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

Научный совет Российской академии наук по физике низкотемпературной плазмы

ОТЧЕТ
Научного совета за 2021 год

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

МОСКВА 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по физике низкотемпературной плазмы 3
ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА 3
МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА.....4
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2021 г. 5
Валенсийский политехнический университет (Испания).....5
Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”.....6
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».....7
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Институт физических исследований и технологий (ИФИТ РУДН) 10
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» 12
ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХСРАН) 13
ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) 14
ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) 20
ФГУФИЦ Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН).....21
ФГБНУ Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН) 21
ФГБУН Институт проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН).....23
ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).....25
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) 39
ФГБУН Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН) 41

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 2021 г.:

1. XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. 1–6 марта 2021 г., п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, Россия.
2. XLVIII Международная конференция по физике плазмы и УТС. 15–18 марта 2021 г., г. Звенигород, Московской обл., Россия.
3. XX Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике. 25-27 мая 2021 г., г. Москва, Россия.
4. 15th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP 2021), 5-10 сентября 2021 г., г. Екатеринбург, Россия.
5. IX Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 13-17 сентября 2021 г., г. Иваново, Россия.
6. 16-я Школа по плазмохимии для молодых ученых РОССИИ и стран СНГ, 13-17 сентября 2021 г., г. Иваново, Россия.
7. XIII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», 2-4 ноября 2021 г., г. Казань, Россия.
8. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», 9–10 декабря 2021 г., Россия, Москва.

Планируемые 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. 2022 г., г. Москва, Россия.
4. 10-й Международный Симпозиум по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям, 3–7 октября 2022 г., г. Адлер, Сочи, Россия.
5. XII Всероссийская конференция по физической электронике (ФЭ-2022). 19-22 октября 2022, Махачкала, Россия.
6. 8-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты», 2-8 октября 2022 г., Томск, Россия.
7. XIV Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий». ноябрь 2022 г., г. Казань, Россия.
8. 13-я Международная конференция "Современные средства диагностики плазмы и из применение" ноябрь 2022 г., НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.
9. Научно-координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы», декабрь 2022 г., Москва, Россия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2021 г.

Валенсийский политехнический университет (Испания)

Camino de Vera s/n 46022 Valencia) Spain

Департамент прикладной математики

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

Определение статических и динамических свойств плотной тёплой материи методом моментов

Разработанный в 2017-20-х годах самосогласованный метод моментов [1,2] применен к исследованию статических и динамических свойств ферми-жидкостей заряженных частиц, называемых также плотной тёплой материи, характеризуемой отсутствием малых параметров, что делает применение непертурбативного метода моментов особенно уместным.

В частности, в работе [3] показано, как статическая диэлектрическая функция и другие статические характеристики плотных теплых заряженных ферми-жидкостей могут быть получены исключительно из статического структурного фактора системы. Тем самым метод, предложенный в [1,2] для исследования динамических свойств классической кулоновской и юкавовской плазмы, распространён на фермионные квантовые жидкости. В работе [3] было проведено успешное сравнение с численными данными, недавно полученными методом Монте-Карло и с использованием альтернативных теоретических подходов. Полученные результаты находятся в количественном согласии с данными численного моделирования, для получения которых требуются длительные параллельные вычисления на современных вычислительных комплексах, а для получения наших результатов потребовался всего лишь обычный ноутбук, причём мы можем проводить расчёты и при условиях, недоступных для численного моделирования. Поэтому можно считать, что нам удалось существенно дополнить названные симуляции.

Удалось добиться количественного согласия в отношении данных численного моделирования динамического структурного фактора и свойств коллективных возбуждений в плотном тёплом однородном неполяризованном электронном газе. Эти результаты были доложены на международных конференциях в Германии [4] и в России [5], а также на ежегодном научно-координационном Семинаре по физике неидеальной плазмы в Москве 9 декабря 2021 г.

Литература

1. Yu.V. Arkhipov, A. Askaruly, L. Conde, A.E. Davletov, Z. Donkó, D.Yu. Dubovtsev, P. Hartman, I. Korolov, And I.M. Tkachenko, “Direct determination of dynamic properties of Coulomb and Yukawa classical one-component plasmas”, Phys. Rev. Lett., **119** (2017) 045001. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.045001.
2. Yu. V. Arkhipov, A. Ashikbayeva, A. Askaruly, A. E. Davletov, D. Yu. Dubovtsev, Kh. S. Santybayev, S. A. Syzganbayeva, L. Conde, I. M. Tkachenko, “Dynamic characteristics of three-dimensional strongly coupled plasmas”, Phys. Rev. E **102**, 053215 (2020). doi: 10.1103/PhysRevE.102.053215.
3. J. Ara, Ll. Coloma, I. M. Tkachenko, “Static properties of a warm dense uniform electron gas”, Phys. Plasmas **28**, 112704 (2021); doi: 10.1063/5.0062259.
4. J. Ara, Ll. Coloma, I. M. Tkachenko, “Dynamic properties of classical and quantum one-component plasmas”, 17th Intl. Conf. on the Physics of Non-Ideal Plasmas, September 20 – 24, 2021, Dresden, Alemania, Book of abstracts, p. 26.
5. J. Ara, Ll. Coloma, I. M. Tkachenko, “Static and dynamic properties of classical and quantum plasmas”, II Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез

наноструктур», Россия, Казань, КНИТУ-КАИ, 1-4 декабря 2021 г. Сборник трудов, стр. 14.

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., профессор

Перспективы и программа научных исследований и разработок в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий

Обсуждаются возможные перспективы термоядерных исследований в первой половине XXI в. и их имплементации в практической сфере отечественной энергетики. Делается вывод о том, что термоядерные исследования способны выступать и уже выступают мощным драйвером научно-технологического прогресса, механизмом, стимулирующим развитие высокотехнологичных сегментов экономики страны, и возможным элементом ядерной энергетики будущего [1]. Описаны основные научные задачи, решаемые при реализации федерального проекта “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий” комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года”. Приводятся краткая история разработки и описание основных компонентов проекта, его участников, основных планируемых результатов его выполнения и возможных перспектив [2].

Трехмерное равновесие плазмы

Посредством использования смешанного представления магнитного поля получена компактная система уравнений, описывающая статическое трёхмерное равновесие плазмы в магнитном поле с тороидальными магнитными поверхностями. Система состоит из двух магнитных дифференциальных уравнений и аналога уравнения Грэда–Шафранова и допускает простой предельный переход к случаю осевой симметрии. Представлены некоторые примеры её решения [3].

Макроскопическая устойчивость плазменных течений в магнитном поле

Проведён нелокальный анализ собственных мод низкочастотных зональных течений (ЗТ) в тороидально вращающейся плазме. Доказано существование глобальных мод ЗТ, вызываемых вращением плазмы. Для некоторых типов равновесий ЗТ являются апериодически неустойчивыми, что, в свою очередь, служит источником дифференциального вращения плазмы [4].

Исследована устойчивость осесимметричных электростатических колебаний цилиндрического столба плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Показано, что возмущения с конечным продольным (вдоль магнитного поля) волновым числом могут быть апериодически неустойчивы, если профиль угловой скорости вращения ионов неоднороден по радиусу. Механизм указанной неустойчивости связан с действием силы Кориолиса на ионы и обусловлен конечным инерционным откликом электронов вдоль силовых линий магнитного поля [5].

Литература

1. Велихов Е.П., Ильгисонис В.И. Перспективы термоядерных исследований // Вестник РАН, 2021, т. 91, № 5, с. 470-478; Herald of the Russian Academy of Sciences, 2021, Vol. 91, No. 3, pp. 284–291. Doi: 10.31857/S0869587321050248
2. Ильгисонис В.И., Ильин К.И., Новиков С.Г., Оленин Ю.А. О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий // Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 963-969; Plasma Physics Reports, 2021, Vol. 47, No. 11, pp. 1085–1091. Doi: 10.31857/S0367292121110172

3. Ilgisonis V.I., Sorokina E.A. Compact equations for 3D plasma equilibrium // 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020), 2021, № 1222
4. Ilgisonis V.I., Lakhin V.P., Marusov N.A., Smolyakov A.I., Sorokina E.A. Low-frequency zonal flow eigen-structure in tokamak plasmas // Nuclear Fusion, 2021. Doi: 10.1088/1741-4326/ac3f4c
5. Marusov N.A., Sorokina E.A., Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I. Stability of electrostatic axisymmetric perturbations in rotating Hall plasmas // 47th EPS Conference on Plasma Physics (EPS 2021), 2021, p. 1004-1007

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Кафедра физики плазмы

Гаспарян Юрий Микаэлович, и.о. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Моделирование состояния поверхности мишени при реакционном распылении в импульсном магнетронном разряде

Разработана нестационарная модель степени окисления поверхности мишени в условиях импульсного распыления в магнетронном разряде. Модель представляет собой расширение известной стационарной модели Берга на случай быстропротекающих процессов. Результаты, полученные с помощью нестационарной модифицированной модели Берга для описания динамики распыления и оксидирования мишени Zr в среде Ar/O2 с разным содержанием кислорода, продемонстрировали хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными на основе анализа электрических характеристик (тока и напряжение) разряда.

Характерные временные рамки переходных процессов как в режимах постоянного тока, так и в импульсных режимах хорошо коррелируют с предсказаниями модели для динамики окисления и распыления мишени. Для полного распыления оксидного слоя, первоначально образовавшегося на поверхности мишени в период отсутствия импульсов, требуется время порядка 1 мс. С помощью модели объяснено влияние длительности паузы между импульсами на форму осциллограммы разрядного тока. Показано, что при длительности паузы, сравнимой со временем окисления поверхности мишени (рассчитанным в рамках модели), форма импульсов характеризуется резким передним фронтом и высоким пиком тока, в то время как снижение длительности паузы ведет к стабилизации тока вследствие неполного окисления поверхности.

Модель справедлива для широкого спектра материалов при их распылении в кислородо- и азотосодержащих средах.

Литература

Kaziev A. V., Kolodko D. V., Sergeev N. S. Properties of millisecond-scale modulated pulsed power magnetron discharge applied for reactive sputtering of zirconia // Plasma Sources Science and Technology. 2021. Vol. 30. P. 055002 / doi:10.1088/1361-6595/abf369

Изучение тепловых процессов на мишени магнетрона с теплоизолированным катодом в стационарном и импульсном режимах разряда

Экспериментально и теоретически исследованы тепловые свойства магнетронного разряда с неохлаждаемыми мишенями из меди и хрома для стационарного и длинноимпульсного (~ 10 мс) режимов работы. Построена численная модель горячей мишени с учетом тепловых потоков при воздействии разряда постоянного тока и мощной импульсной плазмы. Результаты моделирования проверены в экспериментах.

Температура мишеней измерялась непосредственно в процессе работы магнетронного разряда с помощью разработанного метода контактных термопар. Сначала

регистрировалось изменение температуры во времени для фиксированной приложенной мощности разряда. Было обнаружено, что результаты хорошо согласуются со значениями температуры, ожидаемыми в результате расчетов. При мощности 2 кВт для достижения температуры плавления меди требуется ~ 50 с. Измерены установившиеся значения температуры для ряда уровней мощности разряда. Полученная зависимость наглядно продемонстрировала, что основными механизмами теплового баланса мишени при высоких температурах являются поверхностное излучение и теплообмен за счет теплопроводности теплоизоляционных опор между мишенью и водоохлаждаемым катодом. Параметры магнетронного разряда с горячей мишенью в режиме постоянного тока сравнивались с мощным импульсным режимом с длительностью импульса 20 мс. Проанализирован также перспективный метод работы магнетронного разряда с горячей мишенью, заключающийся в подаче длительных (> 20 мс) мощных импульсов на мишень, предварительно нагретую в режиме постоянного тока, в период отсутствия импульсов.

Литература

Kaziev A. V., Kolodko D. V., Tumarkin A. V., Kharkov M. M., Lisenkov V. Yu., Sergeev N. S. Comparison of thermal properties of a hot target magnetron operated in DC and long HIPIMS modes // Surface & Coatings Technology. 2021. Vol. 409. P. 126889 / doi:10.1016/j.surfcoat.2021.126889

Разработка лазерных методов диагностики содержания водорода в поверхностном слое твердого тела на основе наносекундного лазерного излучения

Задача дистанционного измерения содержания изотопов водорода в твердом теле представляет интерес, например, для обеспечения контроля содержания трития в стенках термоядерных установок. С помощью лазерного излучения возможно локально проводить нагрев поверхности и в зависимости от мощности излучения обеспечивать либо десорбцию водорода из поверхностного слоя, либо производить его абляцию с образованием плазмы. Далее содержание водорода можно зарегистрировать либо с помощью масс-спектрометрических методов, либо по спектроскопии образовавшейся плазмы.

В настоящее время были опробованы измерения содержания дейтерия в модельных насыщенных дейтерием пленках вольфрама и титана с помощью наносекундного Nd:YAG лазерного излучения в диапазоне плотностей энергии 0.1–4 Дж·см$^{-2}$. Продемонстрирована высокая чувствительность метода при масс-спектрометрических измерениях изменения парциального давления дейтерия в рабочей камере. Моделирование с помощью кода TMAP7 показало, что большая часть захваченного газа выходит за время лазерного воздействия с глубины порядка менее 100 нм. При необходимости диагностики более толстых слоев необходимо использовать лазер с большей длительностью излучения или производить измерения в режиме абляции.

По результатам работ подготовлена принципиальная схема реализации данной диагностики в условиях токамака Глобус-М2.

Литература

Gasparyan, Y., Bulgadaryan, D., Efimov, N., Efimov, V., Krat, S., Popova, M., Sinelnikov, D., Vovchenko, E., Dmitriev, A., Elets, D., Mukhin, E., Razdobarin, A., Minaev, V., Novokhatsky, A., Sakharov, N., Varfolomeev, V. Laser-aided diagnostic of hydrogen isotope retention on the walls of the Globus-M2 tokamak. Fusion Engineering and Design, 172 (2021) 112882. doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112882

Разработка компактного абляционного импульсного плазменного ракетного двигателя для малых космических аппаратов формата CubeSat 3U

Опробованы две конструкции коаксиальных абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД) с внешней магнитной системой: с радиальным разрядом и разрядом вдоль оси симметрии. Внешняя магнитная система при этом является новым для такого класса двигателей элементом, позволяющим снизить требования к конденсаторной батарее системы питания. Показано, что при равном вкладе энергии в

разряд (на уровне 20 Дж) более высокий импульс плазмы (до 400 мкН·с) генерируется в конструкции с разрядом вдоль оси симметрии.

Опробовано новое рабочее тело, полиформальдегид, которое ранее не применялось в АИПД. Показано, что применение этого рабочего тела позволяет исключить одну из серьёзных проблем АИПД – карбонизацию рабочего тела при малых разрядных токах, способную привести к короткому замыканию электродов и полному выходу двигателя из строя. Тем не менее обнаружено, что для этого рабочего тела характерно появление на поверхности при малой плотности разрядного тока плёнки продуктов разложения, снижающих импульс плазмы, генерируемой за один разряд, до нескольких раз. Подобный эффект хоть и не приводит к выходу двигателя из строя, но негативно сказывается на его рабочих характеристиках.

Установлена критическая плотность разрядного тока, порядка 1,2 кА/см^2, выше которой образование плёнки продуктов разложения на поверхности нового рабочего тела не происходит. Данная плотность тока много ниже плотности тока, необходимой для исключения карбонизации традиционного рабочего тела АИПД – политетрафторэтилена. Кроме того, такая плотность тока может быть обеспечена при использовании конденсаторной батареи с малыми массогабаритными характеристиками, что является ключевым моментом при создании АИПД для космических аппаратов формата CubeSat 3U (максимальная допустимая масса всего космического аппарата – 4 кг).

Подготовлена двигательная установка на базе АИПД массой менее 0,5 кг для проведения лётных испытаний.

Предварительные результаты работы докладывались на Отраслевой научно-практической конференции «Космонавтика XXI века». (И. Егоров, Ю. Королева. «Компактные абляционные импульсные плазменные двигатели для малых космических аппаратов»).

Модификация приповерхностного слоя графита при интенсивном высокотемпературном ионном облучении

Изучалось взаимодействие ионов водородной и дейтериевой плазмы энергией 7 кэВ/ат и плотностей тока от 1.4×10^{20} до 1.4×10^{22} ион/см^{2}с с поверхностью мелкозернистого графита в диапазоне температур от 1000 до 2300 К.

Установлено, что, при облучении поверхности графита ионами с плотностью потока 3.5×10^{21} ион/см^{2}с и выше, инициируется интенсивная диффузия радиационных вакансий из зоны торможения облучающих ионов в глубину графита, и, как следствие, транспорт атомов углерода к поверхности. Это приводит к формированию пористого слоя в приповерхностных слоях графита. Образование пористого слоя происходит во всём исследованном температурном диапазоне. Толщина слоя растёт с ростом температуры, плотности тока ионов и температуры и превышает 1,5 мм при температуре 2300 К. Распыление при развитии пористого слоя наряду с атомами поверхности также и поступающих на поверхность атомов из глубины графита приводит к многократному увеличению скорости распыления графита механизмом радиационно-ускоренной сублимации.

Комплекс атомарного и ионно-плазменного облучения и термодесорбционного анализа

Спроектирован, собран и запущен в эксплуатацию Комплекс для исследования взаимодействия компонент плазмы с материалами ядерных и термоядерных установок.

Комплекс обладает следующими возможностями:

1. Облучение образцов материалов потоками атомов с тепловыми ($\ll$1 эВ) энергиями (j = 10^{14}-10^{15} ат/см^{2}с).
2. Облучение образцов материалов ионами и электронами плазмы (E = 0.01-2 кэВ, j = 10^{14}-10^{16} ион/см^{2}с). В качестве основных плазмообразцющих газов могут использоваться аргон, гелий, водород и дейтерий, при необходимости к основному плазмообразующему газу может быть добавлена примесь кислорода. Температура образца

в процессе облучения поддерживается постоянной или изменяется по заданной программе.

3. Проведение термодесорбиционного анализа с максимальной температурой нагрева образцов до 1650 К.

Отличительная особенность комплекса – высокая степень автоматизации, включающая:

- выполнение процесса подготовки установки к проведению экспериментов (откачка по заданной программе, прогрев и охлаждение стенок камер) и т.д. без участия оператора установки;
- проведение экспериментов по заданной программе;
- высокую степень обработки результатов эксперимента;
- возможность удалённого управления работой установки.

Автоматизация установки позволила повысить эффективность работы и обеспечить повторяемость и высокую точность результатов экспериментов.

Особенности формирования поверхностных слоев при осаждении атомов алюминия на вольфрам

Исследованы особенности формирования W-Al структур при осаждении на вольфрам атомов алюминия, распылённых ионами аргоновой плазмы с алюминиевой мишени, и характер их трансформации при термическом воздействии.

1. При осаждении атомов алюминия при температуре 500 К диффузия алюминия в вольфрам приводит к его распространению на глубину не менее 260 микрон.
2. Зафиксировано формирование интерметаллитного поверхностного слоя, предположительно, структуры $Al_{12}W$, толщиной в несколько микрон.
3. Выявлены кристаллы вольфрама с градиентным содержанием алюминия от десятков до единиц процентов, а также кристаллы с заполненными алюминием микроскопическим полостями.

Рекристаллизация интерметаллида происходит при 1020 К и сопровождается интенсивной десорбцией аргона, захваченного во время напыления алюминия. В диапазоне 1300-1500 К интерметаллид распадается с испарением примерно 40% алюминия, оставшегося аргона и водорода, захваченного из остаточного газа. Около 10% полного количества осаждённого алюминия остаётся в приповерхностной области, с концентрацией 2 ат. %, остальная часть алюминия диффундирует в вольфрам и находится там в виде раствора в вольфраме с концентрацией в среднем 0,4 ат. %.

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

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

Андреев Виктор Викторович, зам директора, доцент, к.ф.м.н.

Равновесие плазмы в магнитном поле

Получена система уравнений, описывающая статическое трёхмерное равновесие плазмы в магнитном поле с тороидальными магнитными поверхностями. Система состоит из двух магнитных дифференциальных уравнений и аналога уравнения Грэда–Шафранова и допускает простой предельный переход к случаю осевой симметрии. Представлены некоторые примеры её решения [1].

Структура и устойчивость плазменных течений в скрещенных электрическом и магнитном полях

Проведён нелокальный анализ собственных мод низкочастотных зональных течений (ЗТ) в тороидально вращающейся плазме токамака. Показано, что вращение плазмы приводит к формированию глобальных мод ЗТ на периферии плазменного шнура. Для

некоторых типов равновесий ЗТ являются апериодически неустойчивыми, что является источником дифференциального вращения плазмы [2].

Исследована устойчивость осесимметричных электростатических колебаний цилиндрического столба плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Показано, что возмущения с конечным продольным (вдоль магнитного поля) волновым числом могут быть апериодически неустойчивы, если профиль угловой скорости вращения ионов неоднороден по радиусу. Механизм указанной неустойчивости связан с действием силы Кориолиса на ионы и обусловлен конечным инерционным откликом электронов вдоль силовых линий магнитного поля [3].

Генерация плазменных сгустков с энергичной электронной компонентой в условиях авторезонансного взаимодействия

Экспериментально исследовано [4-6] пространственно-временное и спектрально-угловое распределение жесткого тормозного излучения создаваемого плазменными сгустками на газовой и твердотельных мишенях в режиме авторезонансного ускорения и удержания в длинном пробкотроне. Определены: динамика области локализации электронного сгустка в процессе его генерации и удержания, значение временной задержки между передним фронтом импульсного магнитного поля и импульса СВЧ (200 мкс), обеспечивающий оптимальный режим захвата электронов в режиме циклотронного авторезонанса, а также определить количество энергетических электронов в удерживаемом электронном вихре ($8\ 10^{10}$). Электроны генерируемого плазменного сгустка на стадии удержания сконцентрированы в тонком цилиндрическом слое радиус которого соответствует ларморовскому для типичных значений энергии и локализованы в минимуме пробкотрона. Спектр и характеристики рентгеновского излучения в продольном и поперечном направлениях по отношению к направлению магнитного поля имеют радикальные отличия как по интенсивности ($I_{поперч.}/I_{продол.} \sim 7$) так и по предельной энергии (60 кэВ и 250 кэВ, соответственно).

Получены усредненные уравнения движения электрона в комбинированной магнитной ловушке с ВЧ полем в цилиндрическом резонаторе в условиях циклотронного резонанса. На основе этих уравнений слаборелятивистском приближении рассмотрено движение частицы вблизи оси резонатора [7]. Получено приближенное условие захвата электронов в режим синхронного ускорения, связывающее темп нарастания магнитного поля с амплитудой ВЧ поля и начальной поперечной скоростью частиц. Показано, что энергия, набираемая электроном при авторезонансе не зависит от амплитуды ВЧ поля, что наблюдалось в экспериментах. При этом изменение энергии со временем происходит синхронно с изменением магнитного поля.

1. Ilgisonis V.I., Sorokina E.A. Compact equations for 3D plasma equilibrium // 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020), 2021, № 1222
2. Ilgisonis V.I., Lakhin V.P., Marusov N.A., Smolyakov A.I., Sorokina E.A. Low-frequency zonal flow eigen-structure in tokamak plasmas // Nuclear Fusion, 2021, doi: 10.1088/1741-4326/ac3f4c
3. Marusov N.A., Sorokina E.A., Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I. Stability of electrostatic axisymmetric perturbations in rotating hall plasmas // 47th EPS Conference on Plasma Physics (EPS 2021), 2021, p. 1004-1007
4. V.V. Andreev, A.A. Novitsky, A.M. Umnov Autoresonance phenomenon in a long mirror //Physice of Plasmas 28, 2021, DOI: 10.1063/5.0056531
5. V.V. Andreev, D. V. Chuprov Modeling and design of an re-configurable isolated remote for plasma experiments with hard-real-time synchronization // Discrete & Continuous Models & Applied Computational Science, т.29, № 3, p.205-220
6. Андреев В.В., Новицкий А.А., Умнов А.М Характеристическое и тормозное излучение в плазме с энергетическим электронным вихрем удерживаемой в пробкотроне//

Материалы XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 15–19 марта 2021

7. В.П. Милантьев Захват электронов в режим синхронного ускорения в комбинированной магнитной ловушке// Материалы XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 15–19 марта 2021

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

(Физический факультет)

367000, Махачкала, Россия, ул. М. Гаджиева 43-а

Научно-образовательный центр «Физика плазмы»

Ашурбеков Н.А., д.ф.-м.н., профессор

Разработка и исследование плазменных реакторов на основе плазменно-пучкового разряда (ППР) с щелевым катодом для прецизионных плазма-стимулированных технологий атомно-слоевого осаждения и травления поверхности материалов наноэлектроники

Разработан и исследован плазменный реактор на основе наносекундного плазменно-пучкового разряда с полым катодом для применения в прецизионных технологиях атомно-слоевого травления материалов наноэлектроники. Разработана и реализована цифровая модель плазменного реактора, учитывающая кинетические и плазмо-химические процессы в плазменном реакторе в зависимости от типа конструкции и режимов создания плазмы.

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

Выполнены экспериментальные исследования спектрально-флуоресцентных и диффузно-оптических характеристик биотканей при воздействии на них CAP. Выявлены потенциальные флуорофоры и определены коэффициенты оптического поглощения и транспортного рассеяния биотканей.

Список публикаций

1. Shubo Li, K. M. Rabadanov, E. A. Bogdanov, A. A. Kudryavtsev, N. A. Ashurbekov, Chengxun Yuan and Zhongxiang Zhou. Features of the EEDF formation in the dusty plasma of the positive column of a glow discharge. *Plasma Sources Science and Technology*. 2021. V. 30, Issue 4. 047001 (11 pp). DOI: 10.1088/1361-6595/abef16.
1. 2. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, M. Z. Zakaryaeva, G. S. Shakhsinov and K. M. Rabadanov. The dynamics of the formation of initial stages of a transverse nanosecond discharge with an extended slot cathode in argon. Journal of Physics. Conference Series. 2021. 2064 (2021) 012014. DOI:10.1088/1742-6596/2064/1/012014.
2. N. A. Ashurbekov, Z. M. Isaeva, K. M. Rabadanov, G. S. Shakhsinov, A. A. Murtazaeva and E. Kh. Israpov. Investigation of the role of chemically active radicals in the antibacterial properties of a low-temperature plasma jet at ambient pressure mixed with argon and air. Journal of Physics. Conference Series. 2021. 2064 (2021) 012109. DOI:10.1088/1742-6596/2064/1/012109.
3. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, G. Sh. Shakhsinov, M. B. Kurbangadzhieva, K. M. Rabadanov. Formation of asymmetric optical transmission spectra of a nanosecond discharge in extended shielded tubes upon resonant interaction of short laser pulses with excited neon atoms. Proceedigs of SPIE. 2021. 1208617. DOI: 10.1117/12.2610779.
4. 5. E. Kh. Israpov, K. M. Giraev, N. A. Ashurbekov, K. M. Rabadanov and M. A. Magomedov. The impact of laser-induced thermocoagulation effects on the optical spectra of brain tissues. Journal of Physics. Conference Series. 2021. 2103 (2021) 012045. DOI:10.1088/1742-6596/2103/1/012045.

5. N. A. Ashurbekov, Z. M. Isaeva, G. Sh. Shakhsinov, K. M. Rabadanov., A. A. Murtazaeva and E. Kh. Israpov. Investigation of the role of chemically active radicals in the antibacterial properties of a low-temperature plasma jet at ambient pressure mixed with argon and air. XV International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP-2021). 5-10 September 2021 - Ekaterinburg: Участок оперативной полиграфии Уральского отделения РАН, 2021. p. 203.
6. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, M. Z. Zakaryaeva, G. S. Shakhsinov and K. M. Rabadanov. The dynamics of the formation of initial stages of a transverse nanosecond discharge with and extended slot cathode in argon. XV International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP-2021). 5-10 September 2021 - Ekaterinburg: Участок оперативной полиграфии Уральского отделения РАН, 2021. p.38.
7. N.A Ashurbekov, K.O Iminov, G.Sh Shakhsinov, M.B Kurbangadzhieva, K.M. Rabadanov. Formation of asymmetric optical transmission spectra of a nanosecond discharge in long shielded discharge tubes at resonance interaction of short laser pulses with excited neon atoms. XV International conference on pulsed lasers and laser applications – AMPL-2021, 12-17 September 2021 - Tomsk: Издательство "STT" (Scientific&Technical Translations). 2021. p. 109.
8. Исрапов Э.Х., Гираев К.М., Ашурбеков Н.А., Магомедов М.А. Влияние эффекта лазерно-индуцированной термокоагуляции на оптические спектры тканей головного мозга. International Conference PhysicA, 18-22 October 2021 - Санкт-Петербург: Издательско-полиграфический центр Политехнического университета. 2021. С.60-61.
9. Н.А.Ашурбеков, К.М.Рабаданов, Г.Ш.Шахсинов, А.А.Муртазаева, З.М.Исаева. Численное моделирование кинетических процессов в струйных источниках холодной плазмы для медицинских приложений. Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» 12-17 сентября 2021 - Махачкала. С.102-104.
10. Свидетельство о регистрации секрета производства (ноу хау): Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Рабаданов М.Х., Шахсинов Г. Ш., Муртазаева А.А., Исаева З. М. Низкотемпературный источник плазменной струи атмосферного давления в смеси воздуха с аргоном для плазменной медицины // Правообладатель ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный университет". Свидетельство о регистрации секрета производства (ноу-хау) №78. Дата регистрации 16.06.2021г.

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

119991, Москва. Ленинский проспект , 29

Лаборатория плазмохимии и физикохимии импульсных процессов

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

Исследование начальных стадий микроволнового разряда в жидких углеводородах

Оптическими методами (спектрограф, высокоскоростная камера, фотодиод) с временным разрешением исследованы начальные стадии СВЧ-разряда (2,45 ГГц, 200-500 Вт) в жидких алканах (C_nH_{2n+2}). Нефрас S2 80/120 (смесь легких углеводородов с температурой кипения от 33 до 205 ° С) был использован в качестве представителя алканов. Разряд зажигался в жидкости на конце молибденовой антенны при атмосферном давлении над жидкостью. Излучение разряда представляет собой последовательность световых импульсов разной формы и амплитуды, случайно распределенных во времени. Минимальная длительность импульса 0,5 мс. На временах порядка 1 мс в спектре присутствуют полосы излучения молекулы C_2, линии водорода и иона C^+, и отсутствует

континуум, связанный с излучением образованных твердых углеродсодержащих частиц. В ряде случаев был зарегистрирован аномальный спектр молекулы C_2, в котором последовательности, обычно наблюдаемые в разрядах, отсутствуют.

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

Исследовано влияние твердых частиц, образующихся в плазме, на функцию распределения электронов по энергиям и ионный состав плазмы. Основой является нульмерная нестационарная модель микроволнового разряда в жидком н-гептане при атмосферном давлении с непрерывной инжекцией аргона в область плазмы с учетом образования твердых частиц и их зарядки.

Показано, что:

1. Наличие твердых частиц, образующихся в разряде, не влияет на функцию распределения электронов по энергиям при концентрациях твердых частиц $N_s < 7\times10^{11}$ см$^{-3}$).
2. Положительные ионы расположены по убывающим концентрациям как: $C_2H_2^+$, $C_2H_4^+$, H_3^+, CH_4^+, CH_3^+, $C_3H_6^+$. Ион ацетилена - главный положительный ион. Мощность разряда не влияет на ионный состав плазмы. Наряду с этими ионами в присутствии аргона появляются ионы ArH^+, Ar^+, Ar_2^+. Концентрация этих ионов увеличивается с увеличением концентрации аргона, но остается меньше, чем концентрация иона $C_2H_2^+$.

Литература

1. Yu.A. Lebedev, G.V. Krashevskaya, T.S. Batukaev, I.L. Epstein Light emission of microwave discharge in liquid hydrocarbons at the initial stages of the development of the discharge. Plasma Processes Polym. 2021, v. 18. e2100051. https://doi.org/10.1002/ppap.202100051
2. Lebedev Yu. A., Tatarinov A. V., Epshtein I. L. Addendum: Effect of charging solid particles on their growth process and parameters of microwave discharge in liquid *n*-heptane (2020 *Plasma Sources Sci.Technol.* 29 065013) Plasma Sources Sci. Technol. **30** (2021) 059401 (8pp). https://doi.org/10.1088/1361-6595/abea2b.

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

634055, г. Томск, Россия, просп. Академический, д. 2/3

Лаборатория плазменных источников

Окс Ефим Михайлович, зав. лаб., г.н.с., д.т.н.; Юшков Георгий Юрьевич, г.н.с., д.т.н.; Савкин Константин Петрович, с.н.с., к.т.н.

Динамика положительного столба разряда атмосферного давления в потоке аргона с током до 1 А

В результате скоростной съёмки и быстродействующей оптической спектроскопии выявлено, что локализация положительного столба каждого последующего импульса разряда практически повторяет локализацию в предшествующем импульсе, что является следствием присутствия остаточной плазмы, способствующей пробою разрядного промежутка и развитию токового канала практически в том же месте, а не в области кратчайшего расстояния между катодом и анодом. Скорость изменения протяженности положительного столба, которая составила 4±0.5 м/с, что соответствует скорости истечения газовой струи.

Функция интегрального свечения, полученная в результате суммирования всех монохроматических составляющих излучения частиц вида Ar I, Ar II, N_2, N_2^+ и OH от времени, практически полностью определяется излучением атомов Ar I. Анализ этой зависимости на фоне осциллограммы импульса тока разряда позволяет оценить динамику оптического излучения плазмы положительного столба разряда атмосферного давления.

Практическим аспектом полученных результатов является реализация простого устройства, в отношении конструктивного исполнения и условий электропитания, способного конкурировать с барьерным разрядом и СВЧ-факельным разрядом в технологиях обработки поверхности.

Литература

1. Savkin K.P., Oks E.M., Sorokin D.A, Yushkov A.Yu., Yushkov G.Yu., Sintsov S.V., Vodopyanov A.V., Positive column dynamics of a low-current atmospheric pressure discharge in flowing argon // Plasma Sources Science and Technology. – in print; https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/ac309a

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

Убегающие электроны при формировании положительного стримера в резко неоднородном электрическом поле

Впервые выполнены прямые измерения тока убегающих электронов (УЭ), генерируемых при формировании положительного стримера в резко неоднородном электрическом поле. Имелся разрядный промежуток «плоскость–остриё». 1*a*. Анод-остриё имел форму конуса и был изготовлен из сетки. Зазор 5 мм. Камера заполнялась гелием при p=100 кПа. В эксперименте I записывались временные развёртки развития разряда с помощью стрик-камеры Hamamatsu (разрешение ~10 пс) и соответствующие осциллограммы напряжения и тока разряда. В эксперименте II записывались осциллограммы напряжения и тока УЭ. Применялся осциллограф Keysight (6 ГГц, 20 Гвыб/с). Полученные осциллограммы накладывались и сравнивались.

Формирование положительного стримера от острийного анода к плоскому катоду. сопровождается протеканием существенного предпробойного тока, вызванного быстрым (за ~0.1 нс) перераспределением электрического поля в промежутке. Импульс тока УЭ состоит из двух пиков: первый – генерация УЭ в предпробойной стадии, второй – генерация УЭ в катодном слое после пробоя. Время нарастания тока разряда и первого пика тока УЭ соответствует переходной характеристики осциллографа (≈100 пс). Реальное время нарастания, а также длительность первого пика тока УЭ вероятно не превышает нескольких десятков пикосекунд.

Момент генерации УЭ в предпробойной стадии определялся с учётом времени пролёта УЭ от промежутка до коллектора (24 мм). Для этого нужно знать энергию УЭ. Установлено, что энергия электронов в первом пике лежит в диапазоне от 10 до 32 кэВ (напряжение пробоя 42 кВ), а во втором пике – меньше 10 кэВ. Вероятнее всего УЭ генерируются в высоком электрическом поле вблизи анода на этапе развития лавин благодаря резко неоднородному распределению потенциала.

Литература

1. Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Shklyaev V.A., Sorokin D.A. Generation of runaway electrons in plasma after a breakdown of a gap with a sharply non-uniform electric field strength distribution // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – Vol. 54. – No 30. – P. 304001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/abfddc

Соснин Эдуард Анатольевич, в.н.с, д.ф.-м.н.; Скакун Виктор Семенович, с.н.с., к.ф.-м.н.; Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н.; Авдеев Сергей Михайлович, ведущий инженер, к.ф.-м.н.; Панарин Виктор Александрович, н.с., к.ф.-м.н.; Печеницын Дмитрий Сергеевич, техник

Антивирусный коротковолновый облучатель-рециркулятор ОРВИК

Разработан и создан высокопроизводительный облучатель и рециркулятор воздуха ОРВИК, в основе которого лежит KrCl-эксилампа с рабочей длиной волны в диапазоне 220–224 нм. Портативный (15×15×40 см^3) и удобный прибор для обеззараживания воздуха помещений от вирусных и бактериальных аэрозолей. ОРВИК эффективно инактивирует вирусные частицы по сравнению с ртутными лампами низкого давления. ОРВИК питается от стандартной промышленной сети, может быть выполнен с различными типоразмерами. Может использоваться в непрерывно.

Разработка предназначена для обеззараживания воздуха в помещениях с повышенным риском распространения возбудителей инфекций: в лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных и общественных организациях и других помещениях с большим скоплением людей. Может также быть использована для обеззараживания воздуха производственных и складских помещений, парикмахерских залов, косметических, маникюрных и педикюрных кабинетов, спортивных, детских, учебных, жилых и других помещений без присутствия или с присутствием людей. Эффект внедрения разработки – снижение заболеваемости населения от инфекций вирусной этиологии.

Преимущества по сравнению с известными разработками: благодаря использованию коротковолнового ультрафиолетового излучения с максимумом на длине волны 222 нм обладает повышенной эффективностью обеззараживания вирусных инфекций по сравнению с известными облучателями на основе ртутных ламп низкого давления; экологичность: колба лампы не содержит ртути; широкий диапазон рабочих температур и влажности; озонобезопасен (это решение запатентовано); срок службы не зависит от количества циклов включения / выключения; обеспечивает по выбору работу в режиме рециркулятора воздуха (в присутствии людей) или в режиме открытого облучателя воздуха (в отсутствии людей).

Литература

1. Патент на полезную модель RU 205117 U1. Источник излучения. Заявка № 2020143326. Приоритет: 25.12.2020. Опубликовано 28.06.2021. Бюл. № 19.)
2. ноу-хау, зарегистрированные в Институте (№№ ЛОИ-03-07-2020, ЛОИ-27-08-2020, ЛОИ-12-09-2019).

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники
Ашурова Камилла Тахировна, техник; Воробьёв Максим Сергеевич, с.н.с., к.т.н.; Девятков Владимир Николаевич, н.с.; Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Москвин Павел Владимирович, м.н.с.; Шин Владислав Игоревич, инженер, аспирант

Динамическое управление мощностью электронного пучка субмиллисекундной длительности для контроля скорости ввода энергии в поверхность металлических материалов

Экспериментально и теоретически продемонстрирован уникальный способ управления мощностью субмиллисекундного электронного пучка в течение его импульса в источнике электронов с сеточным плазменным катодом. Такой способ, основанный на использовании амплитудно- и широтно-модулированного тока дугового разряда, ответственного за генерацию эмиссионной плазмы, позволяет генерировать субмиллисекундные пучки переменной мощности (до 10 МВт при максимальной скорости изменения не более 0,5 МВт/мкс), которые, в том числе, можно использовать для обработки различных металлических материалов с целью изменения функциональных свойств их поверхности с возможностью управления скоростью ввода энергии пучка в материал. Разработанный способ расширяет технологические возможности импульсной электронно-пучковой модификации поверхности материалов и изделий и перспективен для использования в промышленности. Представлен пример генерации пучка, позволяющий удерживать температуру поверхности образца силумина на уровне

T≈1000 °C с коэффициентом пульсации температуры менее 15%, который, может быть существенно уменьшен при использовании более прецизионного источника электропитания разряда.

Литература

1. М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекудной длительности в источнике с плазменным катодом // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47. – вып. 10. – С. 38-42. DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719
2. P.V. Moskvin, V.N. Devyatkov, M.S. Vorobyov, V.I. Shin, I.V. Lopatin, N.N. Koval, S. Yu. Doroshkevich, M.S. Torba. Electron beam generation in an arc plasma source with an auxiliary anode plasma // Vacuum. – 2021. – V. 191. – P. 110338. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110338
3. M. Vorobyov, T. Koval, V. Shin, P. Moskvin, My Kim An Tran, N. Koval, K. Ashurova, S. Doroshkevich, M. Torba. Controlling the Specimen Surface Temperature During Irradiation with a Submillisecond Electron Beam Produced by a Plasma-Cathode Electron Source // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – V. 49. – № 9. – P. 2550 – 2553. DOI: 10.1109/TPS.2021.3089001

Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Крысина Ольга Васильевна, с.н.с., к.т.н.; Прокопенко Никита Андреевич, аспирант, м.н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.

Разработка ионно-плазменного метода формирования пленок высокоэнтропийных сплавов

В результате выполненных исследований, направленных на разработку метода формирования пленок высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) и покрытий электродуговым плазменно-ассистированным осаждением, получены пленки высокоэнтропийного сплава элементного состава: 25.7Ti-17.0Al-21.9Nb-22.3Zr-13.6Cu толщиной (3-5) мкм. Показано, что пленки являются рентгеноаморфным материалом, имеют многослойную (толщина слоев (12-23) нм) наноразмерную (размер кристаллитов (2-3) нм) структуру и обладают высокой твердостью (12-14) ГПа и модулем Юнга (230-310) ГПа.

Установлено, что пленка ВЭС, облученная импульсным электронным пучком, имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Размер ячеек изменяется в пределах от 300 нм до 600 нм. Ячейки (β-NbZrTiAl) окаймлены прослойками второй фазы (CuZr). Толщина прослоек изменяется в пределах (20-110) нм. Показано, что твердость пленок, облученных электронным пучком, изменяется в пределах (6,9 - 8,8) ГПа и снижается при увеличении плотности энергии пучка электронов.

Литература

1. Koval N.N., Ivanov Y.F. Shugurov V.V., Teresov A.D., Petrikova E.A., Rygina M.E. Regularities of structure and properties modification of the steel surface layer as a result of high-cycle high-speed melting of the "film (Si + Nb) / (steel) substrate" system by an intense pulsed electron beam. // Journal of Physics: Conference Series, 2021, V. 1799, P. 012017. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012017
2. Petrikova E.A., Ivanov Y.F., Teresov A.D., Rygina M.E. Thermal stability of the hypereutectic silumin structure subjected to a pulsed electron beam treatment. // Journal of Physics: Conference Series, 2021, V. 1799, P. 012022. doi:10.1088/1742-6596/1799/1/012022
3. N.A. Prokopenko, E.A. Petrikova, V.V. Shugurov, M.S. Petykevith, Yu.F. Ivanov, V.V. Uglov. Formation of high-entropy alloy by methods of ion-plasma technologies. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021, V. 1093, P. 012025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1093/1/012025

4. V.E. Gromov, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 110 c. ISBN 978-3-030-78364-8 (eBook) http://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8

Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.; Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Тересов Антон Дмитриевич, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.

Разработка электронно-ионно-плазменного метода формирования термически стабильных слоев, содержащих нитриды и силициды тугоплавких металлов

Осуществлена модернизация плазмогенераторов и блоков электропитания установки «Комплекс», разработанной в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН, позволившая в едином вакуумном цикле провести многоцикловую электронно-ионно-плазменную модификацию поверхности стали 40Х, заключающуюся в нанесении покрытия Si (0.2 мкм)–Nb (0.2 мкм), последующем высокоскоростном плавлении системы «пленка (Si-Nb)/сталь 40Х-подложка» импульсным электронным пучком и азотировании в плазме несамостоятельного дугового разряда плазмогенератора «ПИНК» в электронно-ионном режиме.

Выявлен режим обработки (облучение системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком (20 Дж/см^2, 200 мкс, 3 имп), 5 циклов, и последующее азотирование при 823 К, 1 ч, позволивший (по отношению к стали 40Х в исходном состоянии) увеличить микротвердость стали более чем в 4 раза (до 12.6 ГПа), снизить параметр износа более чем в 300 раз (до $1.4\cdot10^{-7}$ мм^3/Н·м) и уменьшить коэффициент трения в 1.2 раза (до 0.35). Установлено, что достигнутые высокие механические и трибологические свойства модифицированной стали обусловлены формированием в поверхностном слое многофазной структуры, содержащей нанокристаллические (менее 100 нм) включения нитридов и силицидов железа, хрома и ниобия.

Разработанный метод может быть использован для поверхностного модифицирования металлов и сплавов с целью придания материалу высоких физико-механических и трибологических свойств.

Литература

1. N.N. Koval, Yu.F. Ivanov, V.V. Shugurov, A.D. Teresov, E.A. Petrikova. Multi-cycle of AISI 5135 steel modification by irradiation of the "film (Si (0.2 μm) + Nb (0.2 μm))/(AISI 5135 steel) substrate" system with an intense pulsed electron beam. // Journal of Physics: Conference Series, 2021, V. 2064, P. 012041. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012041
2. V.V. Shugurov, N.N. Koval, Yu.F. Ivanov, A.D. Teresov, E.A. Petrikova. Formation of a silicon-niobium-based surface alloy using electron-ion-plasma surface engineering. // Journal of Physics: Conference Series, 2021, V. 2064, P. 012067. https://doi.org/10.1088/1742 6596/2064/1/012067

Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Шугуров Владимир Викторович, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.

Комплексное электронно-ионно-плазменное борирование стали.

Разработан метод и осуществлена комплексная обработка стали, сочетающая плазменно-ассистированное формирование системы «пленка (бор/металл (Ti, Zr или Cr))/сталь (12Х18Н10Т) подложка» и последующее облучение импульсным (50 мкс, 170 А, 15 кВ) электронным пучком с плотностью энергии 20 Дж/см^2. Выявлено формирование поверхностного слоя толщиной до 10 мкм с многослойной (3-4 слоя) многофазной (бориды титана, циркония, хрома и железа) субмикро- нанокристаллической структурой, обладающего высокими механическими и трибологическими свойствами. Показано, что

после модификации поверхности параметр износа уменьшился более чем в 30 раз по сравнению с исходной сталью. Метод может быть использован для поверхностного модифицирования металлов и сплавов с целью придания материалу высоких физико-механических и трибологических свойств.

Литература

1. V.V. Shugurov, Yu.F. Ivanov. Deposition of boron films using a discharge system with a hot boron anode // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 2064 (2021) 012068. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012068
2. Yu.F. Ivanov, V.V. Shugurov, A.D. Teresov, E.A. Petrikova, M.S. Petyukevich, O.S. Tolkachev. Low-temperature formation of boron-containing layers and coatings by electron-ion-plasma method // Journal of Physics: Conference Series 1799 (2021) 012010 IOP Publishing https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012010

Иванов Юрий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Тересов Антон Дмитриевич, н.с.; Петрикова Елизавета Алексеевна, м.н.с.

Разработка комплексного электронно-ионно-плазменного метода азотирования стали

Разработан комплексный метод модифицирования поверхностного слоя стали, сочетающий облучение материала импульсным (200 мкс) электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см^2 и последующее азотирование в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления с накаленным катодом, позволяющий кратно повышать микротвердость и износостойкость материала. Выявлен оптимальный режим генерации плазмы азота при газовом разряде низкого давления для формирования протяженных (до 40 мкм) азотсодержащих слоев в условиях электронно-ионного (элионного) метода азотирования стали. Показано, что твердость поверхности стали 20Х23Н18 после комплексного модифицирования возрастает более чем в 3 раза, а износостойкость более чем на 2 порядка. Метод может быть использован для поверхностного модифицирования металлов и сплавов с целью придания материалу высоких физико-механических и трибологических свойств.

Литература

1. Y. Ivanov, E. Petrikova, A. Teresov, S. Lykov, O. Tolkachev, M. Rygina. Structure and properties of high-chromium steel irradiated with a pulsed electron beam and nitrided in a low-pressure gas discharge plasma // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 2064 (2021) 012043. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012043

Лаборатория газовых лазеров

Панченко Юрий Николаевич, зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н.; Коновалов Иван Николаевич, с.н.с., к.ф.-м.н.; Лосев Валерий Федорович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Пучикин Алексей Владимирович, н.с.

Азотный лазер с продольной накачкой

Разработан и создан электроразрядный азотный лазер с продольной накачкой, имеющий энергию излучения до 3 мДж и длительность импульса 18 нс, данные параметры существенно превышают параметры имеющихся аналогов. Максимальная пиковая мощность выходного пучка составляла 80 кВт. Генерация излучения развивается около внутренней стенки разрядной трубки в кольце шириной ~ 2.5 мм, площадь сечение лазерного пучка составляет 0.6 см^2. При замене в разрядной трубке азота на атмосферный воздух (и зарядном напряжении 24 кВ) энергия в импульсе излучения равна 1.6 мДж при длительности импульса t = 12 нс. Повышение энергии генерации обусловлено длительным горением объемной формы разряда при максимальной удельной плотности тока ~2.75±0.25 кА/см^2. УФ-излучение данного лазера используется в лидарной системе для

фотофрагментации исследуемых опасных и вредных веществ в атмосфере. Применение в области спектроскопии, обработки материалов, научных исследований. Лазер готов к практическому применению.

Литература

1. Пат. 206537 U1 РФ МПК H01S 3/0975 / И. Н. Коновалов, Ю. Н. Панченко, В. Ф. Лосев, А. В. Пучикин. Газоразрядное устройство с продольно-поперечным разрядом; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИСЭ СО РАН. – 2021113333; заявл. 11.05.2021; опубл. 15.09.2021 – Бюл. № 26.

Монографии

1. Xizhang Chen, Sergey Konovalov, Victor Gromov, Yurii Ivanov. Surface Processing of Light Alloy Subject to Concentrated Energy Flows. Science Press, Springer, Beijing. - 2021. – 218 c. ISBN 978-981-33-4228-6 (eBook) http://doi.org/10.1007/978-981-33-4228-6
2. V.E.Gromov, S.V.Konovalov, Yu.F.Ivanov, K.A.Osintsev. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 110 c. ISBN 978-3-030-78364-8 (eBook) http://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8

ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН)

119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Теоретический отдел

Майоров Сергей Алексеевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

О влиянии продольного магнитного поля на диффузию электронов при дрейфе в неоне

Выполнены расчеты характеристик дрейфа электронов в неоне для случая постоянного и однородного электрического и магнитного полей, направленных параллельно. Приведенные напряженности электрического поля 10, 20, 30, 50 и 100 Тд, при индукции магнитного поля до 10 Тл при плотности газа 10^{17} атомов в $см^3$ представляют основной интерес для физики газоразрядной плазмы во многих приложениях. Путем вычислительного эксперимента получены основные характеристики дрейфа, включая неупругие процессы и выполнен анализ энергобаланса электронов. Проанализированы основные закономерности изменения коэффициентов поперечной диффузии в зависимости от параметра Холла, проведено сравнение с известными аналитическими формулами. Для коэффициента поперечной диффузии получена аппроксимационная формула, погрешность которой совпадает с оценкой погрешности результатов численного эксперимента.

Аналитическая аппроксимация сечений столкновений электронов с атомами инертных газов и паров металлов

На основе обзора имеющихся данных по сечениям столкновений электронов с атомами благородных газов, водорода, паров металлов и их критического анализа выбраны наиболее надежные. Для них подобраны формулы аналитической аппроксимации сечений упругих (транспортных) и неупругих (возбуждения из основного состояния и ионизации) столкновений электронов с атомами благородных газов, которые имеют погрешность того же порядка, что и имеющиеся в литературе экспериментальные и теоретические данные.

Литература

1. S. A. Mayorov, On the Effect of Longitudinal Magnetic Field on Electron Diffusion during Drift in Neon Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2021, Vol. 48, No. 4, pp. 107–113., DOI: 10.3103/S1068335621040047

2. Р. И. Голятина, С. А. Майоров Сечения столкновений электронов с атомами инертных газов, Прикладная физика, 2021, № 3, 11-16, DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-11-16
3. Golyatina, R.I.; Maiorov, S.A. Analytical Cross Section Approximation for Electron Impact Ionization of Alkali and Other Metals, Inert Gases and Hydrogen Atoms. Atoms 2021, 9, 90. https://doi.org/10.3390/ atoms9040090

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 атомах для контроля измерений

Обнаруженный ранее закон подобия по атомному номеру орбитальных энергий электронов применяется к анализу экспериментальных и теоретических энергий связи в атомах группы лантана – лантанидах (лантаноидах) [1]. Обсуждается имеющийся разброс экспериментальных данных из разных источников. Анализ энергий связи в *K, L, M, N* оболочках проводится на основе двух функций-коэффициентов, которые при выполнении закона подобия представляют собой гладкие монотонные зависимости. Показано, что при правильном порядке заполнения оболочки отклонение от такой зависимости указывает на ошибку измерения.

Закономерности в потенциалах ионизации многозарядных ионов

Для элементов периодической системы с атомными номерами $55 \leq Z \leq 95$ рассмотрены имеющиеся расчетные данные по потенциалам ионизации ионов в основном состоянии с числом электронов $N_e \leq 46$ [2]. Установлена их монотонная зависимость в приведенных координатах от атомного номера Z и числа электронов N_e. Предложена полиномиальная аппроксимация этих зависимостей, дающая достаточно точную аналитическую оценку потенциалов ионизации всех ионов рассмотренного диапазона.

Литература

1. G.V.Shpatakovskaya. Lanthanum group: Detection and correction of errors in orbital binding energy measurements of internal shells. J. Phys.: Conf. Ser. 2021 **1787** 012002 [doi:10.1088/1742-6596/1787/1/012002]
2. Г.В.Шпатаковская. Закономерности в потенциалах ионизации многозарядных ионов тяжелых элементов. Письма в ЖЭТФ, **114**(12), 798–801 (2020) [doi:10.31857/S1234567821240034]

ФГБНУ Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)

603950, Нижний Новгород. Ул. Ульянова, 46
Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей
Скалыга Вадим Александрович, зам. директора по научной работе, г.н.с., д.ф.-м.н.
И.В. Изотов, В.А. Скалыга, С.В. Голубев, С.С. Выбин, Е.М. Киселёва, Р.Л. Лапин, А.Ф. Боханов, М.Ю. Казаков, С.П. Шлепнёв М.Ю. Глявин, И.В. Плотников, А.Г. Еремеев, А.Г. Лучинин, М.Д. Проявин, М. В. Морозкин, В.И. Белоусов, М.Ю. Шмелев, Д.И. Соболев Е.А. Копелович, М.М. Троицкий, К.А. Журин, А.Ю. Новиков, И.А. Варыгин, М.В. Кузнецов О.В. Палашов, Е.А. Миронов

Протонный инжектор нового поколения для современных ускорительных источников нейтронов

Разработан и успешно испытан уникальный источник протонных (и дейтронных) пучков непрерывного действия “GISMO”. Основой источника служит разряд, поддерживаемый в магнитной ловушке микроволновым излучением с частотой 28 ГГц и мощностью до 10 кВт в условиях электронно-циклотронного резонанса. Удержание плазмы осуществляется в прямой ловушке на основе постоянных магнитов. Использование гиротрона обеспечивает поддержание разряда с рекордно высоким для ЭЦР ионных источников удельным энерговкладом (до 200 Вт/см^3), что позволяет создавать плазму с плотностью до 10^{13} см$^{-3}$ и оптимальной для диссоциации и ионизации водорода температурой 50-100 эВ. Такой разряд позволяет получать потоки плазмы из ловушки с плотностью до 1.5 А/см^2. В экспериментах были извлечены непрерывные и импульсные протонные пучки с током до 100 мА через апертуру 3 мм и RMS нормализованным эмиттансом на уровне 0.1 pi*mm*mrad. Впервые продемонстрирована возможность генерации чистого протонного пучка, без молекулярных ионов.Созданный ионный источник не имеет аналогов по качеству и составу генерируемых пучков. Протонные и дейтронные пучки с подобными характеристиками открывают новые перспективы для создания уникальных нейтронных источников разного масштаба, от мощных компактных D-D нейтронных генераторов до самых мощных источников испарительного типа (spallation sources). В частности, источник GISMO рассматривается как возможный протонный инжектор в новый ускорительный комплекс одного из самых мощных нейтронных источников в мире - ISIS-II, разрабатываемый в Лаборатории Резерфорда (Rutherford Appleton Laboratory, STFC, UK).

Литература

1. V. Skalyga et al., Review of Scientific Instruments 90, 123308 (2019); doi:10.1063/1.5128489
2. S. Vybin et al., Plasma Sources Science and Technology, Vol. 29, Issue 11, p. 11LT02
3. Барабин, С. В., Кропачев, Г. Н., Лукашин, А. Ю., Кулевой, Т. В., Выбин, С. С., Голубев, С. В., Изотов, И. В., Киселева, Е. М., Скалыга, В. А., Григорьев, С. В., Коваленко, Н. А. (2021). Письма в журнал технической физики (Vol. 47, Issue 10, p. 7).
4. Патент РФ 2707272 (26.11.2019)
5. Патент РФ 2697186 (13.08.2019)

Лаборатория ионных источников
Выбин Сергей Сергеевич, м.н.с.
С.В. Голубев, И.В. Изотов, С.В. Разин, В.А. Скалыга

Система формирования ионных пучков с сильно неоднородным распределением напряженности электрического поля

Предложен новый подход к конструированию систем формирования ионного пучка, позволяющий генерировать пучки с ранее недоступными характеристиками. Новизна заключается в применении электродов специальной формы, обеспечивающих сильно неоднородное распределение электрического поля в ускоряющем зазоре. Новая геометрия электродов позволяет реализовать основной перепад электрического потенциала вблизи плазменного мениска, увеличить темп ускорения ионов и тем самым снизить объемный заряд пучка, ограничивающий его предельные характеристики.

Разработанный подход обеспечивает существенное снижение оптимального ускоряющего напряжения для требуемых значений плотностей тока и открывает возможность формирования ионных пучков с ранее недоступными плотностями тока при наличии достаточной эмиссионной способности плазмы. Новые системы формирования ионного пучка принципиально повышают характеристики ионных источников с высокой

плотностью плазмы, систем ионной имплантации с низкой энергией частиц и любых других устройств, работающих в режиме ограничения тока ионного пучка его объемным зарядом.

Испытания новой системы экстракции проведены на импульсном сильноточном электронно-циклотронном резонансном (ЭЦР) ионном источнике SMIS 37 с нагревом плазмы излучением гиротрона с частотой 37,5 ГГц и мощностью до 100 кВт. В экспериментах продемонстрированы основные преимущества данного подхода, впервые получены протонные пучки с плотностью тока до 1,1 А/см2. На основе предложенного подхода разработан дизайн системы формирования пучков многозарядных ионов с энергией менее 1 кэВ для исследований их взаимодействия с поверхностями в центре GANIL (Франция) и предложен апгрейд системы для инжектора многозарядных ионов циклотрона в университете г. Ювяскюля (Финляндия).

Литература

1. S.S. Vybin, Izotov, I. V., & Skalyga, V. A. (2020). Plasma Sources Science and Technology Vol. 29, Issue 11, p. 11LT02.
2. S.S. Vybin, V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Golubev, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, M.Yu. Kazakov, A.F. Bokhanov, S.P. Shlepnev. Plasma Sources Science and Technology. Vol. 30, № 12, p. 125008. https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac38af
3. Патент РФ 2726143 (09.07.2020)

Лаборатория прикладной физики плазмы
Водопьянов Александр Валентинович, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.
Преображенский Е.И., Зорина М.В., Нежданов А.В., Машин А.И., Якимова Р., Годова Д.

Способ интеркаляции водорода в графен при помощи аргон-водородной плазмы

Предложен новый подход к интеркаляции водорода в однослойный графен, выращенный на SiC. Графен постепенно модифицируется и превращается в двумерный углеводород Графан под воздействием аргон-водородной плазмы высокочастотного разряда. Тщательный подбор параметров позволил проследить постепенное превращение графена в графан. Промежуточные этапы перехода материала были изучены методами спектроскопии комбинационного рассеяния света и атомно силовой микроскопии. Развитый высоконадежный и гибкий способ получения графана может использоваться для производства материала для хранения водорода и в 2D-электронике.

Литература

1. Е. И. Преображенский, А. В. Водопьянов, А. В. Нежданов , Интеркаляция графена водородом с помощью индукционно-связанной водород-аргонной плазмой, материалы международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», 9 – 12 марта 2021 г., Нижний Новгород\А.
2. Vodopyanov, E. Preobrazhensky, A. Nezhdanov, M. Zorina, A. Mashin, R. Yakimova, D. Gogova, A new plasma-based approach to hydrogen intercalation of graphene, Superlattices and Microstructures, 160 (2021), 107066.

ФГБУН Институт проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН)

142432, Московская область, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, 1
Отдел экстремальных состояний вещества,
Лаборатория электромагнитных процессов в ударно-сжатых средах
Минцев Виктор Борисович, г.н.с., зав. лабораторией, д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Излучение кремния при давлении ударного сжатия 68 ГПа и в процессе разгрузки

Проведены измерения яркостных температур кремния, ударно-сжатого до давления P=68 ГПа, и эволюция его температуры в процессе разгрузки. Измерения проводились в инфракрасном диапазоне Δλ1=(1.1÷1.7) мкм, в котором кремний оптически прозрачен, и в видимом диапазоне Δλ2=(0.32÷1.06) мкм. Изэнтропическая разгрузка ударно-сжатого кремния в вакуум сопровождалась аномальным ростом наблюдаемой температуры (ударная волна,разгрузка, температура).

Измерения коэффициента пропускания кремния под воздействием излучения интенсивных ударных волн в ксеноне

Проведены измерения коэффициента пропускания образцов кремния под воздействием излучения интенсивных ударных волн в ксеноне. Генерация ударных волн осуществлялась с помощью энергии конденсированных взрывчатых веществ. Измерение интенсивности прохождения излучения на длине волны 1500 нм осуществлялось пирометрическими методами. Предложена модель процесса, основанная на появлении за счет фотоионизации поглощающего слоя в кремнии.

Ударная сжимаемость монокристаллического кремния в диапазоне давления 280-510 ГПа.

Экспериментально исследована ударная сжимаемость монокристаллического кремния в диапазоне давлений 280-510 ГПа. Ударные волны создавались при помощи маховских взрывных кумулятивных генераторов. Параметры ударных волн определялись по методу отражения, в качестве вещества-эталона применялся монокристаллический кварц. Полученные данные хорошо согласуются с первопринципными расчетами и с данными, полученными при помощи лазерных ударных волн (кремний, ударная волна, ударная адиабата, маховский генератор).

Измерение индексов отражения для широкого диапазона изменения углов взаимодействия ударно-сжатой неидеальной плазмы и пробного излучения в ИК-диапазоне

Выполнено экспериментальное исследование поляризационных свойств сильно-неидеальной градиентной плазмы в инфракрасной области спектра при варьировании углов взаимодействия плазмы и электромагнитной волны в диапазоне θ = 0°÷78°. Получен массив индексов Стокса для νзонд. = 2.83□1014 гц, а также определено значение угла Брюстера. С использованием новых экспериментальных данных выполнено моделирование взаимодействия градиентной плазмы с пробной электромагнитной волной с учетом рассеяние электронов на атомах и изменения температуры в переходном слое. Проведен анализ влияния фит-параметров на точность описания экспериментальных данных.

Литература

1. Nikolaev. D N, Kulish M I, Dudin S V, Mintsev V B, Lomonosov I V, Fortov V E «Measurement of dense plasma temperature of the shock-compressed silicon» Contributions to Plasma Physics №10 2021. First published: 15 October 2021. https://doi.org/10.1002/ctpp.202100113
2. Zaporozhets, Y.B., Mintsev, V.B., Gryaznov, V.K., Reinholz, H., Röpke, G. The investigation of the optics of shock-compressed strongly correlated plasma 2021 Contributions to Plasma Physics 61(10),e202100110
3. Zaporozhets, Y.B., Mintsev, V.B., Reinholz, H., Röpke, G. The interaction of laser radiation with strongly coupled plasmas. Journal of Physics: Conference Series 2021 1787(1),012048
4. Минцев В Б, Грязнов В К "В.Е. Фортов и динамические методы в физике неидеальной плазмы. Черноголовка" УФН 191 1212–1230 (2021)
5. Минцев В. Б. «Динамические методы в физике неидеальной плазмы. Начало» Теплофизика высоких температур 59 (6) 2021 в печати
6. Кулиш М И , Минцев В Б , Дудин С В , Николаев Д Н , Ломоносов И В , Фортов В Е «Излучение кремния при давлении ударного сжатия 68 ГПа и в процессе разгрузки в вакуум» Теплофизика высоких температур 59 (6) 2021 в печати

7. Кулиш М И , Минцев В Б , Дудин С В , Николаев Д Н , Ломоносов И В , Фортов В Е «Измерения коэффициента пропускания кремния под воздействием излучения интенсивных ударных волн в ксеноне» Теплофизика высоких температур 59 (6) 2021 в печати
8. Николаев Д Н , Кулиш М И , Минцев В Б , Дудин С В , Ломоносов И В, Фортов В Е «Ударная сжимаемость монокристаллического кремния в диапазоне давления 280-510 ГПа» Теплофизика высоких температур 59 (6) 2021 в печати

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

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская д.13, стр.2

Лаборатория №1.1 – диагностики вещества в экстремальном состоянии ОИВТ РАН Пикуз Сергей Алексеевич, зав. лаб; Мартыненко Артем Сергеевич, н.с.; Скобелев Игорь Юрьевич, в.н.с. (работа выполнена совместно с НИЯУ МИФИ).

Роль интенсивности релятивистского лазерного импульса в изохорическом нагреве металлических проволочных мишеней

Лазерная плазма, создаваемая при облучении твердотельных мишеней лазерными импульсами мульти-тераваттной и петаваттной мощности является источником потока быстрых электронов, ток которых оказывается достаточным для эффективного прогрева окружающих областей мишени. Благодаря такому подходу можно создавать и изучать плотное нагретое вещестово (Warm Dense Matter), изохорически нагерваемое до температур в несколько десятков эВ.

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование влияния параметров релятивистских лазерных импульсов – а именно, интенсивности и энергии – на температурные профили получаемой с их помощью плазмы титана твердотельной плотности. Экспериментальные данные были получены с использованием петаваттной лазерной установки PHELIX (GSI, Германия) с характерной длительностью лазерного импульса порядка 1 пс. Энергия в пучке варьировалась в диапазоне 50–200 Дж, и плотностью потока энергии на мишени в диапазоне 6×10^{18}–6×10^{20} Вт/см^2. Благодаря применению методов рентгеновской эмиссионной спектроскопии с пространственным разрешением, наблюдая за профилями характеристической линии Ti K_α, и ее сателлитов были восстановлены экспериментальные пространственные профили температуры плотного нагретого вещества, создаваемого при облучени торцевой и боковой поверхностей тонкопроволочных мишеней с высоким аспектным соотношением (d = 50 мкм, l > 1000 мкм)

Это позволило пронаблюдать влияние параметров лазерных импульсов на температурные профили [1]. Так, было показано, что глубина прогрева проволоки строго зависит от интенсивности лазера и может достигать нескольких сотен микрометров. В то же время, было количественно продемонстрировано, что максимальная температура получаемой плазмы, не чувствительна к интенсивности лазера в рассматриваемых диапазонах лазерных параметров, но в основном зависит от величины вложенной энергии лазера. Максимальная зарегистрированная температура составила ~30 эВ.

Зависимости были объяснены в рамках общих физических принципов и представленного упрощенного численного моделирования зависимости спектра лазероускоренных горячих электронов от параметров лазерных импульсов. Увеличение вкладываемой лазерной энергии (при сохранении постоянной величины лазерной интенсивности) приводит к росту полной энергии горячих электронов и к последующему увеличению температуры плотного нагретого вещества мишени на глубине нескольких сотен микрометров, что наблюдалось экспериментально. При величине лазерной интенсивности выше 10^{19} Вт/см^2

(что соответствует характеристической температуре спектра распределения горячих электронов ~1 МэВ) максимальная температура плазмы становится слабо чувствительной к интенсивности лазера и в основном зависит от вложенной энергии. С другой стороны, увеличение интенсивности лазера при постоянной энергии лазера приводит к нагреву более глубоких слоев мишени. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для построения и проверки более сложных моделей нагрева вещества лазерно-ускоренными горячими электронами.

Литература

1. A.S. Martynenko, S.A. Pikuz, L. Antonelli, F. Barbato, G. Boutoux, L. Giuffrida, J.J. Honrubia, E. Hume, J. Jacoby, D. Khaghani, K. Lancaster, P. Neumayer, O.N. Rosmej, J.J. Santos, O. Turianska, D. Batani // Opt. Express **29**, 12240 (2021).

Лаборатория №1.3. - теории лазерной плазмы

Андреев Николай Евгеньевич, г.н.с., зав. лабораторией, проф., д.ф.-м.н.

Ультра-яркий источник бетатронного излучения релятивистских электронов в режиме прямого лазерного ускорения для диагностики вещества в экстремальных состояниях

На основе анализа экспериментов, проводимых в рамках международного сотрудничества по проекту FAIR с использованием петаваттного лазерного комплекса PHELIX в ГСИ-ФАИР (г. Дармштадт), определены рекордные параметры ультра яркого источника бетатронного рентгеновского излучения релятивистских электронов, ускоряемых в плазме при использовании протяженных мишеней с околокритической плотностью электронов.

Результаты полномасштабного 3D PIC моделирования для параметров плазмы и лазерного импульса, отвечающих условиям эксперимента, продемонстрировали высокую эффективность преобразования лазерной энергии в энергию ультрарелятивистских электронов, генерирующих в процессе прямого лазерного ускорения в плазменном канале бетатронное излучение с ультра высоким количеством фотонов (7×10^{11}) в диапазоне энергии квантов 1 - 30 кэВ. Плотность фотонов на детекторе, отстоящем от источника на расстоянии 120 см, остается на очень высоком уровне, до 10^8 рентгеновских фотонов / см^2, что обеспечивает возможность широкого применения источника для приложений в исследованиях в области высоких плотностей энергии (HED).

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

Моделирование генерации характеристического рентгеновского излучения при вакуумном нагреве электронов наноцилиндров

Разработана модель генерации ускоренных электронов вблизи поверхностей ионизованных цилиндров лазерным полем нерелятивистской интенсивности, которая позволяет выйти за рамки электростатического приближения и учитывает поглощение энергии лазерного поля генерируемыми электронами. Рассмотрена модель генерации рентгеновского K_α излучения в медной подложке, когда цилиндры расположены на подложке наклонно и параллельно друг другу, а лазерное поле распространяется перпендикулярно подложке. Выявлено, что выход K_α излучения существенно зависит от угла наклона цилиндров. Оптимальные параметры (угол наклона цилиндров, радиус цилиндра, умноженный на волновое число, и направление линейно поляризованного электрического поля лазерного излучения) определены при нормированной амплитуде лазерного поля $a_L = 0.2$. При этих параметрах выход K_α излучения из медной подложки, покрытой цилиндрами, в 2.7 раза превышает максимальный выход K_α излучения из

подложки, покрытой ионизованными кластерами при тех же условиях облучения, и в 4 раза больше, чем максимальный выход K_α излучения из плоской медной мишени, облученной p-поляризованным лазерным полем той же амплитуды. Увеличение выхода K_α излучения по сравнению с выходом K_α излучения из подложки, покрытой кластерами, связано с увеличением количества ускоренных электронов, а по сравнению с выходом K_α излучения из плоской мишени – как с увеличением количества ускоренных электронов, так и с уменьшением поглощения K_α излучения в подложке благодаря оптимальной геометрии мишени, приводящей к меньшей глубине генерации K_α излучения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных источников линейчатого рентгеновского излучения для междисциплинарных приложений.

Вейсман Михаил Ефимович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Исследование взаимосвязи подходов обобщенной теории линейного отклика и теории Кубо-Гринвуда к расчету динамической проводимости вещества

Исследована взаимосвязь между подходами обобщенной теории линейного отклика (оТЛО) и теории Кубо-Гринвуда (КГ) к расчету комплексной динамической проводимости (КДП).Для этого выражения КДП, отвечающие обоим подходам, выводятся с помощью метода неравновесного статистического оператора и записываются через комплексные корреляционные функции (ККФ). При выводе используется уравнение Лиувиля-фон Неймана с бесконечно малым источником в правой части, формальное решение которого записывается с помощью т.н. релевантного статистического оператора $\rho^{rel}(t)$, получаемого с помощью принципа максимума информационной энтропии $-Tr\{\rho_{rel}(t')\ln\rho_{rel}(t')\}$ с заданными средними значениями релевантных наблюдаемых. С использованием решения для $\rho^{rel}(t)$ в виде обобщенного ансамбля Гиббса, а также приближения ТЛО для малых внешних полей, различных форм интегрирования по частям ККФ и различных наборов релевантных наблюдаемых, показано, что оба подхода к КДП формально эквивалентны друг другу. При этом выражение КГ для КДП более удобно для численных расчетов и для разделения вклада внутризонных и межзонных переходов в КДП в аналитических выражениях.

Сравнение с экспериментом и численными первопринципными расчетами показали, что подход КГ для расчета вклада межзонных переходов в КДП необходим для объяснения наблюдаемых в эксперименте больших значений линейного коэффициента поглощения вблизи порога возбуждения L-оболочки в алюминии. Вместе с тем, подход оТЛО имеет преимущества в описании вклада внутризонных переходов в КДП из-за возможности более точного учета взаимодействий в рамках теории возмущений при выводе аналитических выражений для оценки ККФ и КДП.

Литература

1. O. N. Rosmej, X. F. Shen, A. Pukhov, L. Antonelli, F. Barbato, M. Gyrdymov, M. M. Günther, S. Zähter, V. S. Popov, N. G. Borisenko, and N. E. Andreev. Bright betatron radiation from direct-laser-accelerated electrons at moderate relativistic laser intensity // Matter and Radiation at Extremes. 2021. V. 6. P. 048401. https://doi.org/10.1063/5.0042315
2. O. F. Kostenko. Modeling of generation of characteristic x-ray radiation under vacuum heating of electrons of nanocylinders // Physics of Plasmas. 2021. V. 28. No. 10. P. 103104. https://doi.org/10.1063/5.0062008
3. M. Veysman, G. Röpke and H. Reinholz. Dynamical conductivity of warm dense matter from correlation functions with account for interband transitions, Physics of Plasmas. 2021. V. 28. No. 10. P. 103303. https://doi.org/10.1063/5.0060137

Лаборатория №1.4. - лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы

Зеленер Борис Борисович, г.н.с., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.; Вихров Евгений Владимирович, стажер-исследователь; Бронин Сергей Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.; Зеленер Борис Вигдорович, в.н.с., к.ф.-м.н.

Образование ионных волн при расширении ультрахолодной плазмы

В работе получены результаты прямого моделирования методом молекулярной динамики расширения двухкомпонентной ультрахолодной плазмы для различного числа частиц, плотностей и электронных температур. Дано описание процесса расширения, общего для всех параметров плазмы. После выхода быстрых электронов из облака плазмы избыточный положительный заряд локализуется на внешней границе, в узком слое. Этот слой имеет характерную форму фронта с резким падением концентрации заряда. Заряженный слой удерживает оставшиеся электроны в течение всего процесс расширения. По мере расширения плазмы скорость движения заряженного слоя становится постоянной и значительно превышает скорость звука ионов. Кроме того, зависимость радиальной скорости ионов от радиуса приобретает автомодельный характер задолго до заключительной стадии расширения. На основе результатов расчетов получены уравнения и автомодельные решения. Определены общие зависимости от параметров плазмы, которые сравниваются с экспериментальными данными. Получено хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Литература

Vikhrov E.V., Bronin S.Ya., Zelener B.B., Zelener B.V., Ion wave formation during ultracold plasma expansion, Physical Review E, 2021; Vol. 104, 015212. DOI: 10.1103/PhysRevE.104.015212

Лаборатория №1.6. - теплофизических баз данных

Морозов Игорь Владимирович, с.н.с., зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Развитие метода моделирования неидеальной плазмы и разогретого плотного вещества на основе динамики волновых пакетов и теории функционала плотности

Проведена апробация и исследована область применимости нового метода компьютерного моделирования неидеальной плазмы и разогретого плотного вещества, основанного на молекулярной динамике с волновыми пакетами и теории функционала плотности (МДВП-ФП). В методе МДВП-ФП электроны представлены в виде гауссовских волновых пакетов с динамической шириной, многоэлектронная волновая функция вычисляется в приближении Хартри, а обменное-корреляционные эффекты определяются на основе функционала электронной плотности, где плотность электронов рассчитывается по мгновенным положениям и форме волновых пакетов на каждом шаге по времени. Показана большая точность метода МДВП-ФП по сравнению с исходным алгоритмом МДВП за счет учета обменно-корреляционного взаимодействия на примере расчета основного состояния молекулы водорода; рассчитаны ударная адиабата и изоэнтропа сжатия дейтерия, показывающая возможность описания вещества при давлениях до $3 \cdot 10^4$ ГПа; показана принципиальная возможность моделирования неадиабатической электрон-ионной динамики методом МДВП-ФП на примере электрон-ионной релаксации в неизотермической неидеальной плазме [1].

Литература

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 // Physical Review E. 2021. V. 104. P. 045304.

Лаборатория №2.1. - электрофизических и плазменных устройств

Крастелев Евгений Григорьевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

В результате исследований, направленых на создание сильноточных ресурсных искровых газовых разрядников со стабильными динамическими характеристиками разработаны и испытаны конструкции неуправляемых и управляемых разрядников на напряжение до 100 кВ для генераторов импульсного напряжения Аркадьева-Маркса, в том числе работающих в периодическом режиме с частотой повторения 25 Гц. Разработаны конструкции высокостабильных искровых газовых коммутаторов формирующих линий генераторов наносекундных импульсов с рабочим напряжением до 300 кВ, обеспечивающих при временах зарядки формирующей линии 1÷1,5 мкс и частоте повторения импульсов 1÷10 Гц относительный разброс напряжения импульсного пробоя $\Delta U/U \approx 1\%$.

Конструкция разрядников основана на использовании комбинированной электродной системы, которая объединяет два параллельно включенных газоразрядных промежутка – основной искровой и дополнительный коронирующий с последовательным во времени развитием разнесенных в пространстве коронного и искрового разрядов. Стабилизация динамических характеристик достигается предыонизацией газа в искровом промежутке опережающим зажиганием коронного разряда, а разделение функций двух разрядных промежутков позволяет оптимизировать геометрию электродов каждого из них и обеспечить как высокие динамические характеристики, так и возможность коммутации больших токов при сохранении большого ресурса работы без деградации динамических характеристик.

Результаты могут быть рекомендованы к внедрению при разработке генераторов мощных высоковольтных импульсов для научных и технологических применений.

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

Вывод и программная реализация непрерывной формулы Кубо-Гринвуда

Впервые предложен метод расчета электронных транспортных свойств неупорядоченных плотных плазменных сред на основе непрерывной формулы Кубо-Гринвуда. Непрерывная формула Кубо-Гринвуда выводится из обычной путем специального усреднения матричных элементов. В результате формируется новое физическое понятие – функция усредненных квадратов матричных элементов, позволяющая оценить интенсивности переходов в различных частях спектра. Новая формула выражает транспортные свойства как интеграл по электронному спектру энергий от произведения непрерывных функций, что позволяет проанализировать вклад различных участков спектра в коэффициенты электропроводности и теплопроводности. Строго показано, что непрерывная формула Кубо-Гринвуда переходит в обычную в пределе нулевого уширения дельта-функции. Расчеты проводятся с помощью специально разработанной параллельной программы. На примере жидкого алюминия продемонстрированы основные этапы расчета. Новая формула найдет применение при разработке широкодиапазонных моделей транспортных и оптических свойств различных веществ.

Первопринципное моделирование теплофизических свойств жидких металлов в околокритической и закритической области параметров, оценки критической точки

С помощью метода функционала электронной плотности и основанном на нем методе квантовой молекулярной динамики выполнены масштабные расчеты термодинамических, структурных, транспортных и оптических свойств плотной плазмы для ряда практически важных металлов в околокритической и закритической области параметров. Рассматривались молибден, вольфрам и свинец. Расчеты проводились в кубической ячейке, содержащей несколько сотен частиц; учитывались все взаимодействия между частицами, а также эффекты вырождения и обменно-корреляционные эффекты. В

расчетах не использовалась эмпирическая информация, за исключением заряда и массы ядер элементов, а также фундаментальных физических констант. Были вычислены изотермы в закритической области параметров и с помощью специальной процедуры моделирования методом Монте-Карло выполнены оценки критических параметров, а также их погрешность. В частности, для молибдена были получены следующие значения: $T_c = 10.73 \pm 0.12$ кК, $\rho_c = 2.3 \pm 0.2$ г/см^3; $P_c = 4.6 \pm 0.7$ кбар, $Z_c = 0.22 \pm 0.03$. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными по ударному сжатию сплошных и пористых образцов, по изоэнтропическому расширению, по изобарическому расширению при нагреве электрическим током, а также с теплофизическими данными по плотности и энтальпии, впервые было достигнуто хорошее согласие со всеми имеющимися данными. Для свинца была оценена плотность смены знака температурного коэффициента электросопротивления в согласии с экспериментальными данными. Было показано, что излучательная способность плотной плазмы металлов существенно возрастает с увеличением температуры, что необходимо учитывать при обработке экспериментальных данных.

Литература

1. Minakov D.V., Paramonov M.A., Levashov P.R. Thermophysical properties of liquid molybdenum in the near-critical region using quantum molecular dynamics // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. P. 184204. DOI: 10.1103/PhysRevB.103.184204.
2. Demyanov G.S., Knyazev D.V., Levashov P.R. The continuous Kubo-Greenwood formula: theory and numerical implementation // Phys. Rev. E. 2021. Принято к печати.
3. Fokin V.B., Minakov D.V., Levashov P.R. Ab initio calculations of transport and optical properties of liquid Zr near melting // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Принято к печати.

Лаборатория №7.2 – теплофизических и кинетических свойств веществ

Дьячков Лев Гавриилович, в.н.с., д.ф.-м.н.

Пылевая плазма в неоднородном магнитном поле в стратифицированном тлеющем разряде

Модель вращения пылевых частиц в стратифицированном разряде постоянного тока под действием продольного однородного магнитного поля, разработанная в 2019 и 2020 гг., обобщена на случай неоднородного магнитного поля. В однородном поле два механизма увлечения пылевых частиц ионами и нейтральным газом действуют друг против друга. Ионы приводят к вращению пылевых частиц против часовой стрелки, если смотреть в направлении магнитного поля, а нейтральный газ – по часовой стрелке. Первый механизм преобладает в относительно слабых полях $B \lesssim 10^{-2}$ Т, второй – в более сильных $B \gtrsim 10^{-1}$ Т. В неоднородном магнитном поле его силовые линии расходятся или сходятся, и появляется радиальная компонента поля; соответственно для каждого из указанных механизмов возникает дополнительный вклад во вращение. Ионы дрейфуют в скрещенных электрическом и магнитном полях. В однородном магнитном поле – это продольное магнитное и амбиполярное радиальное электрическое, в неоднородном поле добавляется дрейф в продольном электрическом и радиальном магнитном полях. Вращение газа связано с возникновением вихревых токов в стратах, которые в области зависания пылевой структуры имеют радиальную компоненту перпендикулярную аксиальному магнитному полю. Соответствующий аналог в неоднородном магнитном поле обусловлен продольным разрядным током и радиальной компонентой магнитного поля. Если силовые линии магнитного поля расходятся (поле убывает) каждая добавка к скорости вращения, связанная с радиальной компонентой поля, для обоих механизмов имеет тот же знак, что и вклад однородного поля. Если же силовые линии сходятся, они меняют знак. Результаты расчета по модели применяются для объяснения экспериментов, выполненных в СПбГУ.

Литература

1. E.S. Dzlieva, L.G. D'yachkov, L.A. Novikov, S.I. Pavlov and V.Yu. Karasev. Dusty plasma in inhomogeneous magnetic fields in a stratified glow discharge, Molecules 2021. V. 26. N 8. 3788. https://doi.org/10.3390/molecules26133788

Зеленер Борис Вигдорович, в.н.с., к.ф.-м.н.; Зеленер Борис Борисович, г.н.с., д.ф.-м.н.; Вихров Евгений Владимирович, стажер-исследователь; Бронин Сергей Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.; Корчагин Дмитрий Сергеевич, м.н.с.

Физические процессы при формировании стационарной ультрахолодной неидеальной плазмы

Получены результаты прямого моделирования формирования двухкомпонентной стационарной неидеальной ультрахолодной плазмы при помощи непрерывного ионизирующего лазера. Показано, что формирование стационарной плазмы так же, как и в случае импульсной ионизации, определяется электрическим полем, создаваемым покидающими плазму быстрыми электронами. Это поле ускоряет ионы и удерживает оставшиеся электроны в плазме. При этом за счет непрерывной ионизации в определенный момент времени, зависящий от начальной энергии электронов и ионов, а также от плотности плазмы, достаточно быстро устанавливается стационарное распределение частиц плазмы по плотности и температуре частиц, которое может существовать в течение длительного времени.

Литература

1. Бронин С.Я., Вихров Е.В., Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В., Физические процессы при формировании стационарной ультрахолодной неидеальной плазмы, Письма в ЖЭТФ, 2021, том 114, с. 643 , DOI: 10.31857/S1234567821220031

Теплопроводность и вязкость в полностью ионизованной многозарядной сильно неидеальной плазме.

В работе получены результаты расчетов коэффициентов теплопроводности и вязкости для двухкомпонентной полностью ионизованной классической кулоновской плазмы с зарядами ионов от одного до трех, выполненные методом молекулярной динамики. Использовалась модель ультрахолодной плазмы, в которой частицы взаимодействуют по закону Кулона без всяких ограничений на больших или малых расстояниях. Расчеты проведены в широкой области параметра неидеальности. Показано наличие подобия для коэффициентов теплопроводности и вязкости при многократной ионизации. Дано сравнение с результатами расчетов для других моделей плазмы. Полученные результаты могут быть использованы для любой классической невырожденной сильно неидеальной плазмы.

Литература

1. Bronin, S.Y., Zelener, B.B., Zelener, B.V.,Thermal conductivity and viscosity in fully ionized multiple-charged strongly coupled plasma,Plasma Sources Sci. Technol., 2021, Vol. 30, P. 115018 **,** DOI: 10.1088/1361-6595/ac34c8

Преломление, поглощение и отражательная способность излучения в сильно неидеальной плазме

В работе представлены аналитические выражения для диэлектрической проницаемости, показателя преломления, коэффициентов поглощения и отражения излучения в классической двухкомпонентной полностью ионизованной плазме. Они основаны на фундаментальных соотношениях классической электродинамики и результатах численных расчетов проводимости для модели ультрахолодной плазмы. Эти аналитические выражения имеют простой вид и зависят только от двух безразмерных переменных: частоты нормированной на плазменную частоту и параметра неидеальности. В связи с этим они применимы для любой классической невырожденной плазмы в

широкой области частот и параметра неидеальности. Приводится сравнение с различными экспериментальными данными для низкотемпературной плазмы. Получено хорошее согласие.

Литература

1. Bronin, S.Y., Zelener, B.B., Zelener, B.V., Refraction, absorption and reflectivity of radiation in strongly coupled plasma, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2021, Vol.268, 107621, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107621

Храпак Алексей Георгиевич, г.н.с., д.ф.-м.н.;
Храпак Сергей Алексеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Число Прандтля в классических жидкостях – однокомпонентной плазме и системе твердых сфер

Выполнена оценка числа Прандтля для трехмерной системы твердых сфер и однокомпонентной плазменной жидкости, от разреженного слабосвязанного режима до плотного сильно неидеального режима вблизи фазового перехода жидкость-твердое тело. В обоих случаях получены численные значения порядка единицы Число. Прандтля увеличивается по мере приближения к точке замерзания, где оно достигает квазиуниверсального значения около 1.7 для простых диэлектрических жидкостей. В двумерном случае предложенная модель дает близкие результаты, хотя в экспериментах с двумерной пылевой плазмой получены несколько более низкие значения.

Показано, что в достаточно плотных жидкостях вблизи фазового перехода жидкость-твердое тело выполняется соотношение Стокса-Эйнштейна между коэффициентами самодиффузии и сдвиговой вязкости. Определены области параметров на фазовой диаграмме систем частиц с различными потенциалами взаимодействия (Lennard-Jones, Coulomb, Debye-Hückel, и твердых сфер) где соотношение Стокса-Эйнштейна имеет место. Индикатором применимости соотношения Стокса-Эйнштейна может служить избыточная энтропия S_{ex}. Во всех рассмотренных системах соотношение Стокса-Эйнштейна применимо при $S_{ex}<2$.

Литература

1. Khrapak S.A., Khrapak A.G., Prandtl Number in Classical Hard-Sphere and One-Component Plasma Fluids, Molecules, 2021, Vol. 26, 821, DOI: 10.3390/molecules26040821

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

Новый класс фазовых переходов в водороде и дейтерии при наличии химических реакций ионизации и диссоциации

Рассчитана ударная адиабата Пуассона дейтерия в районе скачка плотности, зафиксированного в эксперименте. Авторы эксперимента связывают этот скачок с фазовым переходом. Отличительной особенностью расчётной модели является учёт коллективной энергии связи атомов (когезии) и исключённого объёма. Результаты расчёта демонстрируют наличие фазового перехода и скачка плотности на изоэнтропе. Аналогичный фазовый переход – Диссоциативный Фазовый Переход (ДФП) ранее обнаружен при расчёте ударной адиабаты Гюгонио для дейтерия. Выдвинута гипотеза о существовании нового класса фазовых переходов Диссоциативный и Плазменный фазовые переходы (ДФП и ПФП) с одинаковой топологией фазовых характеристик. Впервые этот тип фазовых переходов был рассмотрен Норманом Г.Э. и Старостиным А.Н.

Литература

1. Хомкин А.Л., Шумихин А.С. Трехкомпонентная химическая модель неидеальной плазмы «для пользователей». ТВТ, 2021, Т. 59, № 1, с. 3 – 11. DOI: 10.31857/S0040364421010087
2. Хомкин А.Л., Шумихин А.С. Сверхкритический флюид плазмы паров металлов, инертных газов и экситонов. УФН, 2021, Т. 191, № 11, с. 1187 – 1211. DOI: 10.3367/UFNe.2020.08.038825

Лаборатория №8. - физического моделирования двухфазных течений

Куриленков Юрий Константинович, ст.н.с., к.ф.-м.н.
(при участии ФИ им П.Н.Лебедева: А.В.Огинов, С.Ю.Гуськов)

Анейтронный синтез протон-бор в компактной схеме осцилляторного удержания плазмы

Реакция синтеза протон – бор (pB), сопровождающаяся выходом лишь трёх быстрых альфа-частиц ($p + {}^{11}B \rightarrow \alpha + {}^{8}Be^* \rightarrow 3\alpha$) представляет фундаментальный и прикладной интерес, но требует экстремальных условий для реализации. Электродинамическим PiC моделированием был найден режим осцилляторного удержания плазмы [1] и ускорения протонов и ионов бора в поле виртуального катода до энергий в сотни кэВ, необходимых для достижения синтеза pB. В результате, в эксперименте с наносекундном вакуумном разрядом (НВР) малой энергии (1–2 Дж) впервые в мире в одном миниатюрном устройстве с удержанием плазмы обнаружен заметный выход реакции $p + {}^{11}B$ (без внешнего воздействия лазеров или ускорителей протонов на бор-содержащую мишень). Экспериментально полученный суммарный выход α-частиц при импульсно-периодическом режиме НВР с общей длительностью приложенного высокого напряжения 4 мкс, составил $5\times104/4\pi$ (или 10 α-частиц/нс), что может быть сравнимо с современными результатами лазерного pB синтеза [1]. Благодаря осцилляторному режиму удержания плазмы, в течение каждого наносекундного импульса напряжения (≈ 20 нс) может иметь место многократная реакция pB и соответствующий выход α-частиц, что является определённым преимуществом по энергоэффективности по сравнению с лазерным методом. В перспективе, при достижении брекэвена в одном модуле ($Q = Q_{output}/Q_{input} > 1$) на основе НВР, схема может быть масштабируема для производства энергии в массиве многомодульного реактора [2].

Литература

1. Yu.K. Kurilenkov, A.V. Oginov, V.P. Tarakanov, S.Yu. Gus'kov, I.S.Samoylov. Proton-boron fusion in a compact scheme of plasma oscillatory confinement ***Phys. Rev. E,*** **103**, 043208 (2021)
2. J. Park, R. Nebel et al. Periodically oscillating plasma spheres ***Phys. Plasmas*** **12** 056315 (2005)

Лаборатория №14.1. – теории неидеальной плазмы

Тимофеев Алексей Владимирович, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Процессы энергетического обмена в двухфракционных системах заряженных пылевых частиц

Исследованы условия энергетического обмена в двухфракционных ансамблях неидентичных заряженных частиц. Выполнено численное исследование процессов перераспределения стохастической кинетической энергии между фракциями частиц, имеющих разные размеры и температуру; а также перераспределения стохастической энергии по степеням свободы. Моделирование проводилось для двухслойных ансамблей и объемных облаков заряженных частиц в поле тяжести, а также для двумерных структур, формирующихся в электрических полях ловушки под воздействием сил пропорциональных квадрату радиуса частиц.

Рассмотрено влияние высоких температур (приводящих к значительным отклонениям частиц от их положения равновесия) на перераспределение стохастической энергии в анализируемых системах.

Предложена полуэмпирическая аппроксимация, которая хорошо описывает процессы энергетического обмена во всех рассмотренных случаях.

Исследование процессов переноса компонент водных растворов электролитов являющихся компонентами биохимических систем и перспективных электрохимических источников тока.

В рамках исследования процессов переноса в электролитах перспективных электрохимических источников тока и биохимических систем для водного раствора сахарозы методом классической молекулярной динамики осуществлено изучение свойств растворов сахарозы в широком диапазоне температур и концентраций. Рассмотрена область температур от 273К до 343К и концентрации от 10% до 30%. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Используемая модель хорошо воспроизводит плотность раствора. При этом отклонение полученных в расчёте значений плотности от экспериментальных данных не превышает 0.8% во всем исследуемом диапазоне температур и концентраций. Рассчитанные значения плотности раствора с ростом температуры спадают быстрее, чем экспериментальные, однако этот эффект не создает существенных расхождений.

В исследуемых диапазонах температур и концентраций вычислены значения вязкости раствора при помощи метода Грина-Кубо. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными при низких концентрациях и высоких температурах. Отличие во всем диапазоне не превосходит 30%. Высокое расхождение с экспериментом при массовой доле сахара 30% и низких температурах можно объяснить образованием кластеров молекул сахара. Кроме того, эта область сложна и для экспериментального определения значений коэффициента вязкости.

Рассчитаны температурные зависимости коэффициента диффузии сахара в растворе при массовых долях сахара 10%, 20% и 30%. Для каждой из концентраций был исследован и учтен размерный эффект. Проведено сравнение с экспериментальными данными, отклонение не превосходит 40%. Наибольшее отличие от данных эксперимента результаты расчёта дают при концентрации сахара 30% и в области низких температур, как и для коэффициента вязкости.

Был исследован гидродинамический радиус молекулы сахарозы в растворе. Он рассчитывался через коэффициенты диффузии и вязкости с помощью уравнения Стокса-Эйнштейна. Полученные значения радиуса лежат в диапазоне (4.04 - 4.63) А, что в целом согласуется с оценкой данного параметра из экспериментальных значений вязкости и диффузии, откуда получается диапазон (3.89 - 4.61) А.

Исследование свойств молекул H_2 при фазовом переходе разогретого плотного водорода

Разогретый плотный водород исследуется в области фазового перехода флюид-флюид методами молекулярной динамики в рамках теории функционала плотности.

Предложен метод расчета концентрации и времени жизни молекул на основе геометрического определения понятие «молекула».

Рассчитана концентрация молекул H2 вдоль изотерм в области фазового перехода. Концентрация молекул составляет 100% в непроводящей фазе и плавно снижается с ростом плотности в проводящей. Полная диссоциация достигается при давлениях сильно больших, чем давление фазового перехода.

Рассчитано время жизни молекул H2. Время жизни падает на несколько порядков при фазовом переходе. Среднее межатомное расстояние в молекулах H2 претерпевает небольшой, но скачкообразный рост во время фазового перехода.

Обнаруженные корреляции указывают на процессы ионизации или возбуждения H2 в разогретом плотном водороде при фазовом переходе. После перехода молекулы

частично диссоциируют на одиночные атомы, степень ионизации плавно падает с продвижением в проводящую фазу.

Лаборатория №15.1 - электрофизики и плазменных процессов
Терешонок Дмитрий Викторович, с.н.с., зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Взаимодействие плазменных струй гелия с наклонными диэлектрическими поверхностями

Исследовано взаимодействие плазменной струй гелия с поверхностью диэлектрической пластины. В исследованных режимах плазменные струи распространяются в виде последовательности ионизационных волн (ИВ) или плазменных пуль. Пластины расположены под разными углами α = 0°, 10°, 30°, 45°, 60 ° и 90° относительно оси струи и имеют различные диэлектрические проницаемости $\varepsilon/\varepsilon_0$ и проводимости σ. Показано, что варьирование указанных параметров влияет на площадь контакта S плазмы ионизационной волны с поверхностью. В частности, для проводимостей $\sigma < 10^{-4}$ Ом$^{-1}$ см$^{-1}$ площадь контакта S слабо зависит от σ. В этом случае S в основном определяется относительной диэлектрической проницаемостью пластины $\varepsilon/\varepsilon_0$. При увеличении $\varepsilon/\varepsilon_0$ площадь S уменьшается. Для проводимостей $\sigma > 10^{-3}$ Ом$^{-1}$ см$^{-1}$ (значения, близкие к проводимости морской воды), S слабо зависит от $\varepsilon/\varepsilon_0$. В этом случае площадь контакта S полностью определяется проводимостью. Результаты, представленные в данной работе, представляют интерес для исследователей, работающим в области плазменной медицины.

Литература

1. Babaeva N.Yu., Naidis G.V., Tereshonok D. V., Zhang C., Huang B.,and Tao Shao, “Interaction of helium plasma jet with tilted targets: consequences of target permittivity, conductivity and incidence angle” // Plasma Sources Sci. Technol. (2021) **30** P. 115021

Исследование искрового разряда в фазе радиального расширения

Совместно с коллегами из РФЯЦ ВНИИЭФ и ДГУ выполнено экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование развития искрового разряда в геометрии острие-плоскость в воздухе при атмосферном давлении на временных масштабах ~30-300 нс после подачи высоковольтного импульса. На основании данных по эрозионному воздействию разряда и осциллограмм тока и напряжения выполнена оценка газодинамических процессов и получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, как по расширению искрового канала, так и по динамике ударной волны, которая возникает внутри плазменного канала и стартует с поверхности плоского электрода.

Литература

1. K I Almazova, A N Belonogov, V V Borovkov, Z R Khalikova, G B Ragimkhanov, D V Tereshonok and A A Trenkin Investigation of plasma properties in the phase of the radial expansion of spark channel in the “pinto-plate” geometry // Plasma Sources Sci. Technol. 2021 **30** 095020
2. К. И. Алмазоваа, А. Н. Белоногова, В. В. Боровкова, В. С. Курбанисмаилов, П. Х. Омарова, Г. Б. Рагимханов, Д. В. Терешонокс, А. А. Тренькина, З. Р. Халикова Исследование динамики микроструктурированного искрового канала в воздухе в геометрии “острие (анод)–плоскость” на стадии радиального расширения // Физика плазмы, 2021, **47**(1), с. 75–81.
3. К.И. Алмазова, А.А. Амирова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Г.Б. Рагимханов, Д.В. Терешонок, А.А. Тренькин, З.Р. Халикова Параметры микроканальной структуры в начальной фазе разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке «острие – плоскость» // Письма в ЖТФ, 2021, **47**(2), с. 24.

Найдис Георгий Вениаминович, г.н.с., д.ф.-м.н.,

Бабаева Наталья Юрьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.

Расчетно-теоретическое исследование плазменных струй

Методом численного моделирования исследован характер воздействия внешних полей на динамику и структуру ионизационных волн (ИВ) в плазменной струе гелия, истекающей в атмосферу [1]. Плазменная струя инициировалась отрицательным импульсом, приложенным к основному электроду. Ниже по потоку располагались внешние управляющие электроды, к которым прикладывалось положительное или отрицательное напряжение. Показано, что варьируя величину и полярность управляющего напряжения, можно менять скорость стримеров и отклонять их от оси струи. В частности, положительный импульс, приложенный к управляющему электроду, увеличивает электрическое поле, плотность электронов, температуру электронов и отрицательный объемный заряд во фронте ИВ. В результате скорость ИВ возрастает. Напротив, отрицательный управляющий импульс уменьшает скорость волны. В зависимости от величины объемного заряда фронт ИВ сжимается или растягивается вдоль вертикальной составляющей электрического поля.

Исследовано взаимодействие плазменной струи гелия с поверхностью диэлектрической пластины, в режимах, когда плазменные струи распространяются в виде последовательности ионизационных волн [2]. Пластины расположены под разными углами α = 0°, 10°, 30°, 45°, 60 ° и 90° относительно оси струи и имеют различные диэлектрические проницаемости $\varepsilon/\varepsilon_0$ и проводимости σ. Показано, что варьирование указанных параметров влияет на площадь контакта S плазмы ионизационной волны с поверхностью. В частности, для значений проводимости $\sigma < 10^{-4}$ Ом$^{-1}$ см$^{-1}$ площадь контакта слабо зависит от σ и в основном определяется величиной относительной диэлектрической проницаемости пластины $\varepsilon/\varepsilon_0$. При увеличении $\varepsilon/\varepsilon_0$ площадь S уменьшается. При $\sigma > 10^{-3}$ Ом$^{-1}$ см$^{-1}$ (для значений, близких к проводимости морской воды) S слабо зависит от $\varepsilon/\varepsilon_0$. В этом случае площадь контакта S полностью определяется величиной проводимости.

Исследование конверсии CO_2 в газоразрядной плазме

Рассмотрены режимы разрядов в CO_2, при которых конверсия происходит в основном за счет диссоциации электронным ударом [3]. Эффективность этого процесса оценивается в рамках приближенного аналитического подхода с использованием различных сечений диссоциации CO_2, имеющихся в литературе. Показано, что наилучшее соответствие совокупности представленных в литературе экспериментальных данных по эффективности конверсии в коронных и барьерных разрядах (отвечающих значениям приведенного электрического поля в плазме выше 90 Тд) обеспечивается при использовании, для оценки константы скорости диссоциации, сечений возбуждения электронных состояний, предложенных Фелпсом.

Разработана модель тлеющих разрядов в CO_2 [4]. В рамках этой модели получены аналитические выражения для параметров газоразрядной плазмы (электрического поля, электронной плотности, температуры газа, колебательной температуры антисимметричной моды), а также для мольной доли молекул CO, образующихся при диссоциации CO_2 электронным ударом. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, полученными в тлеющих разрядах в CO_2 при давлениях 0,4-5 Торр и токах 10-50 мА.

Литература

1. Babaeva N.Yu., Naidis G.V., Control of plasma jet dynamics by externally applied electric fields // Plasma Sources Science and Technology 2021, v.30, paper 095003. DOI: 10.1088/1361-6595/ac1ee3
2. Babaeva N.Yu., Naidis G.V., Tereshonok D.V., Zhang Ch., Huang B., Shao T., Interaction of helium plasma jet with tilted surfaces: consequences of surface dielectric properties //

Plasma Sources Science and Technology 2021, v.30, paper 115021. DOI: 10.1088/1361-6595/ac3212
3. Babaeva N.Yu., Naidis G.V., On the efficiency of CO_2 conversion in corona and dielectric-barrier discharges // Plasma Sources Science and Technology 2021, v.30, paper 03LT03. DOI: 10.1088/1361-6595/abe6e6
4. Naidis G.V., Babaeva N.Yu., Modeling of DC glow discharges in low-pressure CO_2 // Plasma Sources Science and Technology 2021, v.30, paper 105016. DOI: 10.1088/1361-6595/ac2a0c

Лаборатория 15.2. – вычислительной физики
Киверин Алексей Дмитриевич, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Механизм распространения быстрых волн горения кварцевого волновода под действием мощного лазерного излучения

Рассмотрены модели, описывающие механизм сверхбыстрого распространения плазмы в кварцевом волноводе под действием мощного лазерного импульса. Проведен анализ путей поглощения энергии. Впервые на основе недавно полученных экспериментальных данных учтено поглощение в области перед основным фронтом горения, связанное с разрушением среды ударной волной с интенсивностью более 30 кбар. Показано, что этот эффект определяет распространение волны поглощения со скоростью ~3 км/с, что наблюдалось экспериментально и до этого момента не находило объяснения. Также показано, что конкуренция между поглощением энергии за ударной волной и потерями импульса из-за поперечного расширения определяет колебания скорости волны поглощения. Пространственный период колебаний однозначно зависит от длины поглощения в области разрушения, а также от размера осколков. Полученные результаты позволяют получить интерпретацию уникальных экспериментальных данных по высокоскоростному разрушению световодов под действием мощного лазерного импульса.

Литература

1. Kiverin A.D., Efremov V.P. Compression-induced fracture in silicon dioxide as a mechanism of ultra fast plasma propagation under the action of intense laser pulse.// Acta Astronautica, 2021, V. 181, P. 655-659, 10.1016/j.actaastro.2021.01.023, Q1

Лаборатория №17.1 – плазменно-пылевых процессов
Жуховицкий Дмитрий Игоревич, г.н.с., д.ф.-м.н.

Экспериментальное и теоретическое исследование пылевых ионизационных волн

Пылевые ионизационные волны (ПИВ) представляют собой ранее не исследованный вид пространственных осцилляций пылевых частиц, наблюдающихся в комплексной плазме газового разряда низкого давления (10–20 Па) в аргоне и неоне в условиях микрогравитации. ПИВ возникают благодаря осцилляциям скорости электрон–ионной рекомбинации на поверхности пылевых частиц, а не вследствие собственной сжимаемости пылевого облака. Поскольку ПИВ характеризуются большой длиной волны, для их наблюдения необходимо формирование протяжённых участков комплексной плазмы. Экспериментальные данные, полученные на установке ПК-4 на борту Международной космической станции, где с помощью кольцевого электрода, на который подавалось синусоидальное напряжение с различной амплитудой и частотой от 1 до 20 Гц и возбуждались коллективные колебания частиц в протяжённом пылевом облаке, обрабатывались с целью получения дисперсионного соотношения. Разработанная теория основана на уравнениях движения и непрерывности для пылевых частиц, уравнении баланса для холодных ионов и распределении Больцмана для горячих электронов. Приближенное решение этих уравнений даёт дисперсионное соотношение для ПИВ, соответствующее соотношению, полученному из эксперимента. Показано, что существует

минимальная частота, при которой возможно распространение ПИВ; волновое число слабо зависит от частоты возбуждения волн; а фазовая скорость ПИВ практически пропорциональна частоте и может более чем на порядок превосходить скорость пылеакустических волн.

Литература

1. V.N. Naumkin, D.I. Zhukhovitskii, A.M. Lipaev, A.V. Zobnin, A.D. Usachev, O.F. Petrov, H.M. Thomas, M.H. Thoma, O.I. Skripochka, and A.A. Ivanishin, Excitation of progressing dust ionization waves on PK-4 facility, Phys. Plasmas, 2021, Volume 28, Number 10, 103704 DOI: 10.1063/5.0064497

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

Формирование сверхтвердых покрытий с гидрофильными и гидрофобными свойствами в процессе обработки низкотемпературной плазмой азота в открытой атмосфере пленок титана

В процессе обработки потоком равновесной низкотемпературной плазмой азота, генерируемой плазмотроном постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода, в открытой атмосфере формируется покрытие оксинитрида титана с структурой рутила с преимущественным содержанием кислорода и двукратным увеличением (в сравнении с рутилом TiO_2) микротвердости до 27 GPa. Нанесение оксинитридного покрытия приводит к упрочнению поверхности сапфировых стекол на 22-23% [1]. При одинаково высокой микротвердости порядка 25-27 GPa, контролируя состав азотной плазмы можно формировать либо гидрофильные (контактный угол 73º), либо гидрофобные покрытия (контактный угол 120º). Производительность и осуществление синтеза в открытой атмосфере позволяет рассматривать предложенную методику перспективной для получения сверхтвердых покрытий с высокой резистентностью к кислороду и обладающими гидрофильными или гидрофобными свойствами.

Литература

1. Muslimov A.E., Gadzhiev M.Kh. and Kanevsky V.M. New Approaches to Increasing the Superhydrophobicity of Coatings Based on ZnO and TiO2 // Coatings. 2021, 11, 1369. https://doi.org/10.3390/coatings11111369

Куликов Юрий Матвеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Исследование двойного сдвигового слоя на неравномерной расчетной сетке

Задача двойного слоя сдвига предоставляет удобную возможность для тестирования алгоритмов измельчения сетки, предназначенных для повышения точности вычислений в областях с высокой скоростью сдвига. Далее представляются результаты исследования некоторых особенностей процедуры измельчения и влияние сеточного разрешения на свойства течения и возникающую неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Использование функции задающей типа гиперболического тангенса показало, что измельчение сетки связано с использованием интегрального нелинейного преобразования. Отображение множества вложенных точек не является взаимно однозначным, т.е. одна и та же точка в разных сеточных множествах имеет различное положение. Кроме того, требуются несколько итераций для улучшения качества измельчения. Итерационный процесс позволяет получить результирующий набор сеток. Его точки оказываются стационарными для выполненного интегрального преобразования. Исследование начальных параметров сдвигового течения показало, что наибольший эффект измельчение дает на крупных сетках. В общем случае уточнение сетки приводит к увеличению начальной толщины импульса и толщины завихренности. Для выбранной гармоники (n=6) с наибольшей скоростью роста поле завихренности не демонстрирует каких-либо

численных артефактов (паразитных вихрей). Можно предположить, что это является следствием малых амплитуд возмущения, поскольку при больших амплитудах появление численных артефактов вполне возможно. Особенности постановки задачи, приводящей к появлению регулярной дорожки вихрей и их последующему слиянию в турбулентном каскаде, также обеспечивает достаточно быструю сходимость скорости вязкой диссипации [1].

Литература

1. Kulikov Yu. M. and Son E.E. Double shear layer evolution on the non-uniform computational mesh // Journal of Computational Physics (Elsevier).2021. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac3cf8

Лаборатория №21.1 – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики
Бочаров Алексей Николаевич, в.н.с., зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Модель сильноточного разряда в воздухе

Главной стадией разряда молнии (или обратным ударом) обычно называют процессы, начинающиеся после замыкания промежутка земля – облако. Главная стадия молнии характеризуется протеканием большого тока (десятки килоампер), высокими температурами в канале (20 – 30 кК) молнии, мощным электромагнитным излучением. Знание всей совокупности физических процессов на главной стадии молнии необходимо не только для изучения физики молнии, но и для анализа явления молнии с точки зрения молниезащиты. Для изучения процессов, характеризующих главную стадию, была разработана физическая и компьютерная модель сильноточного разряда в воздухе. Модель основана на совместном решении уравнений газовой динамики, электродинамики, переноса излучения. Разработанная модель была применена для сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований сильноточных разрядов в воздухе с амплитудой тока до 100 кА и фронтом нарастания тока 13 – 25 μс и результатов численных исследований.

Установлено, что разработанная модель разряда хорошо количественно описывает всю совокупность экспериментальных данных по эволюции температуры, электронной концентрации, давления, размеров плазменного канала и др. во всем диапазоне разрядных токов до 100 кА. Разработанная модель может быть применена для исследования характеристик типичных молний в атмосфере и лабораторных экспериментов по длинной искре.

Литература

1. Bocharov A.N., Mareev E.A., and Popov N.A. “High-current arc discharge in air” Journal of Physics: Conference Series 2100 (2021) 012031, doi:10.1088/1742-6596/2100/1/012031.
2. Aleksey Bocharov, Evgeny A. Mareev, and Nikolay A Popov “Numerical simulation of high-current pulsed arc discharge in air” J. Phys. D: Appl. Phys. **55** (2022) 115204, https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac3866.

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

119991, Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН
Отдел физической электроники
Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Васенина Ирина Владимировна, м.н.с, к.ф.-м.н.

Позиционирование наносекундного диффузно-канального разряда в атмосферном воздухе

На основе концепции цепочек ионизационных лавин электронов, генерирующих убегающие электроны и фотоэлектроны с катода, построена модель наносекундного диффузно-канального разряда, объясняющая с единой позиции формирование как объёмной, так и контрагированной формы импульсного разряда в газе. Показано, что кроме широко известных таунсендовского и стримерного разрядов в газе существует третий тип разряда – наносекундный диффузно-канальный разряд. Он происходит при многократном перенапряжении на исследуемом промежутке. Исследование проводится на примере воздуха при нормальных условиях в однородном электрическом поле. В этом случае отношение d/xk >> 1, где d – длина промежутка, xk – длина критической лавины электронов. Электрическое поле на головке такой лавины достигает 1 МВ/см и более, поэтому она испускает убегающие электроны, которые создают новые электроны впереди старых. Образуется лавинная цепь, формально аналогичная стримеру, но с низкой электропроводностью. Убегающие электроны и фотоэмиссия с катодов от ультрафиолетовых фотонов способствуют накоплению вторичных электронов в промежутке. Это приводит к появлению диффузного тлеющего разряда, который затем переходит в канальный разряд и дугу. Рассчитана зависимость коэффициента перенапряжения η от произведения pd, где p – давление газа при d/xk = 10. Она сравнивается с хорошо известной кривой, которая разделяет таунсендовский и стримерный разряды.

Литература

1. Mesyats G.A., Vasenina I.V. Characterization of Nanosecond Diffuse-Channel Discharges in Atmospheric Air. Plasma Phys. Rep., 2021, Vol. 47, No. 9, pp. 907 - 911. DOI: 10.1134/S1063780X2109004X

Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Зубарев Николай Михайлович в.н.с, д.ф.-м.н.
(Работа выполнена совместно с ИЭФ УрО РАН).

Инициирование взрывной электронной эмиссии и убегание электронов при импульсном пробое плотных газов

Предложен механизм инициирования взрывной электронной эмиссии и последующей генерации убегающих электронов на границе катода и плотного газа, основанный на накоплении у естественных микровыступов положительных ионов, образующихся в результате ионизации газа автоэмиссионными электронами. Расстояние, на котором рождаются ионы, падает с ростом плотности газа, что приводит к увеличению их кулоновского поля на эмитирующей поверхности. В итоге для газа высокого – в десятки атмосфер – давления за десятки пикосекунд на катоде образуются взрывоэмиссионные центры.

Литература

1. Zubarev N.M., Mesyats G.A. Initiation of Explosive Electron Emission and Runaway of Electrons during Pulsed Breakdown of Dense Gases. JETP Letters, 2021, Vol. 113, No 4, pp. 259 - 264. DOI: 10.1134/S0021364021040123

Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Баренгольц Сергей Александрович г.н.с, д.ф.-м.н, Орешкин Е.В. с.н.с, к.ф.-м.н.
(Работа выполнена совместно с ИОФ РАН, ИСЭ СО РАН и ОИВТ РАН).

Механизм самоподдержания электрического разряда в вакууме

Впервые проведено моделирование динамики изменения фазового состояния вещества катода при взрыве микровыступа на его поверхности в процессе взрывной электронной эмиссии. Показано, что под действием давления, оказываемого прикатодной плазмой, образованной при взрыве микровыступа, происходит практически полное вытеснение жидкого металла из зоны микровзрыва. Это приводит к образованию

микронеоднородности поверхности на краю образующегося кратера. Таким образом создаются условия для формирования новых микровыступов, взрыв которых обеспечивает самоподдержание и цикличность процессов в вакуумном разряде. Проведенное моделирование позволило определить длительность разрядного импульса для эффективного кондиционирования электродов. Показано, что для предотвращения образования новых эмиссионных центров длительность импульса не должна превышать 1-2 нс. В этом случае происходит сглаживание поверхности, а новый микровыступ не успеет сформироваться.

Литература

1. Barengolts S.A., Uimanov I.V., Oreshkin V.I., Khishchenko K.V., Oreshkin E.V. Plasma-liquid interaction during a pulsed vacuum breakdown. Journal of Applied Physics, 2021, Vol. 129, No. 13, 133301. DOI: 10.1063/5.0044303

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

Эффект стока и учет связанных с ним возмущений при зондовой диагностике плазмы

Развит метод учета искажений результатов измерений параметров свободных электронов зондом Ленгмюра, связанных со стоком на зонд медленных электронов. Коррекция измеряемых функций распределений электронов по энергиям (ФРЭЭ) возможна, в том числе, в условиях нелокального формирования электронного спектра. Проведены измерения и расчеты ФРЭЭ в неоднородной плазме разряда, поддерживаемого полым катодом. Методами прямого моделирования Монте-Карло показано, что ФРЭЭ адекватно описывается решениями локального уравнения Больцмана (УБ) в области энергий проявления эффекта стока. Это положено в основу метода коррекции данных прямых измерений в с использованием алгоритмов решения локального кинетического уравнения. Напротив, в области энергий выше средних по спектру, где существенны нелокальные механизмы, искажения результатов прямых измерений за счет эффекта стока малы.

Литература

1. S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy, N. A. Dyatko, I. V. Kochetov and V. N. Ochkin. Electron sink on the Langmuir probe in plasma, its influence on measurements and methods to account for it. Plasma Sources Sci. Technol. 30 (2021) 095004 (12pp).
2. S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin. Spatial Variations of Plasma Parameters in a Hollow Cathode Discharge. Plasma Chemistry and Plasma Processing (2021) 41:659–67.

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

117218, Москва, Нахимовский проспект, 34

Лаборатория Микроструктурирования и Субмикронных Приборов
Руденко Константин Васильевич, г.н.с., зам. директора по научной работе, д.ф.-м.н., проф.
Мяконьких Андрей Валерьевич, с.н.с., к.ф.-м.н
Ломов Андрей Александрович, в.н.с., д.ф.-м.н
Рогожин Александр Евгеньевич, с.н.с., к.ф.-м.н
Смирнова Елизавета Алексеевна, м.н.с.
Кузьменко Виталий Олегович м.н.с.

Плазменные технологии для формирования гетероструктур полупроводник-сегнетоэлектрик и полевые транзисторы для нейроморфных, фотонных и радиочастотных интегральных схем

Совместно с ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН впервые предложены и реализованы термостабильные гетероструктуры кремний-на-сегнетоэлектрике (SOF), совместимые с современной кремниевой КМОП-технологией. Методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD) на основе HfO_2 сформированы многослойные диэлектрические стеки как составная часть структур. В структурах КНС и КНИ, выполненных бондингом слоя кремния на поверхность диэлектрика, стек с ультратонкими слоями скрытого оксида и эквивалентной толщиной UTBOX менее 5 нм продемонстрировал сегнетоэлектрические свойства изолятора HfO_2 или HfO_2/Al_2O_3 (10:1). На основе структур кремний-на-сегнетоэлектрике в виде 100 мм подложек разработаны двухзатворные сегнетоэлектрические транзисторы 2G FeFET, обладающие сегнетоэлектрическим гистерезисом с окном памяти 1.2-1.3 В и построены их компактные математические модели. Впервые создан интегрируемый прибор, обладающий свойствами логики и памяти одновременно, что приближает его функционал к нейрону человеческого мозга. Это открывает новые перспективы не только для изготовления нового типа энергонезависимой памяти, способной к интеграции до проектных норм 22-16 нм, но и для разработки принципиально новых архитектур процессоров для нейроморфных вычислений.

Плазменно-стимулированные процессы атомно-слоевого осаждения рутения для систем металлизации интегральных схем

Исследована возможность формирования рутениевых проводников для систем межсоединений ИС методами плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения. Тонкие пленки рутения наносились методом PEALD с использованием металлорганического прекурсора $Ru(EtCp)_2$ и кислородной плазмы на модифицированную поверхность кремния и подложек SiO_2/Si. Обнаружено, что механизм роста пленки существенно зависит от температуры подложки. Анализ GXRD и SIMS показывает, что при температуре подложки T = 375 °C происходит резкое изменение механизмов поверхностных реакций, что приводит к изменению состава пленки от RuO_2 при низких температурах до пленки чистого Ru при более высоких температурах. Эти данные подтверждаются измерениями электросопротивления пленок на основе Ru. Также проанализировано механическое напряжение в пленках, и высказано предположение, что этот фактор увеличивает шероховатость поверхности растущих пленок Ru. Наименьшая шероховатость поверхности ~ 1,5 нм достигнута при толщине пленки 29 нм при использовании SiO_2/Si-подложки при 375 °C. Измеренное удельное сопротивление пленки Ru составляет 18–19 мкОм·см.

Теоретическое и экспериментальное исследование перспективных процессов плазмохимического травления (ПХТ) для структур микроэлектроники

Исследовано низкоповреждающее плазменное травление пористых диэлектриков (Low-k) и глубокое анизотропное травление структур кремния. Проведено теоретическое исследования криогенного процесса глубокого анизотропного травления кремния в плазме смеси SF_6/O_2. Полученная модель описывает температурную зависимость скорости травления кремния и закономерности формирования анизотропного профиля, в том числе его дефектов (отклонения стенок от вертикали, шероховатости), и позволяет предложить пути их минимизации. Исследованы зависимости селективности процессов ПХТ по отношению к электронному резисту HSQ для различных металлических и диэлектрических материалов, а также кремния. Предложены механизмы повышения селективности к маске процессов травления материалов. Достигнуты значения селективность травления слоев оксида гафния и нитрида кремния достигла значения 1:3, для кремния - 1:19. Полученные результаты важны для разработки прототипов приборов наноэлектроники с критическими размерами до 7 нм. Впервые показано, что в

индуктивно-связанной плазме CF_3Br при давлениях 5-25 мТорр концентрация радикалов фтора существенно превосходит концентрацию атомарного брома. Указанный результат позволит оптимизировать процессы формирования систем металлизации ИС.

Литература

1. V.P. Popov, V.A. Antonov, F.V. Tikhonenko, S.M. Tarkov, A.K. Gutakovskii, I.E. Tyschenko, A.V. Miakonkikh, A.A. Lomov, A.E. Rogozhin, and K.V. Rudenko. Robust Semiconductor-on-Ferroelectric Structures with Hafnia-Zirconia-Alumina UTBOX Stacks Compatible with the CMOS Technology. Journal of Physics D: Applied Physics. **54** (22), 225101 2021. https://doi.org/10.1088/1361-6463/abe6cb
2. V. P. Popov, F. V. Tikhonenko, V. A. Antonov, A.K. Gutakovskii, V.I. Vdovin, S. G. Simakin, K. V. Rudenko. Blister suppression in the CO^+ molecule implanted SOI substrates with ultrathin buried oxides. Materials Today Communications **28** (2021) 10249. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102498
3. Popov, V.P., Tarkov, S.M., Tikhonenko, F.V., Antonov, V.A., Tyschenko, I.E., Simakin, S.G. and Rudenko, K.V. Thermally Robust High-Resistance Layers on Low-Resistance Silicon Synthesized by Molecular CO^+ Ion Implantation. Phys. Status Solidi A, 218: 2100109. https://doi.org/10.1002/pssa.202100109
4. F. Tikhonenko, V. Antonov, V. Popov, A. Miakonkikh and K. Rudenko, Thermal Stability of Ferroelectricity in Hafnia-Zirconia-Alumina Buried Oxide Stacks, *2021 Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EuroSOI-ULIS)*, 2021, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EuroSOI-ULIS53016.2021.9560687.
5. V. Antonov, S. Tarkov, V. Popov, A. Miakonkikh, A. Lomov and K. Rudenko, Silicon and hafnia thin film transfer on c-plane sapphire: effect of substrate thickness on the ferroelectric hafnia properties, *2021 Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EuroSOI-ULIS)*, 2021, pp. 1-4, DOI:: 10.1109/EuroSOI-ULIS53016.2021.9560187.
6. Rogozhin A., Miakonkikh A., Smirnova E., Lomov A., Simakin S., Rudenko K. Plasma enhanced atomic layer deposition of ruthenium films using ru(Etcp)2 precursor (2021) Coatings, 11 (2), art. no. 117, pp. 1-11. https://doi.org/10.3390/coatings11020117
7. E A Smirnova, A V Miakonkikh, A E Rogozhin and K V Rudenko. Properties of plasma enhanced atomic layer deposited ruthenium thin films from Ru(EtCp)2// 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2086 012209, https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012209
8. Miakonkikh A.V., Shishlyannikov A.V., Tatarintsev A.A., Kuzmenko V.O., Rudenko K.V., Gornev E.S. Study of the Plasma Resistance of a High Resolution e-Beam Resist HSQ for Prototyping Nanoelectronic Devices (2021) Russian Microelectronics, 50 (5), pp. 297-302. https://doi.org/10.1134/S1063739721050048
9. Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V., Low-Pressure Inductively Coupled CF3Br Plasma Studied by the Langmuir Probe and Optical Emission Spectroscopy Techniques (2021) Technical Physics Letters, 47 (1), pp. 99-102. https://doi.org/10.1134/S1063785021010247
10. Kuzmenko V., Miakonkikh A., Rudenko K. Application of Langmuir probe and optical emission spectroscopy for bromofluorocarbon plasma diagnostics (2021) Journal of Physics: Conference Series, 1870 (1), art. no. 012006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1870/1/012006
11. Rudenko M.K., Myakon'kikh A.V., Lukichev V.F. Numerical Simulation of Cryogenic Etching: Model with Delayed Desorption (2021) Russian Microelectronics, 50 (1), pp. 54-62. https://doi.org/10.1134/S106373972101008X
12. V Kuzmenko, A Miakonkikh and K Rudenko // Optimization of deep silicon etching process for microstructures fabrication, 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2086 012190, https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012190