственно синтез плазмы. Оценками подтверждается, что при таких условиях частота кулоновских взаимодействий становится

соизмерима или равна с частотой газокинетических столкновений, и плазма по своим свойствам приближается к состоянию кулоновской плазмы. Экспериментальные исследования подтвердили, что с увеличением концентрации плазмы наблюдается снижение степени её неоднородности, тогда как результаты алгебраического сложения распределений концентрации плазмы этого не показывают.

Результат важен для прогнозирования распределений концентрации пучково-плазменных образований в полых катодах большого объема, генерируемых в несамостоятельном тлеющем разряде с целью их дальнейшего проектирования и использования для технологии инженерии поверхности.

Литература

1. Е.В. Островерхов, В.В. Денисов, С.С. Ковальский. Генерация плазмы в сильноточном тлеющем разряде с полым цилиндрическим катодом с использованием двух источников электронов // Известия Вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. – №.11. – с. 116-938. DOI: 10.17223/00213411/65/11/116

Денисов Владимир Викторович, зав. лабораторией, к.т.н.; Денисова Юлия Александровна, с.н.с., к.ф.-м.н.; Ковальский Сергей Сергеевич, м.н.с.; Леонов Андрей Андреевич, м.н.с.; Островерхов Евгений Владимирович, м.н.с.; Савчук Михаил Викторович, м.н.с., аспирант; Тищенко Василий Николаевич, инженер; Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.

Импульсно-периодический режим генерации пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления для однородной обработки поверхности деталей сложной формы

Установлено, что использование импульсно-периодического режима генерации газового пучково-плазменного образования с плавно- изменяемой шириной прикатодного падения потенциала от долей миллиметров, характерной для относительно высоких значений концентрации заряженных частиц ($\approx 10^{17}$ м$^{-3}$), до единиц сантиметров, характерных для относительно низких значений концентрации плазмы ($\approx 10^{15}$ м$^{-3}$), позволяет в разы улучшить однородность плотности ионного тока на выступающих участках и впадинах поверхности обрабатываемых деталей со сложной геометрией и формировать более однородный по толщине, не хуже 10 %, азотированный слой на материалах, для которых требуется ионное травление поверхности в процессе обработки, что позволяет улучшать качество и расширить номенклатуру упрочняемых материалов и изделий.

Литература

1. В.В. Денисов, Ю.А. Денисова, Е.В. Островерхов, А.В. Леканов, А.А. Леонов, Н.Н. Коваль, Р.А.Садриев, В.Н. Тищенко, Е.А. Улыбушев, Д.А. Черепанов. Особенности азотирования поверхности мелкомодульного зубчатого венца в импульсно-периодическом газовом пучково-плазменном образовании при низком давлении // Известия Вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. – №.11. – с. 38-42. DOI: 10.17223/00213411/65/11/38

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.; Толкачев Олег Сергеевич, м.н.с.

Многоэлементные наноструктурированные нитридные покрытия квазиэквиатомного состава, сформированные ионно-плазменным методом

Сформированы многоэлементные наноструктурированные нитридные покрытия квазиэквиатомного состава (NbMoCrTiAl)N из многокомпонентной газо-металлической плазмы, созданной одновременным независимым вакуумно-дуговым испарением катодов выбранных элементов в режиме с плазменным ассистированием в среде азота. Установлено, что сформированные покрытия являются однофазными материалами, имеющими гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку с параметром a = 0,40540 нм. Полученные нитридные покрытия имеют нанокристаллическую многослойную структуру. Твердость покрытий в первую очередь зависит от концентрации химических элементов в покрытии и давления азота и достигает 43 ГПа. Покрытия перспективны для использования в промышленности.

Литература

1. Ю.Ф. Иванов, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль, В.В. Шугуров, Е.А. Петрикова, О.В. Крысина, Н.А. Прокопенко, О.С. Толкачев. Многоэлементные нитридные покрытия квазиэквиатомного состава, сформированные ионно-плазменным методом // Известия ВУЗов. Физика. – 2022. – Т.65. – №11. – С. 59-64. DOI: 10.17223/00213411/65/11/59

Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Воробьёв Максим Сергеевич, с.н.с., д.т.н.; Сулакшин Степан Александрович, ведущий инженер; Дорошкевич Сергей Юрьевич, м.н.с., аспирант

Управление энергетическим спектром электронного пучка, выведенного в атмосферу, в широкоапертурном ускорителе электронов с сеточным плазменным катодом

В ускорителе электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и выводом пучка в атмосферу через фольгу, реализовано управление энергетическим спектром пучка в атмосфере за счет изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка субмиллисекундной длительности. При этом обеспечивается возможность компенсации потерь электронного пучка в фольге за счет динамического изменения амплитуды тока разряда и, соответственно, амплитуды тока в ускоряющем промежутке при энергии электронов E не ниже минимальной пороговой величины $E_{пор}$, определяемой материалом и толщиной фольги, и полного выключения тока пучка при $E<E_{пор}$, что снижает ударную тепловую нагрузку на фольгу и предотвращает ее разрушение. Прежде всего, возможность управления шириной энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, может быть востребована при решении радиационных задач, когда длина пробега электронов в веществе соизмерима с глубиной воздействия на материал (сотни микрометров в веществе в твердой или жидкой фазе и единицы-десятки сантиметров в газе в зависимости от плотности вещества). Примером может служить радиационная обработка полимерных материалов, газов или других органических материалов. В этом случае энергетический спектр электронного пучка является одним из основных параметров, поскольку именно спектр будет определять как качество обработки таких материалов или газов, так и производительность процесса обработки.

Литература

1. Дорошкевич С.Ю., Воробьёв М.С., Торба М.С., Артёмов К.П., Леванисов В.А., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А. Генерация и применение электронных пучков большого сечения в ускорителях с плазменными эмиттерами и выводом пучка в атмосферу. Материалы XII Всероссийской конференции Физическая Электроника-2022, 19–22 октября 2022 г., г. Махачкала, с. 62-67.
2. Д. Ю. Петухов, М. С. Воробьев, С. Ю. Дорошкевич, М. С. Торба, Н. Н. Терещенко, Е. С. Кашеутова. Предпосевная обработка семян на импульсном широкоапертурном ускорителе электронов с плазменным катодом. Материалы XII Международной

конференции «Химия нефти и газа», 26–30 сентября 2022 года, Томск, Россия, с. 327-328.
3. С. Ю. Дорошкевич, М. С. Воробьев, М. С. Торба, В. А. Леванисов, Н. Н. Коваль, С. А. Сулакшин. Низкоэнергетические ускорители электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу для обработки органических материалов. Материалы XII Международной конференции «Химия нефти и газа», 26–30 сентября 2022 года, Томск, Россия, с. 315-316.

Лопатин Илья Викторович, с.н.с., к.т.н.; Петров Александр Евгеньевич, инженер

Система бессеточного формирования ионного пучка с независимыми генераторами плазмы для получения покрытий на основе алюминия

Разработана и создана электродная система для бессеточного формирования ионного пучка на основе двойного электростатического слоя с двумя независимыми генераторами плазмы газовых разрядов с накаленным катодом. Показано, что основные параметры работы системы, такие как ток, напряжение горения основного и вспомогательного разрядов могут изменятся независимо, а напряжение на ускоряющем промежутке и ток в нем оказывают существенное влияние на основные параметры горения обоих разрядов. Система включает два генератора плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда с накаленным катодом, обеспечивающих генерацию плазмы основного и вспомогательного разрядов. Вспомогательный разряд поддерживался стандартным плазмогенератором «ПИНК» с диафрагмированным полым катодом, анодом вспомогательного разряда является электрически изолированный фланец вакуумной камеры. Система генерации основного разряда представляет собой плазменный источник с накаленным и полым катодами, отделенный от плазмы вспомогательного разряда тепловым экраном с диафрагмой ∅20 мм.

Созданная система позволяет генерировать газометаллическую плазму с широким диапазоном изменения параметров, что перспективно для разработки новых технологических процессов создания функциональных слоёв и покрытий на основе оксидов, нитридов, карбидов металлов и сплавов.

Литература

1. И. Лопатин, Ю. Ахмадеев, А. Петров Бессеточная система генерации низкоэнергитического ионного пучка на основе тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022), pp.791-796. DOI: 10.56761/EFRE2022.C1-P-022503

Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Ажажа Иван Иванович, м.н.с., аспирант; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.

Ионно-плазменный метод получения износостойкого покрытия на основе «скользкой керамики» $AlMgB_{14}$

Для получения покрытий на основе $AlMgB_{14}$ впервые был применён оригинальный метод осаждения покрытий в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления с накалённым и полым катодом («ПИНК») и теплоизолированным анодом-тиглем. В качестве материала покрытия использовался порошок «скользкой керамики» - БАМ, вещества состава $AlMgB_{14}$ имеющего один из самых низких из известных коэффициентов сухого трения, достигающего 0,02 и являющимся перспективным для получения износостойких и антифрикционных покрытий, работающих при высоких температурах в экстремальных условиях окружающей среды. Классические покрытия из такого материала получают с помощью высокочастотного магнетронного осаждения. При

этом скорость осаждения находится, как правило, в диапазоне 300-500 нм в час, толщина покрытий не превышает 1 мкм и скорость объёмного износа полученного покрытия составляет $(1\text{-}5)\cdot 10^{-5}$ мм^3/Н • м

В результате использования предложенной электродной системы и оптимизации режима осаждения покрытий были получены плёнки БАМ толщиной 3,6 мкм и скоростью осаждения 2,5 мкм/час. Скорость объёмного износа пленки составила $3\cdot 10^{-7}$ мм^3/Н • м, что характерно для нитридных износостойких покрытий и на 2 порядка превосходит износостойкость плёнок БАМ, полученных традиционными методами.

Литература

1. И.И. Ажажа, В.В. Шугуров Система плазменно-ассистированного ВЧ-нанесения покрытий из порошковых диэлектрических материалов // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022), pp. 685-689. DOI: 10.56761/EFRE2022.C1-O-025401

Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.; Тересов Антон Дмитриевич, н.с.; Крысина Ольга Васильевна, с.н.с., к.т.н.; Прокопенко Никита Андреевич, м.н.с.; Ажажа Иван Иванович, м.н.с., аспирант; Толкачев Олег Сергеевич, м.н.с.; Петюкевич Мария Станиславовна, м.н.с.

Разработка электронно-ионно-плазменного метода формирования борсодержащих слоев

Установлены закономерности, выявленные при исследовании образцов высокоэнтропийного сплава (ВЭС) нестехиометрического состава (33,4Al; 8,3Cr; 17,1Fe; 5,4Co; 35,7Ni, ат. %), модифицированных комплексным методом, сочетающим формирование системы «пленка (Cr+B)/(ВЭС) подложка» и последующее облучение импульсным электронным пучком. Выявлено формирование многофазного, нанокристаллического состояния, поверхностный слой которого является аморфным и содержит кристаллические частицы твердого раствора на основе хрома размерами десятки-сотни нанометров и боридов хрома и никеля размерами единицы нанометров. Показано, что микротвердость (8,9 ГПа) модифицированного ВЭС превышает микротвердость исходного ВЭС в 1,9 раза, износостойкость - в 5,4 раза. Созданные износостойкие слои перспективны для использования в передовых отраслях промышленности.

Литература

1. Yu. Ivanov, V. Gromov, S. Konovalov, V. Shugurov, M. Efimov, A. Teresov, E. Petrikova, I. Panchenko, Yu. Shliarova. Structure and Properties of Al-Co-Cr-Fe-Ni High-Entropy Alloy Subjected to Electron–Ion Plasma Treatment // Metals, 2022, 12, 1987. https://doi.org/10.3390/met12111987.

Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с. Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.; Тересов Антон Дмитриевич, н.с.; Крысина Ольга Васильевна, с.н.с., к.т.н.; Прокопенко Никита Андреевич, м.н.с.; Рыгина Мария Евгеньевна м.н.с.; Толкачев Олег Сергеевич, м.н.с., Петюкевич Мария Станиславовна, м.н.с.

Электронно-ионно-плазменный метод формирования высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе

Установлено, что покрытие на основе нитридов элементов высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), сформированное на металлической подложке из многоэлементной газо-металлической плазмы, является многослойной системой, не имеющей столбчатой структуры. Покрытие синтезировалось методом вакуумно-дугового осаждения с

плазменным ассистированием при испарении катодов, содержащих Ti, Al, Cu, Zr, Nb. Показано, что формируемые нитридные покрытия имеют неэквиатомный состав (9,6Al-21,7Ti-8,5Cu-36,9Zr-23,3Nb, ат.%) при концентрации азота (41-43) ат.%. Покрытие нитрида ВЭС имеет аморфно-кристаллическую структуру. Кристаллическая составляющая покрытия представлена фазой состава $(NbZrTiAl)_{0.88}N$, имеющей гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку с параметром а = 0,44288 нм. Толщина слоев покрытия 47,5 нм, размер кристаллитов, формирующих слои, (2-4) нм. Установлено, что среднее значение твердости покрытия составило H = 50,0 ГПа, модуль упругости 806 ГПа, нормированная твердость H/E = 0,062, что соответствует металлическим материалам, имеющим нанокристаллическую структуру. Синтезированное наноструктурированное покрытие, обладающее сверхтвердостью, перспективно для использования в промышленности.

Литература

1. Yu. Ivanov, V. Shugurov, E. Petrikova, N. Prokopenko, O. Krysina, O. Tolkachev, V. Uglov, N. Cherenda. Structure and properties of high-entropy polymetallic films synthesized by ion-plasma method // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2509. P. 020089. http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0085246

Лаборатория газовых лазеров
Панченко Юрий Николаевич, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.; Пучикин Алексей Владимирович, н.с.; Ямпольская Софья Александровна, н.с., к.ф.-м.н.; Ястремский Аркадий Григорьевич, с.н.с., д.ф.-м.н.

Формирование излучения в коротковолновой области контура усиления KrF лазера

Впервые экспериментально продемонстрировано, что на границе контура усиления активной среды, измеренный коэффициент усиления составляет 0,053 $см^{-1}$ для излучения на длине волны 246,8 нм и сравним с максимальным значением данного контура усиления B–X перехода (248,3 нм) молекулы KrF. На основе разработанной численной модели электроразрядного KrF усилителя с удельной мощностью накачки ~10 $МВт/см^3$ было показано, что достижение усиления в этой спектральной области обусловлено высокой скоростью рождения эксимерных молекул по сравнению со скоростью релаксации населенности с верхних колебательных уровней. Полученные численные результаты показывают возможность расширения коротковолновой спектральной области перестройки KrF лазера более чем в 5 раз относительно общепринятой, за счет снятия инверсной населенности с верхних колебательных состояний.

Литература

1. С.А. Ямпольская, А.Г. Ястремский, Ю.Н. Панченко, А.В. Пучикин. Усиление лазерного излучения на краю спектральной линии KrF (B – X) // Квантовая электроника, 52:5 (2022), С. 437–442. https://doi.org/10.1070/QEL18039

Монографии

1. Е.В. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман. Упрочнение стальных деталей плазмохимической обработкой: справочное пособие. Инфа-Инженерия, Москва, Вологда, 2021, 468 с. ISBN 978-5-9729-0639-0 https://avidreaders.ru/book/uprochnenie-stalnyh-detaley-plazmohimicheskoy-obrabotkoy.html?ysclid=lc5q3mbpdl938572709
2. М.О. Ефимов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко. Материалы XXI века: высокоэнтропийные сплавы. Новокузнецк, Изд-во Полиграфист, 2022, 225 с. ISBN 978-5-91797-316-6. https://elibrary.ru/item.asp?id=49564701&ysclid=lc5pvbpx6z793332777
3. В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, К.А. Осинцев, Ю.А. Шлярова, А.П. Семин. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов. Новокузнецк, Изд. центр

СибГИУ, 2022 – 230 с. ISBN 978-5-7806-0590-4
https://library.sibsiu.ru/LibrMonografSectionsEditionsFiles.asp?lngSection=16&lngEdition=103&ysclid=lc5pz5t238164646826

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

125047, Москва, Миусская пл., д.4
Отдел № 15
Шпатаковская Галина Васильевна, в.н.с., д.ф.-м.н.

Использование закона подобия по атомному номеру в энергиях связи электронов в Закон подобия по атомному номеру в отдельных электронных оболочках во всех естественных элементах

Экспериментальные данные по электронным энергиям связи в отдельных *K, L, M, N, O, P* оболочках для всех атомов от водорода до урана проанализированы в специальных приведенных координатах [1]. В каждой подоболочке обнаружен закон подобия по атомному номеру, который выражается через две монотонные функции. Нарушение монотонности указывает на ошибки измерения, а изменение наклона свидетельствует о заполнении под-оболочки. Полиномиальная аппроксимация этих функций позволяет восстанавливать
отсутствующие или ошибочные данные с точностью 1–2%.

Закономерности в потенциалах ионизации многозарядных ионов

Проанализирована зависимость потенциалов ионизации от атомного номера Z и числа электронов N_e в многозарядных ионах элементов с атомными номерами в диапазоне $18 \leq Z \leq 54$. Обнаруженные закономерности с погрешностью менее одного процента описываются простыми полиномами на основе нескольких небольших таблиц полиномиальных коэффициентов, что позволяет с хорошей точностью оценивать потенциалы ионизации всех
многозарядных ионов рассмотренного диапазона.

Литература

1. G.V.Shpatakovskaya. Atomic number similarity law in individual electronic shells of all natural elements // Keldysh Institute Preprints. 2022. № 69. https://doi.org/10.20948/prepr-2022-69-e
2. Г.В.Шпатаковская. Аналитическая оценка потенциалов ионизации многозарядных ионов элементов от аргона до ксенона. ЖЭТФ, 2022, **162**, вып.2(8), 205-214. DOI: 10.31857/S0044451022080053

ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения РАН (ИЭФ УрО РАН)

Н.В. Гаврилов*, А.С. Каменецких, П.В. Третников, Д.Р. Емлин, А.А. Ершов

Высокоскоростной синтез пленочного твердого электролита на основе фосфор-оксинитрида лития и испытания микросуперконденсатора на его основ

Изготовлен и испытан образец полностью твердотельного микросуперконденсатора (МСК) на основе тонкой пленки фосфор-оксинитрида лития (LiPON), полученной оригинальным методом термического испарения ортофосфата

лития и конденсации паров в азотной плазме. Удельная емкость МСК с электродами из нержавеющей стали составила ~ 50 мкФ/см^2 при скорости развертки потенциала 1 В/с в диапазоне значений потенциала 0 - 4 В. Характер циклической вольтамперограммы МСК свидетельствует о наличии псевдоемкости, обусловленной процессами на электродах. МСК стабильно функционирует в режиме многоциклового заряд-разряда (1x10^3 импульсов) в диапазоне напряжений 0 - 4 В при скорости развертки потенциала 1 В/с.

Метод термического испарения ортофосфата лития обеспечил формирование пленок LiPON, обладающих однородной структурой и ионной проводимостью (1-2) микроСименс/см со скоростью ~0,5 мкм/ч. Значения удельной емкости и циклической стойкости конденсаторной структуры на основе полученных пленок LiPON соответствуют показателям лучших мировых образцов. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания полностью твердотельных тонкопленочных суперконденсаторов для микроэлектроники.

Литература

1. N.V Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, P.V. Tretnikov, L.P. Sinelnikov, D.S. Butakov, V.N. Nikolkin, A.V. Chukin, A.V. Nikonov. Synthesis of lithium phosphorus oxynitride (LiPON) thin films by Li_3PO_4 anodic evaporation in nitrogen plasma of a low-pressure arc discharge. *Membranes*. 2022; 12(1):40

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.

Лазерные сверхинтенсивные источники ультрарелятивистских электронов, гамма-излучения и нейтронов для ядерной физики и приложений

С помощью полностью релятивистского трехмерного PIC кода проведено полномасштабное моделирование условий эксперимента с использованием петаваттного лазера. Продемонстрирована высокая эффективность преобразования лазерной энергии в энергию ультрарелятивистских электронов, ускоренных в процессе прямого лазерного ускорения, которые являются источником жесткого тормозного рентгеновского излучения при взаимодействии с конвертором из материала с большим зарядом ядра. Результаты моделирования пакетом GEANT4 спектра генерируемого гамма-излучения с учетом геометрии эксперимента подтвердили измеренное рекордное значение коэффициента конверсии энергии лазерного импульса в энергию гамма квантов (≈ 2%), которое на порядок превышает полученные до сих пор значения на установках петаваттного класса мощности.

Источник γ-излучения, с помощью которого можно стимулировать фотоядерный распад в области гигантского дипольного резонанса, позволяет создать интенсивный источник нейтронов с рекордной эффективностью преобразования лазерной энергии в нейтроны, ≈ 0.02% для реализованной геометрии эксперимента.

Полученные результаты открывают перспективы создания высокоэффективных источников гамма-излучения и нейтронов для ядерной физики и широкого круга приложений.

Литература

1. Günther M. M., Rosmej O. N., Tavana P., Gyrdymov M., Skobliakov A.; Kantsyrev A., Zähter S., Borisenko N. G., Pukhov A., Andreev N. E. Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense γ-ray and neutron sources for nuclear application and science. Nature Communications. 2022. Vol. 13, P. 170. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27694-7

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

Сечение фотоионизации первого возбужденного состояния лития-7

В работе проведены точные количественные измерения сечения фотоионизации лития-7, захваченного в магнитооптическую ловушку (МОЛ). Потери атомов в МОЛ, вызванные излучением маломощных светоизлучающих диодов были измерены в зависимости от интенсивности фотоионизирующего излучения. На основании этих измерений проведен расчет сечения фотоионизации возбужденного состояния $2P_{3/2}$ лития-7 для трех различных светодиодов. Сечение фотоионизации лития-7 из состояния $2P_{3/2}$ при облучении атомов диодами на длине волны 259, 280, 307 нм определены как (5,4 ± 0,4), (8,1 ± 0,8) и (9,5 ± 1,1) Мб соответственно. Точность наших измерений лучше, чем в предыдущих работах. Также проведены квазиклассические расчеты с учетом тонкой структуры первого возбужденного состояния лития. Наши экспериментальные значения хорошо согласуются с экспериментальными результатами, о которых сообщалось ранее, и согласуются с теоретическими данными.

Литература

1. Saakyan, S., D'yachkov, L., Klimov, S., Sautenkov, V., & Zelener, B. B. (2022). Photoionization cross section of first excited state of lithium. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 195, 106503. (Q1 WoS), https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106503

Лаборатория №1.5. - экстремальных энергетических воздействий
Иосилевский Игорь Львович, г.н.с., д.ф.-м.н.; **Мартынова Инна Александровна,** с.н.с., к.ф.-м.н.

Расчетно-теоретическое исследование эффектов нелинейного экранирования макроионов асимметричной комплексной плазме

В работе исследован эффект снижения «видимого» заряда макроионов Z^* в сравнении с его исходным зарядом Z в низкотемпературной комплексной (пылевой и коллоидной) плазме за счет эффекта нелинейного экранирования макроионов микроионами и показано, что это эффективное снижение зарядов макроионов существенно зависит от отношения заряда макроиона к температуре. Указанный эффект исследован как в известной модели «средней ячейки Вигнера – Зейтца», так и в более совершенной модификации данной модели - в т. наз. модели «корреляционной полости» с разделением макроионов на близко- и дальнодействующие и с включением участия макроионов наравне с микроионами в процессе взаимного экранирования друг-друга на далеких расстояниях (вне «корреляционной полости»). В соответствие с построенным формализмом вычислен эффект снижения корреляционной энергии кулоновского притяжения при включении эффектов нелинейного экранирования в приближении Пуассона – Больцмана внутри корреляционной полости, и использованием линеаризованного Дебаевского приближения для описания эффекта экранирования вне указанной полости.

Литература

1. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., Macroion effective charge in asymmetric complex plasmas, Contribution Plasma Physics, 2022, Vol. 62, issue 3**,** e202100151, DOI: 10.1002/ctpp. 202100151.
2. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., Interaction energy in the Poisson–Boltzmann plus hole approximation in asymmetric complex plasmas, Contribution Plasma Physics, 2022, Vol. 62, issue 9**,** e202200110, DOI:10.1002/ctpp.202200110.

Лаборатория №1.6. - теплофизических баз данных
Морозов Игорь Владимирович, с.н.с., зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Применение метода молекулярной динамики с волновыми пакетами для исследования динамических и релаксационных процессов

Разработанный ранее комбинированный метод молекулярной динамики с волновыми пакетами и теории функционала плотности (МДВП-ФП) применен для исследования динамических и релаксационных процессов в неидеальной плазме дейтерия и гелия. Метод МДВП-ФП основан на представлении электронов в виде гауссовских волновых пакетов с динамической шириной при использовании приближения Хартри для многоэлектронной волновой функции и расчете обменно-корреляционного взаимодействия на основе функционала электронной плотности. За отчетный период определены изоэнтропы ударно-сжатых дейтерия и гелия при давлениях до $2 \cdot 10^4$ ГПа. Результаты сопоставлены с экспериментальными данными и расчетами на основе квантовой молекулярной динамики и химической модели плазмы. С применением метода МДВП также получены новые данные о скорости электрон-ионной релаксации в водородной плазме с параметром неидеальности до 10. Результаты моделирования показали слабое влияния эффектов вырождения электронного газа на скорость электрон-ионной релаксации в отличие от полученных ранее результатов для проводимости неидеальной плазмы, где эти эффекты оказались существенны.

1. Lavrinenko Ya.S., Levashov P.R., Minakov D.V., Morozov I.V., Valuev I.A. Equilibrium properties of warm dense deuterium calculated by the wave packet molecular dynamics and density functional theory method // Phys. Rev. E. 2021. V. 104. P. 045304.
2. Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортов В.Е. и др. Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа // ЖЭТФ. 2021. Т. 160. № 5. С. 735-756.

Отдел №2. - электрофизических и плазменных технологий
Лаборатория №2.1. - электрофизических и плазменных устройств
Гавриков Андрей Владимирович, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Разработка технологии плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива

В качестве альтернативы существующим методам переработки отработавшего ядреного топлива (ОЯТ) продолжаются исследования по разработке новой технологии плазменной масс-сепарации ОЯТ, основанной на разделении плазменного потока, содержащего многокомпонентную смесь ионов ОЯТ, на две массовые группы - «тяжелых» и «легких» частиц в скрещенных электрическом и магнитных полях в присутствии буферной плазмы, компенсирующей объемный заряд. На текущем этапе работы аналитически исследованы траектории модельных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях и определены потенциально реализуемые в эксперименте распределения радиально-симметричных профилей электрического потенциала в плазменном сепараторе, приводящие к сепарации и сформулированы рекомендации конкретного распределения электрического поля в плазменном сепараторе для достижения максимального эффекта разделения. Исследовано пространственное распределение компонент высокочастотного магнитного поля в геликонном разряде, поддерживающего буферную плазму в плазменном сепараторе. Измерены зависимости распределения аксиальной и азимутальной компонент магнитной составляющей ВЧ поля, пространственные зависимости разности фаз компонент ВЧ магнитного поля в буферной плазме и поля в антенне, установлено влияние потенциала торцевых электродов разрядной камеры на радиальные зависимости концентрации буферной плазмы. Полученные данные

необходимы для определения электромагнитных мод, реализующих максимально эффективную генерацию однородной буферной плазмы в камере сепаратора.

Литература

1. A.P. Oiler, G.D. Liziakin, A.V. Gavrikov, and V. P. Smirnov, “The Optimal Axis-Symmetrical Plasma Potential Distribution for Plasma Mass Separation,” Molecules, 2022, V. 27, P. 6824. DOI:10.3390/molecules27206824

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

Влияние агрегатного состояния прекурсора на синтез углеродных нантрубок в плазменной струе плазмотрона постоянного тока

Проведены экспериментальные и численные исследования синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) с катализаторами и без них для пиролиза сажи, ацетилена и этанола в струе аргоновой плазмы плазмотрона постоянного тока при давлении 350 Торр. Комбинируя различные физические методы, включая одновременный термический анализ, дифракционный анализ, электронную микроскопию и энергодисперсионный анализ, показано, что агрегатное состояние прекурсора существенно влияет на структурно-морфологические свойства УНТ. Теоретические расчеты в предположении о локальном термодинамическом равновесии позволили изучить состав газовой фазы плазменного потока, в котором зарождается прекурсор УНТ. Установлено, что при пиролизе сажи (C) температура конденсации твердого углерода составляет 3672 К, с водородом в прекурсоре (C2H2) она ниже и равна 3353 К, с добавлением кислорода (C2H5OH) ее значение становится равным даже <3141 К. При самой низкой температуре конденсации образуются наиболее термически устойчивые УНТ.

Литература

1. M.B. Shavelkina, P.P. Ivanov, R.Kh. Amirov, A.N. Bocharov, Effect of the precursor aggregate state on the synthesis of CNTs in a DC plasma jet, Diamond and Related Materials, Volume 123, 2022, 108844, ISSN 0925-9635, https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108844.

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

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

Поляков Дмитрий Николаевич, с.н.с.

Изучение влияния метастабильных атомов на нагрев микрочастиц в плазме газового разряда в неоне

Численно исследован вклад метастабильных атомов в нагрев микрочастиц диаметром 2.55 мкм находящихся в плазме электрического разряда в неоне. Исследование проведено на основе модели баланса энергии микрочастицы, находящейся в плазме. В баланс включён нагрев микрочастицы в результате столкновений с электронами и ионами, рекомбинация и тушения метастабильных атомов на ее поверхности. Параметры плазмы вычислялись с использованием жидкостной модели разряда низкого давления в неоне с микрочастицами. Обнаружено повышение температуры микрочастиц, образующих в плазме облака с концентрациями микрочастиц 10^4–10^5 $см^{-3}$, полученные экспериментально при давлениях 40–120 Па и токах разряда 0.5–2.0 мА. Исследованы:

1) нагрев микрочастицы в зависимости от тока разряда при разном давлении с учётом и без учета вклада от тушения метастабильных атомов;

2) нагрев микрочастицы в зависимости от давления при разной концентрации микрочастиц;

3) отношения величины нагрева микрочастицы от тушения метастабильных атомов неона, к величине нагрева от рекомбинации на поверхности микрочастицы, в зависимости от тока разряда при разном давлении.

Анализ полученных данных показал, что вклад тушения метастабильных атомов в нагрев микрочастицы возрастает с увеличением давления неона и может составлять около 40% от нагрева, связанного с рекомбинацией на ее поверхности. Установлено что основной причиной возрастания вклада метастабильных атомов неона в нагрев микрочастиц с ростом давления является то, что возрастает отношение степени возбуждения плазмы к степени ионизации. Увеличение концентрации микрочастиц в облаке приводит к уменьшению их нагрева при тех же параметрах разряда. Этот эффект связан с уменьшением концентрации электронов при их гибели в облаке с большей концентрации микрочастиц.

Изучение эффективности удержания ионов в ловушке и баланса ионизации в комплексной плазме, образованной разрядом постоянного тока и облаком заряженных микрочастиц

Численно исследована эффективность удержания ионов внутри ловушки, образованной облаком заряженных микрочастиц в разряде постоянного тока низкого давления. Для описания эффективности удержания ионов предложены показатели, рассчитанные с использованием жидкостной модели комплексной плазмы. Показатели учитывают процессы генерации, потери и накопления ионов в облаке. Эффективность накопления ионов облаком микрочастиц показывает соотношение средних плотностей ионов в разряде с микрочастицами и без них. Эффективность накопления ионов микрочастицами показывает разницу средних концентраций ионов в разряде с микрочастицами и без них, отнесенную к числовой плотности микрочастиц. Удельные энергетические затраты существования одного иона в облаке микрочастиц определяют линейные энергетические затраты разряда в облаке, связанные с линейным числом ионов в нем. Энергетическая эффективность накопления ионов облаком микрочастиц определяется как отношение удельных энергозатрат в разряде без микрочастиц к удельным энергозатратам на существование ионов в облаке.

Выявлена сильная зависимость показателей от концентрации микрочастиц. Обнаружены неэффективные условия удержания ионов внутри облака.

Анализ экспериментальных данных по динамическим неустойчивостям разряда с микрочастицами показал, что эффективность удержания ионов связана с динамическими процессами в комплексной плазме. Установлено, что критерием возникновение нестабильности комплексной плазмы служит предельная концентрация микрочастиц в облаке. Получено, что превышение предельной концентрации приводит к развитию динамической неустойчивости в комплексной плазме, а в неэффективных состояниях - к гашению разряда.

Литература

1. V.V. Shumova, D.N. Polyakov, L.M. Vasilyak, Influence of Metastable Atoms on the Heating of Microparticles in the Plasma of a Gas Discharge in Neon, Russian Journal of Physical Chemistry B. 2022. Vol. 16, No 5, 912-916. DOI: 10.1134/S1990793122050232.
2. D.N. Polyakov, V.V. Shumova, L.M. Vasilyak, Ion confinement efficiency and ionization balance in a complex DC discharge plasma,Plasma Sources and Science Technology, 2022, Vol. 31, 074001. https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac7c36.

Теоретический отдел № 7 им. Л.М. Бибермана,
Лаборатория № 7.1 – моделирования свойств материалов
Левашов Павел Ремирович, зав. отделом, д.ф.-м.н.

Теоретическое обоснование усредненного по углам потенциала Эвальда для однокомпонентной и двухкомпонентной плазмы

Получено строгое теоретическое обоснование для усредненного по углам потенциала Эвальда для случаев однокомпонентной и двухкомпонентной плазмы. Усредненный по углам потенциал Эвальда был предложен Е.С. Якубом и К. Рончи в 2003 году для двухкомпонентной плазмы, однако последовательный вывод для этого потенциала не был приведен. С помощью формулы Пуассона в работе [1] эти пробелы были восполнены. Для однокомпонентной плазмы была получена новая формула для усредненного по углам потенциала Эвальда [2]. Этот потенциал оказался очень эффективен с вычислительной точки зрения и позволил увеличить число частиц при моделировании до миллиона с учетом эффектов дальнодействия. Были выполнены расчеты термодинамических функций классической однокомпонентной плазмы для миллиона частиц в ячейке Монте-Карло в зависимости от параметра неидеальности и получен термодинамический предел. Также было выведено выражение для двухчастичной матрицы плотности системы частиц, взаимодействующих посредством усредненного по углам потенциала Эвальда, в высокотемпературном пределе [3]. Это позволит в будущем проводить вычисления термодинамических функций квантовой плазмы методом Монте-Карло с интегралами по траекториям с учетом эффектов дальнодействия.

1. Demyanov G.S., Levashov P.R. Systematic derivation of angular-averaged Ewald potential // J. Phys. A: Math. Theor. 2022. V. 55. P. 385202. DOI: 10.1088/1751-8121/ac870b.
2. Demyanov G.S., Knyazev D.V., Levashov P.R. Continuous Kubo-Greenwood formula: Theory and numerical implementation // Physical Review E. 2022. V. 105, no. 3. P. 035307. DOI: 10.1103/PhysRevE.105.035307.
3. Demyanov G.S., Levashov P.R. Accounting for long–range interaction in the Kelbg pseudopotential // Contrib. Plasma Phys. 2022. P. e202200100. DOI: 10.1002/ctpp.202200100.

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 кольцевых структур пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде

Рассмотрено формирование кольцевых структур пылевых частиц в стратах тлеющего разряда в эксперименте, выполненном в Институте экспериментальной и теоретической физики Национального университета имени Аль-Фараби в Алматы, Казахстан. Кольцевые структуры возникали при увеличении разрядного тока. В центре дисковой структуры из частиц оксида алюминия размером 1−4 мкм при токе около 4 мА появляется разряжение, с увеличением тока происходит освобождение центра от частиц и структура превращается в кольцо, которое постепенно увеличивается и сужается. На основании рассмотрения баланса сил, действующих на пылевую частицу в радиальном направлении, показано, что происходит уменьшение размера частиц с увеличением разрядного тока и их расстояния от стенки разрядной трубки. Это связано с уменьшением концентрации ионов в радиальном направлении и соответствующем уменьшении силы ионного увлечения в аксиальном направлении. По этой же причине происходит уменьшение размеров пылевых частиц, формирующих структуру, с увеличением разрядного тока.

Расчет сечения фотоионизации первого возбужденного состояния лития

В квазиклассическом приближении выполнен аналитический расчет сечения фотоионизации первого возбужденного состояния атома лития методом квантового

дефекта. Получено полное согласие с результатами численных квантовомеханических расчетов и измерениями, выполненными в ОИВТ РАН в лаборатории № 1.4.

Влияние ионного увлечения на вращение пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде в сильных магнитных полях.

Выполнен расчет вклада ионного увлечения в скорость вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде под действием магнитного поля B = 1.1–2.2 Тл. Известно, что основным механизмом вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде под действием сильных магнитных полей ($B \gtrsim 0.1$ Тл) является увлечение нейтралами, вращение которых связано с вихревыми токами в стратах, тогда как увлечение ионами является основным механизмом вращения в значительно более слабых полях ($B \sim 0.01$ Тл). Причем под действием этих механизмов вращение происходит в противоположных направлениях. Нами показано, что вклад ионного увлечения даже в полях $B > 1$ Тл не является пренебрежимо малым и может составлть до 20% от вклада основного механизма – увлечения нейтралами – и, соответственно, уменьшает скорость вращения пылевых частиц. Более того, его учет в среднем по интервалу B = 1.1–2.2 Тл несколько улучшает согласие теории и эксперимента.

Литература

1. S. Kodanova, A. Abdirakhmanov, L. D'yachkov, N. Bastykova, T. Ramazanov. Ring dust structures in a weak inhomogeneous magnetic field. Contrib. Plasma Phys. 2022. V. 62. N 10. 202100254. https://doi.org/10.1002/ctpp.202100254
2. Sergey Saakyan, Lev D'yachkov, Stepan Klimov, Vladimir Sautenkov, Boris B. Zelener. Photoionization cross section of first excited state of lithium. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2022. V. 195. 106503. https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106503
3. Л. Г. Дьячков, Е. С. Дзлиева, Л. А. Новиков, С. И. Павлов, В. Ю. Карасев. Исследование вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде в сильных магнитных полях с учетом влияния ионного увлечения. ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. DOI: 10.31857/S0040364422060096

Хомкин Александр Львович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Шумихин Алексей Сергеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Термодинамические, электрофизические и оптические свойства плазменного флюида паров металлов, инертных и молекулярных газов

В рамках единой методики рассчитаны состав, проводимость и выполнена обработка исходных экспериментальных данных для неидеальной плазмы инертных газов. Рассмотрены подходы и соотношения для расчета кулоновского логарифма, используемого при расчете проводимости и других коэффициентов переноса плазмы. Проанализированы причины появления многочисленных выражений для кулоновского логарифма. Выполнено сравнение этих выражений с результатами аналитических и численных расчетов. На основе предложенной методики выполнена обработка экспериментальных данных, полученных в разное время для проводимости неидеальной плазмы инертных газов. На основе извлеченного из эксперимента кулоновского логарифма выполнен анализ его поведения в области развитой кулоновской неидеальности. Предложено расчётное выражение для кулоновского логарифма в достаточно широком диапазоне параметра неидеальности.

Литература

1. Хомкин А.Л., Шумихин А.С. Кулоновский логарифм при расчете проводимости плазмы: аналитическая теория и численное моделирование // ТВТ. 2022. Т. 60, № 4. с. 483 – 487. DOI: 10.31857/S004036442204010X

2. Хомкин А.Л., Шумихин А.С. Новый класс фазовых переходов в водороде и дейтерии при наличии химических реакций ионизации и диссоциации // ЖЭТФ. 2022. Т. 161. с. 238 – 244. DOI: 10.31857/S0044451022020092

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

Пылевые ионизационные и пылевые акустические волны в газовом разряде постоянного тока при низком давлении в условиях микрогравитации

Впервые предложен теоретический подход к описанию пылевых ионизационных и пылевых акустических волн, распространяющихся в облаке микрочастиц в газовом разряде низкого давления в условиях микрогравитации. Для описания подсистемы микрочастиц комплексной плазмы используется гидродинамическое приближение в сочетании с кинетическим уравнением для ионов. В одномерном приближении получено волновое уравнение, решение которого определяет закон дисперсии волн в комплексной плазме, при распространении которых происходят колебания микрочастиц. Полученное дисперсионное соотношение объединяет как пылевые ионизационные волны, так и пылевые акустические волны (ПИВ и ПАВ соответственно). Из полученного закона дисперсии следует, что влияние микрочастиц на скорость рекомбинации обусловливает наличие ряда особенностей ПИВ, существенно отличающих их от ПАВ. Среди этих особенностей наличие минимальной частоты, ниже которой невозможно распространение как ПИВ, так и ПАВ, слабая зависимость волнового числа ПИВ от частоты и на порядок более высокая фазовая скорость ПИВ по сравнению с ПАВ. Показано, что при распространении ПИВ возникновение неустойчивости невозможно, тогда как ПАВ при соответствующих условиях могут самовозбуждаться. Кроме того, ПАВ характеризуются малой длиной затухания, и поэтому эти колебания могу быть возбуждены в системе лишь вблизи порога неустойчивости, в то время как возбуждение ПИВ можно наблюдать в широком круге условий эксперимента. Результаты расчетов коррелируют с результатами, полученными в недавно проведённом эксперименте.

Литература

1. Zhukhovitskii D.I. Dispersion relation for the dust ionization and dust acoustic waves in the gas discharge complex plasma, Physics of Plasmas, 2022, Vol. 29, No. 7, P. 073701. DOI: 10.1063/5.0094038.
2. Zhukhovitskii D.I., Dust ionization and dust acoustic waves in the dc low-pressure gas discharge under microgravity conditions, Plasma Physics Reports, 2022, Vol. 48, No. 10, P. 1062. DOI: 10.31857/S0367292122600650.
3. Zhukhovitskii D.I., Response to “Comment on ‘Dispersion relation for the dust ionization and dust acoustic waves in the gas discharge complex plasma’” [Phys. Plasmas 29, 114701 (2022)], Physics of Plasmas, 2022, Vol. 29, No. 11, P. 114702. DOI: 10.1063/5.0125951.

Лаборатория №8. - физического моделирования двухфазных течений

Куриленков Юрий Константинович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

О скейлинге мощности DD-синтеза в наносекундном вакуумном разряде с дейтерированными анодными Pd-трубками

Ранее в наносекундным вакуумном разряде (НВР) с дейтерированным Pd анодом наблюдалось появление DD нейтронов не только на хорошо изученной квазистационарной стадии, где в межэлектродном пространстве возникает виртуальный катод (ВК), но и на самой начальной стадии разряда. Анализ экспериментов показал, что

автоэлектронный пучок может играть роль своего рода триггера для запуска процессов DD-синтеза на поверхности или в объеме Pd анода, но его механизм на начальной стадии разряда оставался неясным. С помощью PiC моделирования показано, что при частичном проникновении пучка автоэлектронов внутрь тонкостенных анодных Pd-трубок, насыщенных дейтерием, возможно образование короткоживущих виртуальных катодов очень малых размеров внутри отдельных Pd-трубок, причем, начиная с величины тока 100 А, вблизи оси трубки возможна реакция DD-синтеза. Кроме того, впервые показано, что в устройствах инерциального электростатического удержания (ИЭУ) с осциллирующими ионами благоприятный скейлинг мощности DD-синтеза, увеличивающейся с уменьшением радиуса виртуального катода, может сохраняться вплоть до размеров виртуального катода $r_{вк} \approx 0.02$ см.

Литература

1. Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P., Oginov A.V. On scaling of DD fusion power in a nanosecond vacuum discharge // Plasma Physics Reports. 2022. V. 48. № 4. P. 443. DOI:10.1134/S1063780X22040080

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 тлеющих разрядах

Разработана модель тлеющих разрядов низкого давления в чистом углекислом газе и в его смесях с азотом [1,2]. Проведены расчеты характеристик разрядов как при постоянном во времени приложенном напряжении, так и в импульсно-периодических режимах. Рассчитаны значения параметров плазмы (температуры газа, колебательной температуры, концентрации электронов, напряженности электрического поля), а также энергетической эффективности и степени конверсии, в широком интервале давлений газа и токов разряда, для разрядов в чистом CO_2 и в смесях CO_2 с N_2. Результаты моделирования хорошо согласуются с представленными в литературе экспериментальными данными.

Динамика колебательного возбуждения молекул CO_2 в наносекундных разрядах

Методом численного моделирования исследована динамика возбуждения антисимметричной колебательной моды молекул CO_2 в наносекундных разрядах [3]. Для условий эксперимента, недавно выполненного группой проф. Czarnetzki (Бохумский университет, Германия), рассчитаны зависимости концентраций колебательно возбужденных молекул от времени. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными позволило уточнить информацию о константах скорости возбуждения и тушения этих уровней.

Влияние неоднородностей поверхностей электродов на напряжение зажигания разряда в углеводородных жидкостях

Теоретически исследованы условия зажигания разряда в углеводородных жидкостях в неоднородных электрических полях при наличии микровыступов на поверхностях электродов [4]. Получены выражения, позволяющие оценить напряжение зажигания в зависимости от продольных и поперечных размеров микровыступов. Показано, что наблюдаемое в ряде экспериментов снижение значений напряжения зажигания разряда по сравнению с его значениями на гладких электродах можно объяснить наличием на электродах микровыступов длиной 20-50 мкм и радиусом 1-2 мкм. Эти размеры близки к оценкам, полученным нами ранее при анализе влияния микровыступов на напряжение зажигания разрядов в сильно сжатых газах.

Взаимодействие плазменных струй с поверхностями

Методом численного моделирования исследовано взаимодействие струи плазмы гелия с диэлектрической пластиной, расположенной под малыми (скользящими) углами к оси направленной горизонтально струи [5]. Учитывается эффект всплывания газа в струе под действием гравитационных сил. Показано, что при малых углах наклона пластины плазма обволакивает пластину, на краю которой наблюдается расщепление ионизационной волны (ИВ). При этом одна ИВ распространяется на некоторой высоте над поверхностью пластины, а другая ИВ скользит вдоль нижней поверхности. Таким образом, обработка верхней и нижней поверхностей плазмой неодинакова даже для горизонтально ориентированных пластин. Рассчитаны потоки заряженных и нейтральных активных частиц и радикалов, достигающих поверхности пластины. Полученные результаты важны для приложений в плазменной медицине и при плазменной обработке поверхностей.

Формирование широких стримеров в воздухе и гелии: роль быстрых электронов

Проведены расчеты, описывающие формирование широких отрицательных стримеров в воздухе и гелии в перенапряженном промежутке игла-плоскость [6]. В модель включен дополнительный, к объемной фотоионизации, канал генерации первичных электронов перед фронтом стримера - ионизация газа пучком быстрых электронов, формируемым в процессе развития разряда. Установлено, что учет ионизации газа быстрыми электронами приводит к увеличению скорости стримера и к изменению его формы.

Эволюция волн ионизации в многоимпульсной плазменной струе

Представлены результаты расчетно-теоретического исследования динамики ионизационных волн (ИВ) - стримеров, формируемых в плазменной струе гелия последовательностью из трех коротких высоковольтных импульсов [7]. Показано, что существенную роль в развитии ИВ играют остаточные объемные и поверхностные электрические заряды, наработанные предшествующими ИВ. Установлено, что накопление остаточных зарядов от импульса к импульсу может приводить к прекращению формирования новых ИВ.

Дорожная карта плазмы 2022 года: наука и технология низкотемпературной плазмы

Опубликован сборник обзорных статей “Дорожная карта плазмы 2022”, в которых обсуждаются важные нерешенные задачи в области физики и технологии низкотемпературной плазмы [8].

Актуальные проблемы низкотемпературной плазмы

Опубликован обзор, посвященный анализу проблем, связанных с исследованиями и приложениями низкотемпературной плазмы атмосферного давления.[9].

Литература

1. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, Modeling of repetitively pulsed low-pressure CO_2 discharges // Physics of Plasmas 2022, v.29, paper 044501. DOI: 10.1063/5.0087197
2. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, Modeling of CO_2 conversion in low-pressure glow discharges in CO_2-N_2 mixtures // Journal of Physics D: Applied Physics 2022, v.55, paper 335202. DOI: 10.1088/1361-6463/ac7266
3. G.V. Naidis, N.Yu. Babaeva, Modeling of vibrational excitation dynamics in a nanosecond CO_2 discharge // Journal of Physics D: Applied Physics 2022, v.56, paper 015202. DOI: 10.1088/1361-6463/ac9c10

4. G.V. Naidis, Discharge Inception in Hydrocarbon Liquids: Effect of Electrode Surface Roughness // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2022, v.29, pp.347-349. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3148452
5. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, Splitting of the ionization wave of a horizontal plasma jet at the edge of a dielectric plate positioned at grazing angles // Plasma Sources Science and Technology 2022, v.31, paper 104004. DOI: 10.1088/1361-6595/ac95c0
6. 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: WoS 10.1088/1361-6463/aca776
7. 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 (accepted). DOI: 10.1088/2058-6272/aca18e
8. I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, L.L. Alves, S. Baalrud, N. Babaeva, A. Bogaerts, A. Bourdon, P.J. Bruggeman, et al. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology // Journal of Physics D: Applied Physics 2022 v.55, paper 373001. DOI: 10.1088/1361-6463/ac5e1c
9. X.P. Lu, P.J. Bruggeman, S. Reuter, G. Naidis, A. Bogaerts, M. Laroussi, M. Keidar, E. Robert, J.-M. Pouvesle, D.W. Liu, K. Ostrikov, Grand Challenges in Low Temperature Plasmas // Frontiers in Physics 2022, v.10, paper 1040658. DOI: 10.3389/fphy.2022.1040658

Лаборатория №17.2. – диагностики пылевой плазмы
Лаборатория диагностики пылевой плазмы
Клумов Борис Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сыроватка Роман Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Плазменный кристалл в (3+1) измерениях

Впервые квазидвумерный плазменный кристалл экспериментально наблюдался в (3+1) измерениях, т.е трехмерные траектории отдельных частиц были разрешены в течении длительного промежутка времени, что позволило детально исследовать плавление и рекристаллизацию квазидвумерной структуры в микрочастиц в ВЧ разряде. Для этой цели была разработана и применена новая система оптической томографии, основанная на компьютерном стереозрении. Такая диагностика открывает новый этап исследований в лабораторной комплексной плазме. Показано, что плавлению кристалла предшествует его расслоение в центре системы на два слоя со сдвинутой квадратной кристаллической решеткой, т.е. наблюдается структурная неустойчивость кристалла и переход 1$\triangle$ $\rightarrow$ 2$\square$ [1]. Данное расслоение вызвано наличием горизонтального параболического конфайнмента, который приводит к неоднородности кристалла в радиальном (от его центра) направлении, при этом, поскольку плотность микрочастиц максимальна в центре кристалла, то там и реализуется условие для развития данной неустойчивости, а часть кристалла на периферии сохраняет планарную структуру с треугольной решеткой. Молекулярно-динамическое моделирование системы Юкавы в горизонтальном параболическом конфайменте воспроизвело наблюдаемую в эксперименте структурную неустойчивость [1].

1. Р.А.Сыроватка, А.М.Липаев, В.Н.Наумкин, Б.А.Клумов, "Плазменный кристалл в (3+1) измерениях", Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 12, с. 836–842 (2022).

Лаборатория №17.3. – активных кулоновских систем
Петров Олег Федорович, г.н.с., проф., д.ф.-м.н., какдемик РАН

Активное броуновское движение заряженных макрочастиц в газоразрядной плазме при воздействии лазерного излучения

Системы активных броуновских частиц можно рассматривать как открытые системы, в которых происходит обмен энергией и веществом с окружающей средой. Коллективные явления активных броуновских частиц могут демонстрировать аналогии с обычными фазовыми переходами.

Экспериментально исследовано активное броуновское движение светопоглощающих и сильно взаимодействующих частиц, вдали от равновесия, левитирующих в газовом разряде. Характер и интенсивность активного движения частиц зависели от воздействия лазерного излучения. Активное броуновское движение обусловлено фотофорезом, т.е. поглощением лазерного излучения на покрытой металлом поверхности частиц и возникновением радиометрической силы, которая в свою очередь приводит их в движение.

Экспериментально изучена динамика заряженных частиц в квазидвумерном плазменно-пылевом монослое при переходе из кристаллоподобного состояния в жидкостное. Представлен анализ характера движения, включая анализ траекторий, среднеквадратичное и линейное смещение, длину персистенции, кинетическую энергию частиц при различных значениях интенсивности лазерного излучения и параметрах неидеальности системы.

Литература

1. Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M., Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma. SCIENTIFIC REPORTS. 2022. Vol. 12, I. 1, P. 8618. https://doi.org/10.1038/s41598-022-12354-7

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

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

Синтез супергидрофобных покрытий из гексаферрита бария с низкой магнитной твердостью

На примере многофункционального материала гексаферрита бария впервые продемонстрирована перспективность обработки при квазиравновесной низкой температуре в открытой атмосфере с образованием супергидрофобных магнитных покрытий с выраженной кристаллической и магнитной анизотропией. Взаимосвязь условий плазменной обработки, структурно-фазового состава, морфологии и супергидрофобных свойств пленок (0001) гексаферрита бария $BaFe_{12}O_{19}$ на С-сапфире [1]. В качестве методов исследования использовались рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), рентгеновская дифрактометрия (РФА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), а также магнитометрия и анализ влагостойкости. При плазменной обработке со среднемассовой температурой 8÷10 кК наблюдается интенсивное испарение и оплавление поверхности, обнаруживается текстурирование осадка по (0001). При снижении температуры обработки до 4÷5 кК испарение материала минимизировалось, а магнитная и кристаллическая анизотропия увеличивались. Однако увеличение размеров кристаллитов сопровождалось переходом атомов кислорода из узлов решетки в междоузлия. Все образцы имели низкие коэрцитивные поля ниже 500Э, связанные с фрустрацией магнитной подсистемы. Особенности роста материалов со структурой вюрцита использованы для формирования супергидрофобного покрытия из гексаферрита бария.

Предложены режимы плазменной обработки для получения самоочищающихся покрытий. В качестве примера показано использование магнитотвердого гексаферрита бария для радикального изменения свойств покрытия.

Литература

1. Muslimov A.E., Gadzhiev M.Kh. and Kanevsky V.M. Synthesis of Superhydrophobic Barium Hexaferrite Coatings with Low Magnetic Hardness // Materials. 2022, 15, 7865. https://doi.org/10.3390/ma15217865

Влияние параметров плазменной обработки на структурно-фазовый состав, твердость, влагостойкость и комбинационно-стимулирующие свойства азотсодержащего диоксида титана

Впервые показаны перспективы обработки квазиравновесной низкотемпературной азотной плазмой в открытой атмосфере для формирования сверхтвердых, супергидрофобных TiN/TiO_2 композиционные покрытия с ярко выраженными комбинационными свойствами. В качестве аналитических методов исследования применяют рентгеновскую дифрактометрию (РФА), растровую электронную микроскопию (РЭМ), атомно-силовую микроскопию (АСМ), спектроскопию комбинационного рассеяния, а также анализ твердости и влагостойкости. При плазменной обработке пленок титана на сапфире со среднемассовой температурой 4–6 кК формируется рентгеноаморфная гидрофильная пленка оксида титана с низким содержанием азота. Содержание азота в пленках оксида титана увеличивается с повышением температуры обработки до 6–7 кК. При этом образуется рентгеноаморфная гидрофобная пленка. При дальнейшем повышении температуры до 7–10 кК наблюдается образование TiN/TiO_2 формируется композиционная структура на основе поликристаллического рутила с повышенной гидрофобностью и выраженными рамановскими свойствами за счет эффективного возбуждения поверхностных плазмонных поляритонов. [1]. Наличие кристаллической фазы увеличивает время расфазировки, что определяет качество резонанса и достижимое усиление электромагнитного поля вблизи включений TiN. Все обработанные пленки на сапфире обладают сверхтвердостью выше 25 ГПа (твердость по Виккерсу) за счет большого размера зерна, наличия азотсодержащих включений, сосредоточенных по границам зерен, и сжимающих напряжений.

Литература

1. Muslimov A.E., Gadzhiev M.Kh. and Kanevsky V.M. Influence of Plasma Treatment Parameters on the Structural-Phase Composition, Hardness, Moisture-Resistance, and Raman-Enhancement Properties of Nitrogen-Containing Titanium Dioxide // Materials. 2022, 15, 8514. https://doi.org/10.3390/ma15238514

Совместно с научно-исследовательским центром “Кристаллография и фотоника” РАН, Дагестанского государственного университета, Дагестанского научного центра РАН

Упрощенный синтез композитных частиц $Ti/TiN/TiON/TiO_2$ для плазмон-стимулированного фотокаталитического разложения метиленового синего под действием солнечного излучения

Изучена взаимосвязь структурно-фазового состава и морфологии композитных микрочастиц с их каталитическими свойствами при воздействии УФ, видимого и солнечного света. Обработку порошка титана проводили в прианодной области генератора азотной плазмы с помощью плазмотрона с вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом [1]. Среднемассовая температура плазмы в зоне подачи порошка составляла ~10 кК, скорость пролета частиц через зону обработки 50 ÷ 60 м/с. После обработки изменяется морфология микрочастиц: уменьшается пористость и увеличивается шероховатость. По данным РФА, в микрочастицах основной остается α-фаза Ti, т.е. кроме того, высокотемпературная фаза рутила TiO_2 и нитрид титана TiN. На

основании данных РФА и РФЭС с глубинным травлением сделан вывод о формировании в процессе плазменной обработки тандемного композитного фотокатализатора $Ti/TiN/TiON/TiO_2$. Показано, что основными компонентами фотоактивности при облучении видимым светом являются электроны от TiN, мигрирующие от границы раздела TiON/TiN к границе раздела TiON/раствор. Повышение фотоактивности под действием солнечного света связано с несколькими факторами: генерацией и возбуждением носителей в TiO_2 под действием УФ-облучения и нагревом электронов в композитной матрице $TiN\text{-}TiO_2$ за счет плазмонных эффектов в видимой и ближней ИК областях.. Показана фотокаталитическая активность полученных композитных микрочастиц при воздействии видимого и солнечного излучения. Предложен механизм фотокатализа.

Литература

1. Muslimov A., Orudzhev F., Gadzhiev M., Selimov D., Tyuftyaev A., Kanevsky V. Facile Synthesis of $Ti/TiN/TiON/TiO_2$ Composite Particles for Plasmon-Enhanced Solar Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue // Coatings. 2022, 12, 1741. https://doi.org/10.3390/coatings12111741

Лаборатория №21.1 – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики

Бочаров Алексей Николаевич, в.н.с., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.
Рук. работы Бровкин Вадим Геннадиевич, в.н.с., к.т.н. и Веденин Павел Валентинович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Энергетический подход в исследовании плазменных структур микроволнового разряда высокого давления

Выдвинута гипотеза и установлено, что тонкий плазменный СВЧ канал самоорганизуется в соответствии с принципом поглощения максимальной энергии. Гипотеза проверена на примере тонкого плазменного канала, являющегося базовым элементом структур дипольного типа.

Физическое содержание гипотезы [1]: плотность мощности, усредненная за период колебаний электромагнитного поля, пропорциональна проводимости плазмы. С увеличением проводимости амплитуда электрического поля в тонкой плазменной нити уменьшается. Следовательно, в каждый момент времени поглощенная мощность имеет максимальное значение. К концу удлинения канала относительное отклонение полной энергии от ее верхней оценки составляет всего несколько процентов. На основе этого исследования можно «мгновенно» оценить энергию, поглощаемую за время СВЧ-импульса. Метод основан на аналитических выражениях и экспериментальных данных о временной эволюции видимых на фотографиях размеров канала за время СВЧ-импульса.

Механизмы самоорганизации микроволнового стримера в исследовании плазменных структур СВЧ разряда высокого давления

Численное исследование эволюции плазменного канала в воздухе в диапазоне параметров разряда P = 30-750 торр, λ = 2,3-8,5 см показало, что полная поглощенная энергия в каждый момент времени близка к своему верхнему пределу. Выявлены механизмы самоорганизации тонкой плазменной нити на различных этапах ее эволюции [2]. Исследована реакция системы электрическое поле-плазменный канал на изменение констант скорости основных процессов образования и гибели электронов в воздухе на наиболее энергоемкой стадии. Максимальное поглощение энергии обеспечивается константами скорости, которые хорошо согласуются с используемыми в настоящее время константами. Предложен экспресс-метод оценки энергетических характеристик тонкой

плазменной нити - полной и удельной поглощённой энергии, а также нагрева газа в центре канала.

Литература

1. V. G. Brovkin and P. V. Vedenin**.** Energy approach in the study of plasma structures of a high-pressure microwave discharge**.** Journal of Applied Physics. 131, 123302 (2022);
2. V. G. Brovkin and P. V. Vedenin**.** Mechanisms of self-organization of a microwave streamer leading to maximum energy absorption. Plasma Sources Science and Technology. V 31, N 9.

Лаборатория №21.3. - плазменной аэродинамики и стимулированного горения
Моралев Иван Александрович, с.н.с., зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Источники возмущений в задачах управления гидродинамическими неустойчивостями на основе барьерного разряда

Плазменные актуаторы на основе барьерного разряда широко используются в качестве источников управляющих возмущений в различных задачах гидродинамики, таких как снижение шума струи, управление ламинарно-турбулентным переходом в пограничных слоях. Одним из ключевых параметров таких источников является соотношение сигнал/шум. Показано, что физической причиной стохастических пульсаций, генерируемых разрядом в пограничном слое, является блуждание микроразрядов по кромке электрода, вызывающая нестационарность источника возмущений.

Завершены исследования шума плазменных актуаторов на основе барьерного разряда в двумерном пограничном слое. Создана модель источника шума как набора дельта-коррелированных областей формирования объемной силы на электроде, формирующих в пограничном слое волновые пакеты возмущений. Разработана теория, позволяющая предсказывать зависимость амплитуды шума от параметров питающего актуатор напряжения. Результаты работы могут быть использованы при оценке перспектив использования газоразрядных актуаторов в качестве источников возмущений в задачах затягивания ламинарно-турбулентного перехода для снижения сопротивления трения летательных аппаратов. [1].

Литература

1. Moralev I. et al. Stochastic disturbances, induced by plasma actuator in a flat plate boundary layer // Phys. Fluids. т. 34. № 5.p. 054117

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

119991, Москва, Россия, Ленинский пр. 53
Отдел физической электроники
Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Баренгольц Сергей Александрович, главный науч. сотр., д.ф.-м.н., Орешкин Евгений Владимирович, снс, к.ф.-м.н (работа выполнена совместно с ИОФ РАН).

Структура микрократеров, формируемых под действием мощного импульсного энергетического воздействия

Впервые проведено моделирование динамики изменения фазового состояния вещества при микровзрывных процессах на поверхности электродов, подвергаемых импульсному энергетическому воздействию (лазерному, плазменному, пучковому, и т.д.).

Показано, что в этом случае на поверхности катода формируются кратеры с полостью в середине. Формирование кратеров такой структуры, которая отличается от кратеров, наблюдаемых при вакуумном разряде, происходит из-за того, что дополнительный нагрев делает возможным инициирование микроразрядных процессов при токах, близких или ниже пороговых для зажигания дугового разряда. При этом не происходит вытеснения жидкого металла из зоны микровзрыва и ток продолжает течь через центр формирующегося микрократера, приводя к интенсивному испарению материала в этой области.

Литература

1. Barengolts S. A. Uimanov, I. V., Oreshkin, V. I., Khishchenko, K. V., Oreshkin, E. V. Effect of the temperature of an electrode microprotrusion on the microcrater formation on the electrode surface upon pulsed and radiofrequency vacuum breakdowns //Vacuum 2022; Vol. 204, 111364. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111364.

М.М. Цвентух (ФИАН)

Определение критической температуры сплавов Nb-Al по параметрам плазмы катода вакуумной дуги

Плазма импульсно-периодических всплесков взрывной электронной эмиссии формирует катодное пятно вакуумной дуги. Средние параметры такой плазмы могут быть оценены из параметров критического состояния вещества для различных металлов [Tsventoukh 2021 *Phys. Plasmas* **28** 024501]. На основании результатов измерений [Siegfried Zöhrer *et al* 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 025022] среднего заряда и кинетической энергии ионов плазмы вакуумной дуги в рамках нашей модели была оценена критическая температура и энергию связи для сплавов Nb-Al. Применение полученных величин критической температуры в эмпирическом “cohesive energy rule” позволило описать экспериментально измеренные значения катодного падания потенциала и воспроизвести наблюдаемое V-образное отклонение от линейной зависимости. Полученные результаты позволяют оценивать критическую температуру и энергию связи металлов из параметров плазмы вакуумной дуги.

Литература

1. Tsventoukh M. M. «Determination of the critical temperature of Nb–Al alloys from the plasma parameters of a vacuum arc cathode spot» //*Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2022. – Т. 55. – №. 35. – С. 355204

Совместный результат ФИАН, ИЭФ УрО РАН, ИСЭ СО РАН

Г.А. Месяц[1], В.В. Ростов[2], К.А. Шарыпов[3], В.Г. Шпак[3], С.А. Шунайлов[3], М.И. Яландин[1,3], Н.М. Зубарев[1,3]

[1] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

[2] Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

[3] Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Характеристики излучения и структура электронного пучка в зависимости от давления газа и магнитного поля в коаксиальном диоде с холодным катодом

В компактных субнаносекундных слаборелятивистских электронных ускорителях большое импульсное электрическое поле эффективно ускоряет поток электронов из плазмы взрывной электронной эмиссии, образующейся на катоде.

Из-за большого электрического поля электронный пучок может ускорятся и в плотном газе (атмосферного или более высокого давления). При этом снижается и амплитуда, и длительность пучка (в атмосфере до ~10 пс).

В совместной работе ФИАН ИЭФ УрО РАН и ИСЭ СО РАН была найдена область промежуточного давления - единицы Торр, в которой ускорение из вакуумного режима переходит в режим убегания электронов. При этом
1) в этой области давлений было обнаружено увеличение полного тока пучка электронов до 2.8 кА,
2) из простых оценок, на основе зависимости сечения ионизации от энергии, было получено количественное объяснение, почему именно при таком давлении наблюдается переход в режимах ускорения, сопровождаемый ростом количества ускоренных электронов (плотность $n^* \approx \frac{2eU}{D\sigma_{max}} \ln^{-2}(\frac{2.718eU}{\varepsilon_{max}}) \approx 9.9\text{e}16\ \text{cm}^{-3}$ – соответствует давлению p^* ≈ 2.8 Торр).

Литература

1. Gennady Mesyats, Vladislav Rostov, Konstantin Sharypov, Valery Shpak, Sergey Shunailov, Michael Yalandin and Nikolay Zubarev «Emission features and structure of an electron beam versus gas pressure and magnetic field in a cold-cathode coaxial diode» //*Electronics*. 2022. Т. 11. №. 2. С. 248.

Лаборатория теории плазменных явлений Отдела физической электроники
Вагин Константин Юрьевич, вк.с.н.с., к.ф.-м.н.
Мамонтова Татьяна Вячеславовна, вк.м.н.с.
Урюпин Сергей Александрович, вк.г.н.с., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией

Поглощение электромагнитного излучения неоднородной плазмой инертных газов

В работе [1] исследовано поглощение излучения с частотой $\omega = \omega_L - \Delta\omega$, близкой к электронной ленгмюровской ω_L, в неоднородной плазме, образованной при многофотонной ионизации атомов инертных газов. В условиях, когда плотность фотоэлектронов в плазме n(z) линейно нарастает в слое ширины L, а затем остается постоянной, и частота столкновений электронов с атомами инертного газа ν меньше ω_L, найдено поле в плазме и вычислен коэффициент поглощения. Обнаружено, что существует дополнительное увеличение коэффициента поглощения, которое проявляется в условиях, когда положение z_0 - точки критической плотности близко к границе области постоянной плотности. В этих условиях, с одной стороны, амплитуда поля подрастает по мере приближения к точке критической плотности, а затем его величина почти не изменяется до границы неоднородного слоя и подросшее поле поглощается в относительно глубоком скин-слое шириной $c/\sqrt{\Delta\omega\omega_L}$, где c – скорость света. Наличие в инертных газах эффекта Рамзауэра-Таунсенда приводит к зависимости коэффициента поглощения от эффективной частоты столкновений $\nu_\alpha = \nu(1 + \alpha/3)$, где $\alpha = \partial \ln \nu / \partial \ln v_0$ – параметр, величина которого зависит от средней скорости фотоэлектронов v_0 и вида зависимости частоты упругих столкновений фотоэлектронов с нейтральными атомами газов ν от их скорости. Такая зависимость приводит к увеличению коэффициента поглощения в несколько раз для всех значений L.

Литература

1. Вагин К.Ю., Мамонтова Т.В., Урюпин С.А. Поглощение излучения с частотой, близкой к границе прозрачности неоднородной плазмы, образованной при многофотонной ионизации атомов инертного газа. ЖЭТФ, 2022, том 162, вып. 6 (12), стр. 823-829; DOI: 10.31857/S0044451022120021.

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

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

Влияние процесса ионизации на структуру пространственных волн средней энергии свободных электронов в нелокальной газовой системе в постоянном электрическом поле

Проведены локальные измерения параметров электронной компоненты, потенциала пространства и абсолютных светимостей неравновесной плазмы разряда во влажном гелии пониженного давления, поддерживаемого полым катодом. Определение концентраций атомов гелия и водорода в основных состояниях осуществлялось по интенсивностям линий переходов между возбужденными уровнями с привлечением корональной модели (КМ), с учетом ветвления электронных переходов с уровней возбуждения атомов и конечной оптической плотности плазмы. Показано, что в этих условиях предложенное уточнение КМ позволяет выбрать ряд спектральных линий, позволяющий определять концентрации атомов гелия в основном состоянии по измерениям абсолютных интенсивностей излучения электронных переходов. Рассмотрена возможность использования корреляций расчетной температуры электронов с эффективными температурами заселения и распределения возбужденных атомов.

Совместное влияние стока электронов на зонд и их поглощение анодом на измеряемые распределения электронов по энергиям

Методами зондовой диагностики, в совокупности с методами моделированием методами Монте-Карло и нелокальной кинетики, исследованы эффекты совместного влияния стока электронов на зонд и их поглощения анодом на вид распределения электронов по энергиям. В газовом разряде при давлении гелия 1 Торр в области энергий (0-20)эВ наблюдается дефицит электронов при энергиях меньше 3 эВ. Показано, что при зондовых измерениях на различных расстояниях (0-3)см от анода вклад эффектов различен.

Влияние гетерогенных процессов и активации поверхности на динамику объемной плотности молекул кислорода в газоразрядной плазме

Исследована динамика поведения объемной плотности молекул кислорода в кварцевой трубке в условиях активации ее внутренней поверхности разрядом в газах, содержащих кислород. Показано, что для появления кислорода в объеме после активации поверхности и вакуумирования достаточно введения газа. Включение разряда демонстрирует существенно различное поведение концентраций O_2 при различных комбинациях плазмообразующих газовых смесей.

Техника параллельных зондовых измерений для диагностики плазмы с пространственным разрешением

Разработана многоканальная зондовая техника локальной диагностики плазмы. Возможно измерение концентраций и вида распределения по энергиям электронов, электрического поля и потенциала плазмы с пространственным разрешением. Эксперименты проводились в плазме разряда, поддерживаемого полым катодом. В конфигурации, когда три зонда сведены в малой локальной области плазмы изучены процессы деградации зондов в результате адсорбции частиц на их поверхности. Показано, что возможно восстановление рабочего состояния при биполярной подаче напряжения на зонды.

Литература

1. С.Н. Андреев, А.В. Бернацкий, И.И. Драганов, И.В. Кочетов, В.Н. Очкин. Локальные параметры плазмы, концентрации атомов и абсолютные интенсивности свечения в разряде, поддерживаемом полым катодом // Физика плазмы. 2022, т. 48, № 11, с. 1115-1129. DOI: 10.31857/S0367292122601096. https://doi.org/10.31857/S0367292122601096
2. S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Measurements and interpretation of EEDF in a discharge with a hollow cathode in helium: effect of the measuring probe and the anode on the form of the distribution function // Plasma Sources Science and Technology. 2022, V. 31, No. 10, 105016 (8pp). DOI: 10.1088/1361-6595/ac9750 https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac9750
3. V.N. Ochkin, V.V. Lagunov, A.V. Bernatskiy. Influence of the surface state on the dynamics of the bulk density of O2 molecules in mixtures with inert and molecular particles in gas and glow discharge // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2022, V. 128, No. 4, 75. DOI: 10.1007/s00340-022-07800-3 https://doi.org/10.1007/s00340-022-07800-3
4. S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin. Multichannel probe measurements in a helium plasma in a hollow cathode discharge // Vacuum. 2022, V. 206, 111514 (7pp). DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111514 https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111514
5. В.Н. Очкин. Спектроскопия малых газовых составляющих неравновесной низкотемпературной плазмы // Успехи физических наук. 2022, т. 192, № 10, с. 1145-1178. DOI: 10.3367/UFNr.2021.07.039026. https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039026

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 приборов Лукичев Владимир Федорович, Директор , чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.**
Мяконьких Андрей Валерьевич, с. н. с., к.ф.-м.н.
Руденко Михаил Константинович, м. н. с.
Кузьменко Виталий Олегович, м. н. с.

Исследование глубокого травления кремния во фторсодержащей плазме

Проведены эксперименты по исследованию кинетики изотропного травления кремния во фторсодержащей плазме в широком диапазоне концентраций атомарного фтора и температур образца (-140 ^{o}C +20°C). Для диагностики плазмы применены методы зонда Ленгмюра, оптической эмиссионной спектроскопии и актинометрии, и определены параметры плазмы – концентрация электронов, электронная температура, концентрация атомарного фтора. С помощью растровой электронной микроскопии были исследованы профили травления. Установлено, что вероятность реакции уменьшается от 0,162 до 0,07 в диапазоне плотности потока радикалов фтора $5{,}93\cdot10^{17}$–$7{,}07\cdot10^{18}$ см$^{-2}$с$^{-1}$. Коэффициент прилипания фтора для чистого кремния S_0 и константа скорости химического травления $k\sigma_{Si}$ (произведение константы скорости реакции на плотность поверхностных атомов кремния) были получены путем подгонки параметров кинетической модели для вероятности реакции как функции потока фтора к экспериментальным данным; значения $S_0 = 0{,}62$ и $k\sigma_{Si} = 7{,}99\cdot10^{18}$ для криогенных условий и $S_0 = 0{,}57$ и $k\sigma_{Si} = 5{,}30 \times 10^{18}$ для комнатной температуры. Зависимость вероятности реакции от потока фтора объясняется кинетической моделью, параметры которой получены экспериментально. Существенной температурной зависимости параметров

травления кремния не наблюдается. Полученные данные будут применены для создания численных моделей глубокого плазменного травления. Также проведено моделирование профиля травления при глубоком криогенном травлении кремния, определена зависимость скорости травления от глубины и аспектного отношения для структур травления разной топологии. Исследованы так же другие подходы к глубокому травления кремния – двухстадийные процессы, выполняемые в циклах «окисление-травление» и «окисление-полимеризация» (Bosch процесс). Полученные результаты могут быть применены для создания структур тренчевых интегральных конденсаторов, микро- и наноэлектромехенических систем.

Литература

1. Rudenko M., Kuzmenko V., Miakonkikh A., Lukichev V. // On temperature and flux dependence of isotropic silicon etching in inductively coupled SF6 plasma// (2022) Vacuum, 204, art. no. 111326. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111326
2. Rudenko M.K., Miakonkikh A.V., Lukichev V.F. // Numerical study of aperture shape effects in deep cryogenic etching of silicon// (2022) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 12157, art. no. 1215713. DOI: 10.1117/12.2622908
3. А.В. Мяконьких, К.В. Руденко, В.Ф. Лукичев. Экспериментальное исследование возможностей глубокого криогенного травления кремния для создания TSV структур, стр: 3-18, В книге: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование (Труды Физико-технологического им. К.А. Валиева Российской академии наук) Том 30. Усл.печ.л. 9,1. Тираж 500 экз. 112 стр. ISBN 978-5-02-040925-5. DOI: 10.7868/9785020409255.
4. А.В. Мяконьких, В.О. Кузьменко, С.Н. Аверкин, К.В. Руденко, В.Ф. Лукичев. Новый подход к глубокому анизотропному травлению кремния: циклический процесс «окисление-травление», стр. 19-33 В книге: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование (Труды Физико-технологического им. К.А. Валиева Российской академии наук) Том 30. Усл.печ.л. 9,1. Тираж 500 экз. 112 стр. ISBN 978-5-02-040925-5. DOI: 10.7868/9785020409255.
5. М.К. Руденко, А.В. Мяконьких, В.Ф. Лукичев. Особенности учета процесса десорбции при компьютерном моделировании криогенного травления кремния. стр. 34-50. В книге: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование (Труды Физико-технологического им. К.А. Валиева Российской академии наук) Том 30. Усл.печ.л. 9,1. Тираж 500 экз. 112 стр. ISBN 978-5-02-040925-5. DOI: 10.7868/9785020409255.
6. С.Н. Аверкин, В.Ф. Лукичев, А.В. Мяконьких, К.В. Руденко. Исследование возможности применения двухстадийного циклического плазменного процесса для анизотропного сквозного травления кремниевых пластин, стр. 51-63. В книге: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование (Труды Физико-технологического им. К.А. Валиева Российской академии наук) Том 30. Усл.печ.л. 9,1. Тираж 500 экз. 112 стр. ISBN 978-5-02-040925-5. DOI: 10.7868/9785020409255.