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

Научный совет Российской академии наук по комплексной проблеме “Физика низкотемпературной плазмы”

ОТЧЕТ
Научного совета за 2018 год

Председатель Научного совета РАН
по комплексной проблеме
«Физика низкотемпературной плазмы»
академик ***В.Е. Фортов***

МОСКВА 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы» 3

ИНФОРМАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СОВЕТА 3

СТРУКТУРА Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы» 4

МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА....8

ПРОТОКОЛ №2 заседания Научного совета от 21 ноября 2018 г.....9

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2018 г. 11

Акционерное Общество Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») 11

Валенсийский политехнический университет (Испания)....12

Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”....13

Дагестанский государственный университет 14

Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ 17

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХСРАН)....18

Институт общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФРАН) 19

Институт проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН) 19

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси 20

Институт физических исследований и технологий Российского университета дружбы народов (ИФИТ РУДН)....21

Институт электрофизики УрО РАН....23

Научно-исследовательский центр теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН (НИЦ-1 ТЭС ОИВТ РАН) 24

Научно-исследовательский центр физико-технических проблем энергетики ОИВТ РАН (НИЦ-2 ФТПЭ ОИВТ РАН)....29

Научно-исследовательский центр электрофизики и тепловых процессов ОИВТ РАН (НИЦ-4 ЭФТП ОИВТ РАН)....31

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (НИЯУ МИФИ)....33

Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ) 35

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" 37

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)....38

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)....43

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ) 44

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН) 45

ЗАДАЧИ
Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика 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 комплексной проблеме «Физика 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/

СТРУКТУРА
Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы»

СОСТАВ СОВЕТА

Председатель Совета	академик РАН, ОИВТ РАН	**Фортов Владимир Евгеньевич**
1-й заместитель Председателя Совета	академик РАН, ОИВТ РАН	**Сон Эдуард Евгеньевич**
Заместитель Председателя Совета	д.ф.-м.н., ИНХС РАН	**Лебедев Юрий Анатольевич**
Заместитель Председателя Совета	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН	**Воробьев Владимир Сергеевич**
Ученый секретарь Научного совета	к.ф.-м.н., ОИВТ РАН	**Гаджиев Махач Хайрудинович**

БЮРО СОВЕТА

1.	**Акишев Юрий Семенович**	д.ф.-м.н., Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)
2.	**Зеленый Лев Матвеевич**	д.ф.-м.н., академик РАН, Институт космических исследований (ИКИ РАН)
3.	**Ильгисонис Виктор Игоревич**	д.ф.-м.н., Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (Росатом)
4.	**Иосилевский Игорь Львович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
5.	**Кашапов Наиль Фаикович**	д.т.н., Казанский федеральный университет (КФУ)
6.	**Литвак Александр Григорьевич**	д.ф.-м.н. академик РАН, Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН)
7.	**Месяц Геннадий Андреевич**	д.ф.-м.н. академик РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН)
8.	**Минцев Виктор Борисович**	д.ф.-м.н., чл.-корр РАН, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова (ИХФ РАН)
9.	**Петров Олег Федорович**	д.ф.-м.н. академик РАН, Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
10.	**Смирнов Валентин**	д.ф.-м.н., академик РАН, Государственная

	Пантелеймонович	корпорация по атомной энергии «Росатом» (Росатом)
11.	**Шарков Борис Юрьевич**	д.ф.-м.н., академик РАН, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ РАН)

ЧЛЕНЫ СОВЕТА

1.	**Александров Николай Леонидович**	д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (МФТИ)
2.	**Амиров Равиль Хабибулович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
3.	**Андреев Николай Евгеньевич**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
4.	**Асташинский Валентин Миронович**	д.ф.-м.н., чл.-корр. НАН Беларусии, Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси (ИТМО НАН)
5.	**Ашурбеков Назир Ашурбекович**	д.ф.-м.н., Дагестанский государственный университет (ДГУ)
6.	**Бабаева Наталья Юрьевна**	к.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
7.	**Битюрин Валентин Анатольевич**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
8.	**Бочаров Алексей Николаевич**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
9.	**Василяк Леонид Михайлович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
10.	**Гавриков Андрей Владимирович**	к.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
11.	**Голубев Александр Александрович**	д.ф.-м.н., Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова (ИТЭФ)
12.	**Голубев Сергей Владимирович**	д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН)
13.	**Голубовский Юрий Борисович**	д.ф.-м.н., Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)
14.	**Горшков Олег Анатольевич**	д.т.н., Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» (Роскосмос)

15.	**Грязнов Виктор Константинович**	д.ф.-м.н., Институт проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН)
16.	**Гуревич Александр Викторович**	д.ф.-м.н., академик РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН)
17.	**Дьячков Лев Гаврилович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
18.	**Жуховицкий Дмитрий Игоревич**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
19.	**Зеленер Борис Борисович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
20.	**Змитренко Николай Васильевич**	д.ф.-м.н., Институт математического моделирования РАН (ИММ РАН)
21.	**Карасев Виктор Юрьевич**	д.ф.-м.н., Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)
22.	**Коваль Николай Николаевич**	д.т.н., Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН)
23.	**Королев Юрий Дмитриевич**	д.ф.-м.н., Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН)
24.	**Коссый Игорь Антонович**	д.ф.-м.н., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН)
25.	**Курнаев Валерий Александрович**	д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (МФТИ)
26.	**Левашов Павел Ремирович**	к.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
27.	**Ломоносов Игорь Владимирович**	д.ф.-м.н., Институт химической физики им. Н.Н. Семенова (ИХФ РАН)
28.	**Лукичев Владимир Федорович**	д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН)
29.	**Майоров Сергей Алексеевич**	д.ф.-м.н., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН)
30.	**Мочалов Михаил Алексеевич**	д.ф.-м.н., Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики Российский федеральный ядерный центр (ВНИИЭФ)
31.	**Найдис Георгий Вениаминович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
32.	**Новопашин Сергей**	д.ф.-м.н., Сибирское отделение РАН (СО РАН)

	Андреевич	
33.	**Норман Генри Эдгарович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
34.	**Очкин Владимир Николаевич**	д.ф.-м.н., Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН)
35.	**Пикуз Сергей Алексеевич**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
36.	**Попель Сергей Игоревич**	д.ф.-м.н., Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН)
37.	**Попов Николай Александрович**	д.ф.-м.н., Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)
38.	**Рамазанов Тлеккабул Сабитович**	д.ф.-м.н. академик НАН РК, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (КазНУ)
39.	**Синкевич Олег Арсеньевич**	д.ф.-м.н., Московский энергетический институт (МЭИ)
40.	**Смирнов Борис Михайлович**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
41.	**Старостин Андрей Никонович**	д.ф.-м.н., Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)
42.	**Ступицкий Евгений Леонидович**	д.т.н., Московский физико-технический институт (МФТИ)
43.	**Титов Валерий Александрович**	д.ф.-м.н., Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН (ИХР РАН)
44.	**Ткаченко Игорь Михайлович**	д.ф.-м.н., Валенсийский политехнический университет
45.	**Фомин Василий Михайлович**	д.ф.-м.н., академик РАН, Сибирское отделение РАН (СО РАН)
46.	**Филиппов Анатолий Васильевич**	д.ф.-м.н., Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)
47.	**Храпак Алексей Георгиевич**	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
48.	**Шпатаковская Галина Васильевна**	д.ф.-м.н. Институт математического моделирования РАН (ИММ РАН)

МЕРОПРИЯТИЯ СОВЕТА

№	Мероприятие	Время и место проведения
1.	**XXXIII International Conference on Equations of State for Matter.**	1–6 марта 2018 г., п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, Россия.
2.	**XLV Международная конференция по физике плазме и УТС.**	2–6 апреля 2018 г., г. Звенигород Московской обл., Россия.
3.	**XVII Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике.**	17–19 апреля 2018 г., г. Москва, Россия.
4.	**Xth INTERNATIONAL WORKSHOP on MICROWAVE DISCHARGES: Fundamentals and Applications.**	3–7 September 2018, Zvenigorod, Russia.
5.	**VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTAPC-2018).**	10–15 сентября 2018 г., г. Иваново, Россия.
6.	**6th International Congress Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018).**	16–22 September, 2018, in Tomsk, Russia.
7.	**8-ой Международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (NEPCAP 2018).**	1–5 октября 2018 г., г. Сочи, Россия.
8.	**XV Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-15).**	15–19 октября 2018 г., г. Москва, Россия.
9.	**X Всероссийская конференция по физической электронике (ФЭ-2018).**	24–27 октября 2018 г., г. Махачкала, Россия.
10.	**XI Конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение».**	13–15 ноября 2018 года в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».
11.	**Заседание Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы»**	21 ноября 2018г. в 15.00. Москва, Ленинский проспект 32а, Новое здание Президиума РАН, 1-ый подъезд, 3-ий этаж, Красный зал.

ПРОТОКОЛ №2 заседания Научного совета от 21 ноября 2018 г.

Повестка дня:

1. Научное сообщение: «Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы». Докладчик: д.ф.-м.н., Смирнов Борис Михайлович, ОИВТ РАН.
2. Научное сообщение: «Точечный плазменный источник экстремального ультрафиолета, поддерживаемый газовым разрядом терагерцового излучения». Докладчик: д.ф.-м.н., Водопьянов Александр Валентинович, ИПФ РАН.
3. Отчет Научного совета за 2018г.
4. План работы Научного совета на 2019г.
5. Организационные вопросы.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

Бюро Совета		
1.	Сон Эдуард Евгеньевич	1-й зам. председателя, д.ф.-м.н., академик РАН, ОИВТ РАН
2.	Воробьев Владимир Сергеевич	Зам. председателя, д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
3.	Лебедев Юрий Анатольевич	Зам. председателя, д.ф.-м.н., ИНХС РАН
4.	Гаджиев Махач Хайрудинович	Уч.секр., к.ф.-м.н., ОИВТ РАН
5.	Иосилевский Игорь Львович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
6.	Кашапов Наиль Фаикович	д.т.н., ФГАОУ ВО КФУ
7.	Месяц Геннадий Андреевич	д.ф.-м.н., академик РАН, ФИАН
8.	Минцев Виктор Борисович	д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, ИХФ РАН
9.	Шарков Борис Юрьевич	д.ф.-м.н., академик РАН
Члены Совета		
1.	Александров Николай Леонидович	д.ф.-м.н., МФТИ
2.	Амиров Равиль Хабибулович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
3.	Андреев Николай Евгеньевич	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
4.	Бабаева Наталья Юрьевна	к.ф.-м.н., ОИВТ РАН
5.	Битюрин Валентин Анатольевич	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
6.	Бочаров Алексей Николаевич	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
7.	Василяк Леонид Михайлович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
8.	Голубев Александр Александрович	д.ф.-м.н., ИТЭФ
9.	Голубев Сергей Владимирович	д.ф.-м.н., ИПФ РАН
10.	Голубовский Юрий Борисович	д.ф.-м.н., СПБГУ
11.	Горшков Олег Анатольевич	д.т.н., ЦНИИМАШ
12.	Грязнов Виктор Константинович	д.ф.-м.н., ИПХФ РАН
13.	Дьячков Лев Гаврилович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
14.	Жуховицкий Дмитрий Игоревич	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
15.	Зеленер Борис Борисович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
16.	Змитренко Николай Васильевич	д.ф.-м.н., ИММ РАН
17.	Карасев Виктор Юрьевич	д.ф.-м.н., СПБ ГУ
18.	Коссый Игорь Антонович	д.ф.-м.н., ИОФ РАН
19.	Курнаев Валерий Александрович	д.ф.-м.н., МИФИ
20.	Ломоносов Игорь Владимирович	д.ф.-м.н., ИХФ РАН
21.	Найдис Георгий Вениаминович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
22.	Очкин Владимир Николаевич	д.ф.-м.н., ФИ РАН
23.	Синкевич Олег Арсеньевич	д.ф.-м.н., МЭИ
24.	Смирнов Борис Михайлович	д.ф.-м.н., ОИВТ РАН
25.	Ступицкий Евгений Леонидович	д.т.н., МФТИ
26.	Титов Валерий Александрович	д.ф.-м.н., ИХР РАН
27.	Шпатаковская Галина Васильевна	д.ф.-м.н., ИММ РАН

ВЫСТУПАЛИ:
Э.Е. Сон, В.С. Воробьев, Ю.А. Лебедев.
СЛУШАЛИ:

1. Э.Е. Сона с приветственным обращением к членам Совета и необходимости обсудить на заседании вопросы, связанные с возможностью подготовки дорожной карты по физике низкотемпературной плазмы, вопросы по издательской деятельности журналов, об организации конференций и о Лауреатах премии по физике низкотемпературной плазмы.
2. Научное сообщение: «Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы». Докладчик: д.ф.-м.н., Смирнов Борис Михайлович, ОИВТ РАН.
3. Научное сообщение: «Точечный плазменный источник экстремального ультрафиолета, поддерживаемый газовым разрядом терагерцового излучения». Докладчик: д.ф.-м.н., Водопьянов Александр Валентинович, ИПФ РАН.
4. Э.Е. Сона, В.С. Воробьева, Ю.А. Лебедева отчет Научного совета за 2018г.
5. Э.Е. Сона, план работы Научного совета на 2019г. и планы проведения конференций и мероприятий в 2019г.

ОТМЕТИЛИ:

1. Высокую активность членов Научного совета.
2. В конференциях, проходящих при участии Научного совета, кроме активного участив в организации необходимо участия членов Научного совета в экспертизе докладов и проводить отбор пленарных и устных докладов по значимости и новизне полученных результатов. В конференциях с участием других Научных советов, количество представленных докладов по направлению «Физика низкотемпературной плазмы» должно быть не менее 30% (1/3).
3. О необходимости подготовки дорожной карты России по направлению «Физика низкотемпературной плазмы». Например, в дорожной карте США по направлению «Физика низкотемпературной плазмы» обозначены следующие основные направления:
   1) Плазменная атомная физика и взаимодействие с химией и биологией.
   2) Турбулентность и транспорт.
   3) Взаимодействие плазмы и волн.
   4) Статистическая механика плазмы.
   5) Самоорганизация плазмы.
4. В последние годы произошла реорганизация издательской деятельности. Все журналы сгруппированы по отделениям и на аукционе решается, какое финансирование выделяется журналу из средств отделения РАН. Происходит реорганизация издательств по западному принципу, создаются объединенные издательства, курирующие минимум два журнала, где за работу с 1000 стр. отвечает один человек. Журналы должны быть доступны в электронной форме и постепенно отказаться от бумажного носителя.
5. С 2019 г. РФФИ будет выделять финансирование не на проведение конкретной конференции, а по секциям РАН, которая и будет распределять средства. Поэтому все организации планирующие проводить конференции должны в начале года представить данные о планируемой конференции в соответствующую секцию РАН.
6. В соответствии с традициями научных Советов по физике плазмы в Европе и США предлагается принять положение о Лауреатах премии по физике низкотемпературной плазмы в трех категориях:
   1) Лауреат премии за заслуги в научной и образовательной деятельности в области физики низкотемпературной плазмы.
   2) Лауреат премии за лучшие достижения в завершающем году в области физики низкотемпературной плазмы (может быть коллективов).

3) Лауреат премии для молодых ученных за достижения в области физики низкотемпературной плазмы (до 35 лет).

7. Председателям конференций, проводимых и организованных Научным советом, представить отчеты о работе конференций за 2018 г. и планы проведения конференций за 2019 г.
8. Членам Совета до 20 декабря 2018 года представить полученные результаты в 2018г. по направлению «Физика низкотемпературной плазмы» для включения в годовой отчет Научного совета РАН за 2018г.

РЕШИЛИ:

1. Необходимость активного участия членов Совета не только в Российских конференциях, но и в зарубежных.
2. До 1 апреля 2019 г. всем членам Совета представить свои предложения по подготовке дорожной карты России по направлению «Физика низкотемпературной плазмы». Определить основные направления, цели, задачи и ожидаемые результаты на ближайшие 5-10 лет и лидеров в России по каждому направлению.
3. На очередном заседании Научного совета обсудить представленную дорожную карту по направлению «Физика низкотемпературной плазмы».
4. Принять положение о вручении премии Лауреата по физике низкотемпературной плазмы в трех категориях. Учредить в первой и во второй номинации по одной премии в год, третей номинации до 3 премий в год и увеличить возраст номинанта до 39 лет.
5. Создать комиссию по присуждению Лауреата премии по физике низкотемпературной плазмы в трех предложенных категориях. Членам Совета прислать свои предложения по составу комиссии.
6. Первую премию в этом году вручить Смирнову Борису Михайловичу за заслуги в научной и образовательной деятельности в области физики низкотемпературной плазмы.
7. Необходимо создать фонд Научного совета, для финансирования мероприятий, организованных Советом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2018 г.

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

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

Лаборатория Кинетики Слабоионизованной Плазмы

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

Трушкин Николай Иванович, в.н.с., д.ф.-м.н.

Каральник Владимир Борисович, в.н.с., к.ф.-м.н.

Апонин Григорий Иванович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Петряков Александр Викторович, н.с.

Попов Константин Борисович, инженер

Саттаров Олег Ниязович, инженер

Сильно перенапряженный открытый разряд в D_2 низкого давления как интенсивный источник убегающих электронов до 25 кэВ

Сильно перенапряженный открытый разряд в узком промежутке (2-3 мм) между сплошным катодом и сетчатым анодом используется для генерации импульсных электронных пучков с энергией до 100 кэВ. Сильно перенапряженный (СП) режим неустойчив, разряд стремится перейти в низковольтный (НВ) режим, бесполезный для

генерации е-пучка. Мы изучили этот переход на примере трехэлектродного открытого разряда в дейтерии при низком давлении (около 0.5 - 2 Торр), возбуждаемого ступенчатым напряжением с амплитудой до 25 кВ. Наличие вспомогательного электрода обеспечивает более стабильное срабатывание открытого разряда, генерирующего электронные пучки с энергией до 25 кэВ. Физические свойства СП и НВ режимов и переход между ними исследованы с использованием быстрой многокадровой камеры, синхронизованной с током и напряжением разряда [1]. Полученный набор данных поясняет пространственно-временную эволюцию открытого разряда в перенапряженном режиме вплоть до его перехода в низковольтный режим, в котором наблюдается формирование катодных токовых пятен.

Свойства коаксиального ДБР в быстром потоке воздуха, формирующего плазменную струю

Создан газоразрядный источник, формирующий плазменную струю в быстром потоке воздуха при атмосферном давлении. Источник основан на диэлектрическом барьерном разряде (ДБР) коаксиальной геометрии, возбуждаемым синусоидальным напряжением высокой частоты (100 кГц). Особенность этого ДБР в том, что внутренний штыревой электрод не входит в зону, формируемую внешним цилиндрическим электродом. Диэлектрическим барьером являются керамическая или кварцевая трубки. Обнаружено два режима работы разряда - с низкой мощностью и высокой мощностью. Исследована эволюция плазменной струи при варьировании скорости потока и амплитуды приложенного напряжения [2]. С помощью быстрой многокадровой камеры, синхронизированной с током и напряжением разряда, исследована динамика пространственной структуры разрядной зоны ДБР и плазменной струи в режиме с высокой мощностью. Распространения ионизационных волн (plasma bullets) в плазменной струе не обнаружено.

Состав активных частиц в плазменной струе, создаваемой барьерным разрядом в потоке атмосферного воздуха

Проведены исследования по составу активных частиц в плазменной струе, сформированной коаксиальным барьерным разрядом (БР) в быстром потоке воздуха (скорость 30-80 м/с) при атмосферном давлении. Барьерный разряд возбуждается синусоидальным напряжением высокой частоты (100 кГц). Состав активных частиц исследован спектроскопически как в разрядной зоне, так и в плазменной струе вне разрядной зоны [3]. Анализ полученных результатов позволил предложить набор главных электрон-нейтральных и нейтрал-нейтральных процессов в газоразрядной зоне БР и в воздушной плазменной струе.

Литература

1. Yuri Akishev et al. Three-electrode strongly overvoltage open discharge in D_2 as an effective source of the high-current beam of runaway electrons with energy up to 25 keV //J. Phys. D: Appl. Phys. **51** 394003 (2018), DOI: 10.1088/1361-6463/aad704
2. Yuri Akishev *et al.* On the composition of reactive species in air plasma jets and their influence on the adhesion of polyurethane foam to low-pressure polyethylene //J. Phys. D: Appl. Phys. **51** 274006 (2018), DOI: 10.1088/1361-6463/aac5fd
3. Yuri Akishev *et al.* On the composition of reactive species in air plasma jets and their influence on the adhesion of polyurethane foam to low-pressure polyethylene //J. Phys. D: Appl. Phys. **51** 274006 (2018), DOI: 10.1088/1361-6463/aac5fd

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 динамических свойств неидеальной плазмы методом моментов

Разработанный в 2017 году модифицированный метод моментов [1] применен к исследованию динамических свойств сильно неидеальных кулоновских систем, таких как частично вырожденный плотный электронный газ [2] и плотная пылевая плазма с пылинками конечного размера [3]. Метод основан на классической теории моментов и других точных соотношениях, которым должна удовлетворять диэлектрическая функция системы. Метод позволяет, с автоматическим учетом пяти правил сумм, выразить динамические характеристики системы (динамический структурный фактор, дисперсию и затухание коллективных мод) исключительно через её статический структурный фактор без привлечения экспериментальных данных. В широком диапазоне изменения параметров неидеальности и вырождения достигнуто хорошее согласие с современными данными численного моделирования. Проведено сравнение с результатами альтернативных теоретических подходов (приближение хаотических фаз, приближение квазилокализованного заряда, приближение Мермина и др.), удовлетворяющих указанным правилам сумм неполностью. Применение правил сумм позволило также предложить критерий отбора самосогласованных численных моделей статических характеристик (радиальной функции распределения, статического структурного фактора) [2], основанный на выполнении неравенстве Коши. Дальнейшее развитие и обобщение подхода (на двухкомпонентную неидеальную плазму) было доложено на международной конференции PNP 16 [4,5].

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.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, M. Bonitz, L. Conde, A.E. Davletov, T. Dornheim, D.Yu. Dubovtsev, S. Groth, K. Santybayev, S.A. Syzganbayeva, I.M. Tkachenko, Sum rules and exact inequalities for strongly coupled one-component plasmas // Contributions to Plasma Physics 58, 967–975 (2018). DOI: 10.1002/ctpp.201700136.
3. A.E. Davletov, L.T. Yerimbetova, Yu.V. Arkhipov, Ye.S. Mukhametkarimov, A. Kissan, And I.M. Tkachenko, Dust particles of finite dimensions in complex plasmas: thermodynamics and dust-acoustic wave dispersion // J. Plasma Physics, 84 (2018) 905840410. DOI: 10.1017/S0022377818000879.
4. Yu.V. Arkhipov, A. Askaruly, A.E. Davletov, D.Yu. Dubovtsev, I.M. Tkachenko, Dynamic characteristics of strongly coupled plasmas // 16th Intl. Conf. on the Physics of Non-Ideal Plasmas, September 24 – 28, 2018, Saint-Malo, Francia, p. 64.
5. Yu.V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, A.E. Davletov, D.Yu. Dubovtsev, S.A. Syzganbayeva, I.M. Tkachenko, Stopping power of electron gas // 16th Intl. Conf. on the Physics of Non-Ideal Plasmas, September 24 – 28, 2018, Saint-Malo, Francia, p. 69.

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., проф.

Влияние конечной температуры электронов на градиентно-дрейфовую неустойчивость частично замагниченной плазмы

В рамках идеальной двужидкостной гидродинамической модели плазмы исследована градиентно-дрейфовая неустойчивость частично замагниченной плазмы во внешних скрещенных электрическом и магнитном полях. Используемая модель учитывает эффекты равновесного $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ вращения электронов, дебаевского экранирования и конечной скорости ионного потока, а также конечную температуру и конечный

ларморовских радиус (КЛР) электронов посредством тензора бесстолкновительной вязкости в неоднородном магнитном поле. Получено дисперсионное соотношение для электростатических возмущений плазмы в частотном диапазоне между ионной и электронной циклотронной частотами [1]. Для широкого диапазона равновесной параметров плазмы аналитически определены профили граничной устойчивости [2]. Обнаружен новый режим неустойчивости, обусловленный исключительно градиентом магнитного поля.

Градиентно-дрейфовая неустойчивость в конфигурации стационарного плазменного двигателя

Исследована устойчивость ускоряющего канала стационарного плазменного двигателя СПД-100 по отношению к электростатическим возмущениям плазмы в нижнегибридном диапазоне частот. Использованы типичные (исходя из анализа совокупности экспериментальных и расчетных данных) распределения параметров системы вдоль оси ускоряющего канала СПД. В локальном приближении выделены три зоны, различающиеся по характеру распространения и характеристикам наиболее неустойчивых мод: длинноволновая низкочастотная неустойчивость азимутальных волн в прианодной части двигателя, неустойчивость коротковолновых аксиальных мод в основной части ускоряющего канала, обусловленная стационарным потоком ускоренных ионов, и высокочастотная неустойчивость косых волн на выходе из ускоряющего канала [3]. Рассчитаны частоты собственных неустойчивых колебаний и аксиальная структура глобальных мод. Полученный спектр характеризуется конечным набором длинноволновых азимутальных мод в нижнегибридном диапазоне частот, локализованных преимущественно в прианодной части двигателя. Показано, что собственные моды могут образовывать волновые пакеты, основные характеристики которых на линейной стадии развития неустойчивости совпадают с параметрами крупномасштабных азимутальных структур типа спиц, наблюдаемых в экспериментах [4].

Литература

1. Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I., Sorokina E.A., Marusov N.A. Effects of finite electron temperature on gradient drift instabilities in partially magnetized plasmas // Physics of Plasmas 25, 012106 (2018). DOI: 10.1063/1.4996708.
2. Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I., Sorokina E.A., Marusov N.A. Marginal stability, characteristic frequencies, and growth rates of gradient drift modes in partially magnetized plasmas with finite electron temperature // Physics of Plasmas 25, 012107 (2018). DOI: 10.1063/1.4996719.
3. Marusov N.A., Sorokina E.A., Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I. Gradient-drift instability in application to Hall thrusters // Plasma Sources Science and Technology, in print. DOI: 10.1088/1361-6595/aae23d.
4. Sorokina E.A., Marusov N.A., Lakhin V.P., Ilgisonis V.I. Discharge oscillations in Morozov's stationary plasma thruster as a manifestation of large-scale modes of gradient drift instability // Plasma Physics Reports 45, in print (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19010136.

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 широкоапертурных плазменных источников низкоэнергетичных ионов для прецизионных технологий атомно-слоевого травления материалов наноэлектроники

Выполнен цикл исследований по разработке широкоапертурных источников низкоэнергетичных ионов с энергией ионов в диапазоне 0.5-1 эВ на основе плазменно-пучковых разрядов с щелевым катодом для использования в прецизионных технологиях управляемого *плазменного атомно-слоевого травления поверхности материалов микро- и наноэлектроники имеют*. В таких технологиях важными элементами являются плазменные источники, генерирующие энергетически и химически активные частицы, удовлетворяющие определенным требованиям. В первую очередь, должны обеспечиваться фиксированный диапазон энергий образующихся частиц и равномерность их генерации на определенных площадях при приемлемых мощностях плазменного источника. Показано, что перспективными в этом отношении могут быть плазменные реакторы, в которых использован принцип плазменного катода. Такие системы обеспечивают возможность получения ленточных электронных пучков в области давлений рабочего газа от форвакуумного до нескольких Тор.

Экспериментально показано, что использование ленточного электронного пучка позволяет создавать плазменно-пучковый разряд в виде «плазменного листа» с площадью в десятки квадратных сантиметров, который может быть использован как широоапертурный источник энергетически и химически активных частиц с энергией ионов в диапазоне 0.5-1 эВ.

Экспериментально исследованы электрокинетические, оптические характеристики и пространственная структура плазменно-пучкового разряда, сформированного за сетчатым анодом наносекундного разряда с протяженным щелевым катодом в неоне. Исследовано влияние величин напряжения на коллекторе и давления газа в камере на однородность формируемого «плазменного листа». Предложен и реализован способ управления энергией ионов, эмитируемых из «плазменного листа» в поперечном направлении.

Проведенный цикл исследований показывают, что при определенных условиях наносекундный разряд с щелевым катодом становится плазменным источником ускоренных электронов, формирующих протяженные ленточные электронные пучки с энергией электронов пучка более одного кЭв. С помощью сформированных таким образом ленточных электронных пучков возможно создание однородного «плазменного листа» над поверхностью диэлектрической подложки, который служит широкоапертурным источников низкоэнергетичных ионных потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке совместного проекта Минобрнауки России и Минпромторга России по созданию и развитию на базе ДГУ Всероссийского инжинирингового цента «Цифровые платформы».

Литература

1. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhsinov G.Sh., Ramazanov A.R. Low-energy ions source of plane geometry on the basis of plasma-beam discharge with a slot cathode. 6th International Congress «Energy Fluxes and Radiation Effects», IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1115** (2018) 022036 doi :10.1088/1742-6596/1115/2/022036.
2. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Юсупова Г.М. Оптические методы диагностики нестационарной газоразрядной плазмы. Махачкала. 2018. 86 с. ISBN978-5-9913-0173-2
3. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhsinov G.Sh., Ramazanov A.R. The impact of the dielectric boundary on the spatial structure and properties of a nanosecond discharge with an extended slot cathode. 20th International Symposium on High-Current Electronics (16-22 September) Tomsk, Russia. 2018. P. 213.
4. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhsinov G.Sh., Ramazanov A.R. Low-energy ions source of plane geometry on the basis of plasma-beam discharge with a slot cathode. 20th International Symposium on High-Current Electronics (16-22 September) Tomsk, Russia. 2018. P. 212.

5. Ашурбеков Н.А., Закарьяева М.З., Иминов К.О., Рамазанов А.Р., Шахсинов Г.Ш. Разработка и исследование плоского плазменного источника для технологических приложений (обзорный доклад). Материалы X Всероссийской конференции ФЭ-2018 (25–27 октября 2018г.).
6. Ашурбеков Назир Ашурбекович, Закарьяева Мадина Закарьяевна, Иминов Кади Османович, Рабаданов Муртазали Хулатаевич, Шахсинов Гаджи Шабанович. Широкоапертурный источник низкоэнергетичных ионов на основе плазменно-пучкового разряда для прецизионных технологий атомно-слоевого травления материалов наноэлектроники. Удостоверение на «ноу-хау». Махачкала. ДГУ. № 66. от 15 ноября 2018

Лаборатория физики газовых разрядов
Курбанисмаилов В.С., д.ф.-м.н., профессор

Исследование начальных стадий формирования импульсного разряда в инертных газах (He, Ar) в условиях предварительной ионизации газа

С применением высокоскоростного фотоэлектронного регистратора (ФЭР-2) изучена пространственно-временная динамика начальной стадии формирования импульсного объемного разряда в инертных газах (He, Ar) атмосферного давления в условиях предыонизации газа. Установлено, что после приложения высоковольтного импульса напряжения, первое регистрируемое свечение возникает на аноде после приложения внешнего поля, которое в дальнейшем в виде диффузного свечения распространяется к катоду с характерной скоростью $\sim 10^7 - 10^8$ cm/s. Показано, что для сферических электродов фронт свечения неоднороден по сечению, т.е. интенсивность спадает от оси разряда к периферии. Перекрытие фронтом свечения разрядного промежутка (прихода фронта свечения на катод), разряд переходит в следующую фазу - фазу объемного горения.

Разработана и реализована двумерная (2 D) модель для численного моделирования формирования начальных стадий импульсных разрядов в инертных газах (He, Ar) в условиях аналогичных экспериментальным. Показано, что в случае однородной предыонизации газа формирование разряда происходит в процессе движения катоднаправленной волны ионизации, а в случае неоднородности предыонизации газа, в разрядном промежутке формируется две волны ионизации, распространяющихся в противоположных направлениях к аноду и катоду. Показано, что скорость движения катодонаправленной волны меньше анодонаправленной [1,2].

Влияние паров материала вещества электродов на кинетические и оптические характеристики импульсного разряда в инертных газах атмосферного давления

Ранее экспериментально было показано, что в импульсных разрядах в гелии и аргоне атмосферного давления в спектре излучения прикатодной плазмы при высоких перенапряжениях интенсивно зажигаются спектральные линии паров материала электродов.

Методом Монте-Карло рассчитаны кинетические характеристики дрейфа электронов в гелии в присутствии паров железа при напряженности электрического поля E/N=1–100 Тд с учетом неупругих столкновений. Проанализировано влияние концентрации паров железа на скорость дрейфа, среднюю энергию электронов, коэффициенты диффузии и подвижности, рассчитан ионизационный коэффициент Таунсенда. Приведено сравнение функции распределения электронов с распределениями Максвелла и Дрювестейна. Показано, что незначительные добавки примесей атомов железа в гелий, начиная с долей процента, влияют на характеристики неупругих процессов, соответственно и на разряд [3,4].

Литература

1. Kurbanismailov V. S., Omarov O. A., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V. Development of ionization waves in argon at atmospheric pressure with inhomogeneous preliminary ionization. // EPL (Europhysics Letters), (2018). 123(4), 45001. doi:10.1209/0295-5075/123/45001
2. Kurbanismailov V. S., Omarov O. A., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V.. Dynamics of pulse discharge in atmospheric pressure argon.// 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1115** 022039 https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022039
3. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б. Кинетические и оптические характеристики импульсного разряда в гелии с парами железа при атмосферном давлении // ЖТФ. 2019. №3. с. 388-391.
4. V S Kurbanismailov, S A Maiorov, O A Omarov, G B Ragimkhanov and Z R Khalikova Electron drift characteristics in argon with iron vapor: coefficient of mobility, ionization and runway// 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1115 022040 https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022040.

Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ

115409, Москва, Россия, Каширское шоссе, 31
Кафедра физики плазмы
Булгадарян Даниэль Грантович

Применение рассеяния протонов кэвных энергий для анализа процессов эрозии и переосаждения обращенных к плазме элементов плазменных установок

Спектроскопия рассеяния ионов водорода кэвных энергий в отличие от используемых для анализа поверхности ионов инертных газов позволяет характеризовать не только средний атомный номер, но и глубину тонких слоев на поверхности.

В работе исследованы аналитические возможности контроля процессов на поверхности обращенных к плазме элементов с помощью ионного рассеяния in situ при переосаждении материалов с сильно отличающимися атомными массами. По результатам экспериментов по нанесению слоев золота и вольфрама на кремниевую подложку и кремния на золотую подложку посредством термического осаждения и перепыления ионным пучком обнаружено влияние энергии осаждаемых частиц на энергетические спектры отраженных протонов. При использовании энергоанализатора с разрешением 0,01 и протонов с энергией 5-25 кэВ таким методом возможно измерение толщин до 40 нм с погрешностью, не превышающей 0,5 нм [1].

Исследование динамики деградации нано структурированной поверхности при ионном облучении

Спектроскопия рассеяния протонов кэвных энергий была применена для диагностики образующихся при воздействии гелиевой плазмы на высокотемпературные материалы структур с высоко развитой поверхностью, перспективной для применения в катализаторах. а именно определения плотности вольфрамового пуха – состоящего из нановолосков диаметром порядка 10 нм и длиной ~мкм.. Было показано, что с помощью спектроскопии протонного рассеяния возможен контроль плотности пуха и динамики его деградации под действием ионного и плазменного облучения [2].

Литература

1. D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, N. Efimov, P. Borisyuk, Y. Lebedinskii, Application of keV-energy proton scattering for thin film analysis, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At. 438 (2019) 54–57. doi:10.1016/j.nimb.2018.10.043.
2. D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, S. Kajita, D. Hwangbo, N. Ohno, Proton scattering from tungsten fuzz, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At. 434 (2018) 9–12. doi:10.1016/j.nimb.2018.07.038.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХСРАН)

119991, Москва. Ленинский проспект , 29

Лаборатория плазмохимии и физикохимии импульсных процессов

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

Влияние малой добавки азота на параметры СВЧ разряда в водороде

Проведены эксперименты и моделирование сильно неоднородного неравновесного СВЧ разряда при пониженных давлениях. Впервые установлено, что малые (до 5%) добавки азота и водороду изменяют параметры разряда. Установлен механизм этого влияния. Изменение параметров разряда связано с заменой легкого иона H_3^+ (основной ион) в водородной плазме на тяжелый ион N_2H^+ в разряде в смеси.

Это приводит к уменьшению скорости диффузионной гибели заряженных частиц, и требуемой для поддержания разряда скорости ионизации. Скорость ионизации определяется напряженностью электрического поля. Следовательно, это ведет к необходимости уменьшения напряженности поля и всех параметров разряда (в частности, интенсивностей излучения линий.

Это новый результат. Обычно влияние добавки связывалось и измерение скорости ионизации за счет разных порогов у основного газа и добавки. В случае азота и водорода эти пороги близки. Рассмотрение этой проблемы в контексте гибели зарядов является новым (результаты представлены в статье, принятой к опубликованию в журнале «Физика плазмы» в 2019 г.)

Исследование СВЧ разряда в жидких углеводородах

Проведен цикл исследований в новом направлении плазмохимии – микроволновых разрядах в жидких углеводородах. В России работы этого направления ведутся только в ИНХС РАН [1].

- Показано, что СВЧ разряд в объеме тяжелых нефтей и продуктах из переработки может использоваться для извлечения ценных металлов из них. На СВЧ антенне образуется древовидная структура, в которой содержание металлов Al, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, V, Zn в 10–20 раз превышает их содержание в исходном веществе. Новизна предложенного метода защищена патентом. Результаты опубликованы. [2,3].

- Известно, что твердая углеродсодержащая фаза является одним из основных продуктов разрядов в углеводородах. Тем не менее, все известные модели процессов в плазме в углеводородах учитывают только газофазные реакции и продукты. Это означает, что расчеты, проводимые в рамках таких моделей могут давать качественно и количественно неверные результаты.

В 2018 г. была построена нульмерная модель процессов в СВЧ разряде в жидком н-гептане с учетом образования твердой фазы. Модель включает в себя разложение исходного углеводорода, образование молекулярных предшественников сажи, поверхностный рост и коагуляцию. Основой для роста твердой фазы являются полиароматические соединения и важным звеном строения частиц является ацетилен. Нуклеация идет по механизму HACA (аббревиатура «H-abstraction-C2H2-addition»), который заключается в отрыве атома водорода от прекурсора налетающим атомом водорода и присоединением на его место ацетилена. Этот процесс повторяется и. начиная с некоторых размеров, в образование частиц включается процесс коагуляции. Полученные результаты качественно согласуются с результатами экспериментов [4].

Литература

1. Yu.A. Lebedev. High Temp. 2018, **56**, 811 **DOI:** 10.1134/S0018151X18050280.
2. К.А. Аверин, Ю.А. Лебедев. Химия высоких энергий, 2018, том 52, № 3, с. 239–241. (High Energy Chem. 2018, V.52, 263-265 **DOI:** 10.1134/S0018143918040100)

3. Yu.A. Lebedev, K.A. Averin. J. Phys. D: Appl. Phys. **51** (2018) 214005 https://doi.org/10.1088/1361-6463/aabea2.
4. (I L Epstein, Yu A Lebedev , A V Tatarinov, I V Bilera. J. Phys. D: Appl. Phys. 51 (2018) 214007 https://doi.org/10.1088/1361-6463/aabe47).

Институт общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФРАН)

11991, Москва, Россия, ул. Вавилова 38
Теоретический отдел
Майоров Сергей Алексеевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

Исследование кинетических характеристик дрейфа ионов и электронов в смесях газов

В результате систематических расчетов дрейфа ионов инертных газов, щелочных целого ряда других металлов получены их кинетические характеристики и найдены аппроксимационные формулы для коэффициентов подвижности, диффузии. Доработан алгоритм и программа расчета кинетических коэффициентов дрейфа ионов в смесях газов, добавлен и проведен учет влияния магнитного поля, рассмотрены все возможные комбинации электрического и магнитного полей, изучено влияние магнитного поля на коэффициенты подвижности и диффузии. Исследовано влияние продольного магнитного поля на характеристики тлеющего разряда при пониженном давлении газа, инициированы экспериментальные работы по изучению этих эффектов в НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского национального университета и на физическом факультете Санкт Петербургского университета.

С целью изучения влияния паров металлического катода на разряд проведены расчеты характеристик дрейфа электронов в парах железа, меди, ртути, а также в смесях паров этих металлов с буферным газом (гелий, аргон). Определено влияние малых концентраций паров металла на скорость дрейфа, ионизационный коэффициент Таунсенда и убегания электронов.

Литература.

1. R. I. Golyatina a and S. A. Maiorov Characteristics of Electron Drift in an Ar–Hg Mixture //Plasma Physics Reports, 2018, Vol. 44, No. 4, pp. 453–457. DOI: 10.1134/S1063780X18040050
2. S.K. Kodanova, N.Kh. Bastykova, T.S. Ramazanov, G.N. Nigmetova, S.A. Maiorov The Effect of Magnetic Field on Dust Dynamic in the Edge Fusion Plasma //IEEE Transactions on Plasma Science 46(4), с. 832-834(2018). **DOI:** 10.1109/TPS.2017.2763965

Институт проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН)

142432, Черноголовка, Россия, пр. Семенова 1
Лаборатория электромагнитных процессов в ударно-сжатых средах
Запорожец Юрий Борисович, с.н.с., к.ф.-м.н., Минцев Виктор Борисович, г.н.с., член-корр. РАН, Кулиш Михаил Иванович, с.н.с., к.ф.-м.н., Дудин Сергей Васильевич, в.н.с., к.ф.-м.н., Ушнурцев Андоей Евгеньевич, н.с.

Экспериментальное изучение поляризационных свойств динамической сильно-неидеальной плазмы инертных газов при плотностях до 2.1 г/см^3.

Проведено изучение поляризационных характеристик сильно-неидеального ударно-сжатого плазменного объекта с применением частот зондирования $\nu_{зонд.} = 5.66 \cdot 10^{14}$ Гц при варьировании углов взаимодействия плазмы и электромагнитной волны в диапазоне $\theta = 0° \div 78°$. В проведенных физических опытах измерялись компоненты вектора Стокса сильно-неидеальной плазмы ксенона, имеющей электронную концентрацию в диапазоне $n_e = 7 \cdot 10^{21}$ $см^{-3}$. Моделирование распространения электромагнитной волны в

плазме осуществлено на основе численного интегрирования уравнений поля с учетом рассеяния электронов на атомах. [1].

Изучение потоков плазмы и пылевых частиц от разгружающейся металлической мишени.

Проведены экспериментальные оценки процесса эжекции частиц и образования плазмы на границе медной мишени в форвакууме и с остаточным газом (гелий, воздух) при выходе ударной волны на свободную поверхность исследуемого образца. Интенсивность излучения регистрировалась трехканальным импульсным пирометром в экспериментальной сборке с боковым и торцевым наблюдением. При скорости ударника порядка 5 км/с с поверхности мишени вылетал поток частиц и плазмы, скорость потока которой достигала величины 12,5 км/с [2,3].

Литература

1. Zaporozhets Yu.B., Mintsev V.B., Gryaznov V.K., Omarbakiyeva Y.A., Reinholz H., Ropke G., Fortov V.E. Polarized reflectivity properties of shock-compressed plasma with strong interaction of particles J. Phys.: Conf. Ser. **946** (2018) 012124.
2. Kulish M.I., Dudin S.V., Ushnurtsev A.E., Mintsev V.B. 2018 The liner brightness temperature measurement by two channel optical pyrometer *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** (2018) 012042.
3. Kulish M.I., Dudin S.V. Microparticles and plasma stream registration during cylinder compression of a metal liner *Phys.: Conf. Ser.* **946** (2018) 012401.

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

отделение физики плазмы и плазменных технологий
220072 Минск, Беларусь, ул. П. Бровки, 15
Лаборатория физики плазменных ускорителей
Асташинский Валентин Миронович, зам. директора Института, зав. отделением, зав. лабораторией, д.ф.-м.н., чл.-корр.

Белорусский государственный университет
220030 Минск, Беларусь, пр. Независимости, 4
Кафедра физики твердого тела
Углов Владимир Васильевич, зав. кафедрой, проф., д.ф.-м.н.

Черенда Николай Николаевич, доц., к.ф.-м.н.

Исследование процессов воздействия компрессионных плазменных потоков на материалы, обеспечивающих существенное улучшение их поверхностных свойств

Впервые показано, что управление параметрами воздействия компрессионного плазменного потока, генерируемого квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем (плазмообразующий газ – азот), на поверхность широко используемых в промышленности титановых и алюминиевых сплавов, а также инструментальных сталей с предварительно нанесенным тонким (~ 2 мкм) покрытием легирующих элементов (Ti и Zr) позволяет синтезировать на поверхности металлургически-связанный с основой глубокий (толщиной 20-50 мкм) модифицированный слой заданного состава, содержащий нитридные и интерметаллидные фазы (в том числе и легирующих элементов), что обеспечивает существенное улучшение эксплуатационных характеристик обработанного материала (увеличение твердости модифицированного слоя до 2 раз, уменьшение коэффициента трения до 2,5 раз), включая повышение термостойкости и стойкости к атмосферному окислению. Установлено, что с ростом числа импульсов плазменного воздействия повышается однородность распределения легирующих элементов по глубине

модифицированного слоя вследствие повторения процессов плавления, конвективного перемешивания и затвердевания [1-3].

Литература

1. N.N. Cherenda, A.V. Basalai, V.I. Shymanski, V.V. Uglov, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski, A.P. Laskovnev, G.E. Remnev. Modification of Ti-6Al-4V alloy element and phase composition by compression plasma flows impact // Surface & Coatings Technology. – 2018. – V. 355. – P. 148–154. DOI:10.1016/j.surfcoat.2018.02.048.
2. V.I. Shymanskia, N.N. Cherendaa, V.V. Uglova, V.M. Astashynski, and A.M. Kuzmitski. Thermal Stability of the Structure and Phase Composition of Titanium Treated with Compression Plasma Flows // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12, No. 4. – P. 710–716. DOI: 10.1134/S102745101804016X.
3. N.N. Cherenda, V.V. Uglov, S.V. Gusakova, V.M. Astashynski, and A.M. Kuzmitski. Thermal Stability of Structure and Properties of the Surface Layer of Instrumental Steel Alloyed with Zirconium and Silicon Atoms under the Action of Compression Plasma Flows // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, No. 5. – P. 965–972. DOI: 10.1134/S2075113318050052.

Институт физических исследований и технологий Российского университета дружбы народов (ИФИТ РУДН)

г. Москва, ул. Орджоникидзе 3

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

Исследование явления гиромагнитного авторезонанса (ГА)

Проведены комплексные экспериментальные, теоретические и вычислительные исследования динамики плазмы в неравновесных условиях электронно-циклотронного разряда, плазменного ускорения. Экспериментально и посредством численного моделирования изучен эффект длительного поддержания условий резонансного взаимодействия внешнего СВЧ-излучения с электронами плазмы, реализуемого путем наложения на пробочную магнитную конфигурацию (с магнитным полем около 1 кГс в центре и пробочным отношением ~ 1,6) дополнительного реверсного импульсного магнитного поля в диапазоне 200-500 Гс со временем нарастания 300-500 мкс. Продемонстрирован захват электронов первичной плазмы и формирование плазменных сгустков с энергичной электронной компонентой; определена его эффективность в зависимости от значения амплитуды импульсного магнитного поля, его временных характеристик, а также фазы захвата частиц в пределах длительности ускоряющего СВЧ импульса. Исследовано изменение эффективности захвата в зависимости от амплитуды импульсного магнитного поля и расстройки стартового магнитного поля [1]. Показано, что в диапазоне реализуемых экспериментально значений рабочих параметров наиболее эффективный захват (измеренное значение плотности высокоэнергичных электронов составило 6•10^9 см^(-3)) достигнут при напряженности поля в 1 кВ/см и амплитуде индукции импульсного магнитного поля 500 Гс. Численными расчетами установлены характерные изменения энергетических спектров захваченных и удерживаемых частиц при изменении параметров рабочих ГА-циклов [2]. Данный факт подтвержден и экспериментально. Так, изменение ГА-параметров (амплитуды индукции импульсного магнитного поля, его временных характеристик и т.п.) приводит к изменению параметров спектра тормозного излучения (форма, предельная энергия), регистрируемого в поперечном направлении, в то время как параметры спектра в продольном направлении по отношению к магнитному полую практически неизменны. Результаты численного моделирования демонстрируют экспериментально наблюдаемое коллективное движение плазменных сгустков, а также накопление плазменных сгустков в минимуме ловушки в

режиме цуга импульсов. Полученные результаты указывают на возможность использования исследуемых разрядов в качестве эффективных источников жесткого рентгеновского излучения с изменяемым спектром излучения.

Волны в СВЧ-плазме

Проведены исследования условий формирования плазмы в узком коаксиальном резонаторе, помещенном в неоднородное аксиально-симметричное магнитное поле, создаваемое кольцеобразными постоянными магнитами [3]. Установлено, что локальная неоднородность концентрации заряженных частиц, повышенной в области магнитных полей ниже значений, соответствующих электронному циклотронному резонансу (ЭЦР), является следствием возникновения НЧ-волны, распространяющейся в азимутальном направлении [4, 5]. Фазовая скорость НЧ-волн оказалась пропорциональной корню квадратному из отношения температуры электронов к атомной массе иона (эксперименты проводились с разными инертными газами – Xe, Ar, N2), что позволяет идентифицировать волны как ионнозвуковые. Показано, что в области магнитных полей, величиной 0,7 от резонансного (ЭЦР) значения, происходит локальное увеличение напряженности СВЧ электрического поля, что определяет область линейной трансформации электромагнитной волны в косую ленгмюровскую с последующим ее распадом на новую косую ленгмюровскую и ионно- звуковую волны. Ввиду симметрии системы и локальности области возбуждения НЧ-волны следует ожидать возникновения в изучаемой структуре стоячей волны [6]. Теоретически исследован процесс распространения нелинейной правополяризованной волны вдоль внешнего магнитного поля в докритической плазме в области ЭЦР [7]. Показано, что при малых амплитудах в плазме низкой плотности имеет место модуляционная неустойчивость с периодом модуляции, равным длине возбуждаемой плазменной волны. Амплитуда модуляции в этом случае возрастает по мере уменьшения расстройки резонанса. Для волн больших амплитуд лазерного диапазона, распространяющихся в плазме в сверхсильном магнитном поле, из результатов моделирования следует, что с ростом величины внешнего магнитного поля растет максимальная амплитуда возбуждаемого продольного электрического поля, которая может составлять до 30% от начальной амплитуды электрического поля лазерной волны. Сильный рост энергии электронов в этом процессе начинается уже при значениях величины магнитного поля значительно меньших резонансного. При этом энергия, передаваемая лазерным излучением электронам плазмы в сильном внешнем магнитном поле, увеличивается в несколько раз по сравнению со случаем изотропной плазмы. Показано, что такое поглощение лазерного излучения слабо зависит от электронной температуры.

Когерентные структуры в плазменных двигателях и ускорителях

Теоретически и численно для типичных экспериментальных профилей параметров плазмы в плазменных ускорителях исследована устойчивость плазмы по отношению к возмущениям нижнегибридного типа. Обнаружено, что наиболее неустойчивыми являются крупномасштабные азимутальные моды, а их характеристики близки к параметрам долгоживущих структур типа спиц, наблюдаемых экспериментально. Проведен детальный анализ устойчивости азимутальных осцилляций в частично замагниченной плазме в перпендикулярных электрическом и магнитном полях. Показано, что вблизи порога неустойчивости, вызываемой комбинацией электрического и диамагнитного дрейфов, неустойчивы только низкочастотные длинноволновые колебания, тогда как коротковолновые и высокочастотные моды стабилизированы эффектом конечного ларморовского радиуса. Обнаружен новый режим неустойчивости в области слабого электрического поля и относительно большого градиента плотности плазмы [8].

Литература

1. Андреев В.В., Новицкий А.А., Умнов А.М. (Andreev V.V., Novitsky A.A., Umnov A.M.) Evolution of energy spectra of the electronic component for plasmoids generated

under autoresonance conditions in a long magnetic mirror Journal of Physics: Conference Series (2018 г.) vol. 1094, article № 012014
2. Андреев В.В., Новицкий А.А., Умнов А.М. (Andreev V.V., Novitsky A.A., Umnov A.M.) Spectral changes of bremsstrahlungplasma bunch generated under autoresonance in a long mirror Journal of Physics: Conference Series (2018 г.) vol. 1094, article № 012013
3. Балмашнов А.А., Калашников А.В., Умнов А.М. (Balmashnov A.A., Kalashnikov A.V., Umnov A.M.) Формирование плазменного кольца СВЧ-разрядом в узком коаксиальном резонаторе вне области ЭЦР-взаимодействия ФИЗИКА ПЛАЗМЫ (2018 г.) т. 44, с. 520-525
4. Balmashnov A.A., Kalashnikov A.V., Kalashnikov V.V., Stepina S.P., Umnov A.M. «Formation of ECR Plasma in a Dielectric Guidde under Self-Excitation of a Standing Ion-Acoustic Wave » //Plasma Physics Reports. 2018, Volume 44, Issue 1, pp 149–152
5. Balmashnov A.A., Kalashnikov A.V., Kalashnikov V.V., Stepina S.P., Umnov A.M.«SelfExcitation of Low-Frequency Oscillations in the Plasma Ring Formed by an ECR Discharge in a Narrow Coaxial Cavity» // Plasma Physics Reports. 2018, Vol. 44. No 1. P. 149.
6. Balmashnov A.A., Kalashnikov A.V., Umnov A.M. «Formation of a Plasma Ring by a Microwave Discharge in a Narrow Coaxial Cavity beyond the ECR Region» // Plasma Physics Reports. 2018, , Volume 44, Issue 6, pp 594–599
7. В. Б. Красовицкий, В. А. Туриков Нелинейная правополяризованная волна в плазме в области электронного циклотронного резонанса// ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2018, том 44, № 5, с. 440–446
8. Марусов Н.А., Сорокина Е.А., Лахин В.П., Ильгисонис В.И., Смоляков А.И. (Marusov N.A., Sorokina E.A., Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I.) Gradient-drift instability in application to Hall thrusters Plasma Sources Science and Technology (2018г.), doi: 10.1088/1361-6595/aae23d

Институт электрофизики УрО РАН

Лаборатория пучков частиц ИЭФ УрО РАН

Руководитель: член-корр. РАН. Гаврилов Н.В.

Установлено, что изменение степени ионизации металлического пара при анодном термическом испарении алюминия в дуговом разряде низкого давления в Ar-O_2 смеси приводит к изменению механизма формирования покрытия из оксида алюминия со структурой корунда (α-фаза Al_2O_3): при низкой степени ионизации пара реализуется локальный эпитаксиальный рост α-фазы оксида алюминия на кристаллографическом шаблоне в широком диапазоне изменения параметров ионного сопровождения; при высокой степени ионизации металлического пара (до 90%) α-фаза формируется в результате рекристаллизации γ-фазы под действием напряжений, возникающих в покрытии при интенсивной ионной бомбардировке.

Изменение степени ионизации металлического пара достигалось изменением величины тока разряда на анод-тигель и условий охлаждения анода-тигля при сохранении скорости испарения металла неизменной. Плотность ионного тока (3-11 мА/см^2) и энергия ионов (50-200 эВ) на поверхность растущего покрытия регулировались независимо. Температура подложки составляла 600 ^{o}C. При низкой степени ионизации металлического пара (несколько %) в широком диапазоне изменения параметров ионного потока был реализован локальный эпитаксиальный рост α-фазы оксида алюминия на кристаллографическом шаблоне со скоростью до 3 мкм/ч. При высокой степени ионизации металлического пара покрытие содержало смесь α и γ фаз оксида алюминия, С ростом плотности ионного тока и энергии ионов доля α-фазы в Al_2O_3 покрытии увеличивалась до 100 % в результате γ–а трансформации. Бомбардировка растущего

покрытия ионами аргона с энергией до 200 эВ не нарушает условий эпитаксиального роста а-фазы в отличие от бомбардировки ионами алюминия при той же интенсивности потока.

Литература

1. N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetkikh, P.V. Tretnikov, A.V. Chuckin. Ion assisted deposition of α-Al_2O_3 coatings by anodic evaporation in the arc discharge. Surface and Coatings Technology. 2018. V. 337. P. 453–460.
2. N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, P.V. Trernikov, D.R. Emlin, A.V. Chukin, Yu.S. Surkov. Al_2O_3 thin films deposition by reactive evaporation of Al in anodic arc with high levels of metal ionization. . Surface and Coatings Technology (Submitted, Aug, 2018).

Научно-исследовательский центр теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН (НИЦ-1 ТЭС ОИВТ РАН)

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

Лаборатория №1.2.1.1. – плазменно-пылевых процессов

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

Исследование особенностей распределения численной плотности пылевых частиц в трехмерной комплексной плазме

Проанализированы данные, полученные во время сканирования трехмерных облаков, сформированных в разрядной камере установки ПК-3 Плюс на борту Международной космической станции. Для обеспечения высокой точности измерения локальной плотности разработан метод определения координат центров масс пылевых частиц по засветке групп пикселей на фреймах, полученных во время сканирования. Разработан метод определения локальной счетной концентрации частиц по объемам ячеек Вороного. На базе ранее полученного ионизационного уравнения состояния пылевого облака предложена его модификация, расширяющая его область применимости вплоть до границы войда. Выявлены два режима реализации пылевого облака. При низких давлениях плотность числа частиц монотонно уменьшается с увеличением расстояния от центра разряда; при более высоких давлениях распределение плотности имеет неглубокий минимум. Показано, что, независимо от режима реализации облака, концентрация частиц на границе войда имеет резкий максимум [1].

Литература

1. Schwabe M., Du C.-R., Huber P.,·Lipaev A.M., Molotkov V.I., Naumkin V.N., Zhdanov S.K., Zhukhovitskii D.I., Fortov V.E.,·and Thomas H.M. Latest Results on Complex Plasmas with the PK-3 Plus Laboratory // Microgravity Science and Technology **30**, 581 (2018). DOI: 10.1007/s12217-018-9602-0.

Лаборатория №1.2.1.1. – плазменно-пылевых процессов

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

Поляков Дмитрий Николаевич, с.н.с.

Лаборатория №1.1.2.3. – вычислительной гидродинамики

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

Исследование фазовых переходов в сложных пылевых структурах, в плазме тлеющего разряда в неоне при температуре 77 К.

Экспериментально обнаружены и изучены фазовые переходы в компонентах сложных пылевых структур при изменении приведённого давления и тока. Обнаружен непрерывный фазовый переход, при котором пылевая система находится в мезоморфном

состоянии, где компоненты пылевых структур представлены как жидкая смесь из кристаллов в виде сложных многомерных кластеров и простых одномерных кластеров. Обнаружены признаки фазовых переходов первого и второго рода в пылевых структурах при изменении тока разряда при постоянном давлении [1, 2].

Комплексное исследование пылевых сфер, образованных в криогенной плазме тлеющего разряда в неоне.

Экспериментально изучены параметры образования пылевых сфер при температуре 77 К. С помощью диффузионно-дрейфовой модели криогенной плазмы тлеющего разряда в неоне с пылевыми частицами и учетом тепловыделения разряда впервые рассчитан аналог химического потенциала плазменно-пылевой системы. Обнаружено, что максимум аналога химического потенциала пылевой сферы соответствует минимуму её размера и расположен левее линии ликвидуса между давлением, соответствующим минимуму радиуса пылевой сферы и давлениями, соответствующими минимуму тока пылевой сферы и минимуму потенциальной энергии пылевой частицы. Уменьшение величины аналога химического потенциала при пересечении линии ликвидуса завершает процесс плавления сложных кластеров и сопровождается переходом от многокомпонентной многофазной смеси сложных и простых кластеров к однофазному гомогенному составу в виде простых кластеров, находящихся в жидком состоянии. Обнаружен рост величины аналога химического потенциала пылевой сферы при уменьшении концентрации пылевых частиц. Обнаружено, что максимуму химического потенциала пылевой сферы соответствует максимум заряда пылевой частицы, что определяется условием зарядки пылевых частиц [3].

Литература

1. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. Phase transitions and transformation of dust structures in DC discharge in neon at cryogenic temperature // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. - V. 1058. – 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1058/1/012029.
2. Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М. Фазовые переходы в пылевых структурах в тлеющем разряде в неоне при криогенной температуре // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. - 2018. – Т. 33. - В. 1. - С. 22-27. DOI:10.21779/2542-0321-2018-33-1-22-27.
3. Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М. Кулоновские пылевые сферы в тлеющем разряде в неоне при криогенной температуре // Прикладная физика. – 2018. - № 4. - С. 11-17. http://applphys.orion-ir.ru/appl-18/18-2/PF-18-2-36.pdf

Лаборатория №1.2.3.2. – теории лазерно-плазменных воздействий
Андреев Николай Евгеньевич, зав. лаб., д.ф.-м.н.

Модель высокочастотной диэлектрической проницаемости металлической плазмы

С использованием квантовой статистического подхода в теории линейного ответа построена аналитическая модель высокочастотной диэлектрической проницаемости металлической плазмы, учитывающая электрон-фононные взаимодействия и процессы переброса. Изучены различные предельные случаи для частот излучения и температуры электронов, которые являются либо низкими, либо высокими по сравнению с энергией Ферми [1]. Получены новые асимптотические формулы для высоких частот излучения или высоких электронных температур.

Терагерцовое излучение при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на кластеры

Предсказана возможность дипольного излучения терагерцовых волн при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на кластеры. Показано, что дипольный механизм генерации терагерцового излучения играет определяющую роль при взаимодействии лазерного импульса с кластерами малых размеров, в которых соударения электронов происходят достаточно часто. Исследована зависимость спектральных,

угловых, энергетических и пространственно-временных характеристик терагерцового сигнала от плотности свободных электронов в кластерной плазме в условиях доминирования дипольного излучения. Показано, что энергия терагерцового излучения максимальна при выполнении резонансных условий, когда частота лазера совпадает с собственными частотами сферического кластера. [2].

Генерации тормозного рентгеновского излучения

Построена полуаналитическая модель генерации тормозного рентгеновского излучения в металлических мишенях с учётом рециркуляции горячих электронов. Проведены расчёты выхода жёсткого тормозного и характеристического рентгеновского излучения в зависимости от толщины серебряной мишени при интенсивности *s*-поляризованных субпикосекундных лазерных импульсов 2×10^{19} Вт/см^2. Показано, что эффект рециркуляции горячих электронов в тонких фольгах приводит к значительному увеличению выхода K_α-излучения и тормозного излучения в интервале энергии 10÷100 кэВ. Коэффициент преобразования лазерной энергии в энергию тормозного излучения в интервале 0.1÷1 МэВ равен 4×10^{-4}, что указывает на возможность применения тонких серебряных фольг для получения радиографических изображений свинцовых образцов миллиметровых размеров, разогретых до состояний с высокой плотностью энергии.

Литература

1. Veysman M.E., Roepke G., Reinholz H. Analytical expression for high-frequency dielectric function of metals at moderate temperatures // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 946. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012012.т
2. Фролов А.А. Дипольный механизм генерации терагерцового излучения при лазерно-кластерных взаимодействиях // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 1. С. 45-60. DOI: 10.7868/S0367292118010079.

Лаборатория № 1.2.3.3. – теплофизических свойств материалов
Зеленер Борис Борисович, зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н.

Когерентное возбуждение ридберговских состояний в холодном газе атомов 40 Ca

Создан экспериментальный стенд по изучению кинетических и структурных свойств сильнонеидеальной плазмы Ca-40. Проведена сборка оптической схемы и предварительные эксперименты. Для получения большой плотности ультрахолодной плазмы Ca-40 использовалась надежная стабилизация лазерного излучения на нужной частоте при помощи ячейки с парами рубидия, затем сильновзаимодействующая плазма создавалась в импульсном режиме двухфотонным возбуждением нейтральных атомов выше порога ионизации. Для диагностики ионов использовался резонансный лазер в оптическом диапазоне.

Экспериментально исследованы спектры высоковозбужденных атомов кальция-40, приготовленных при помощи магнитооптической ловушки и УФ-лазера. Получена зависимость концентрации атомов в магнитооптической ловушке от отстройки и градиента магнитного поля. При помощи метода падения резонансной флюоресценции измерена энергия ридберговского состояния 76 $^1S_0$ атомов ^{40}Ca. Показано, что возможна реализация схемы стабилизации излучения для создания высоковозбужденных ридберговских атомов по спектру насыщенного поглощения в ячейке с газом атомов рубидия. [1].

Дальнейшие исследования предполагают увеличение плотности частиц при как можно меньшей температуре для создания плотного ансамбля ридберговских атомов и сильнонеидеальной ультрахолодной плазмы, направленное на изучение предполагаемого образования самоорганизующихся структур. Для этого будут использоваться лазерное охлаждение на более узких переходах и захват атомов в дипольную ловушку.

Литература

1. Зеленер Б.Б., Аршинова И.Д., Бобров А.А., Вильшанская Е.В., Саакян С.А., Саутенков В.А., Зеленер Б.В., Фортов В.Е. Когерентное возбуждение ридберговских состояний в холодном газе атомов кальция-40// Письма в ЖЭТФ 108, 12, 829 (2018). DOI: 10.1134/S0370274X1824010

Теоретический отдел №1.2.4. им. Л.М. Бибермана
Дьячков Лев Гавриилович, в.н.с., д.ф.-м.н.

Заселенности атомных уровней гелия в дуговой плазме атмосферного давления

Исследована припороговая область спектра излучения дуговой плазмы гелия при атмосферном давлении и температуре электронов ~3 эВ [1]. Показано, что в этих условиях плазма является сильно ионизационно неравновесной вследствие подавляющего преобладания рекомбинации на стенке над объемной рекомбинацией. Это может быть объяснено в рамках модифицированного диффузионного приближения. Но заселенности уровней атома с главным квантовым числом $n \geq 4$ быстро падают, так что спектральные линии с уровней $n \geq 7$ не наблюдаются. Показано, что это связано с разрушением возбужденных состояний атома в квазистатическом (ионном) микрополе плазмы, главным образом в поле ближайшего иона. Соответственно заселенность дискретных уровней при приближении к порогу ионизации плавно снижаются, что компенсируется появлением здесь состояний сплошного спектра.

Комплексная плазма в тлеющем разряде в сильном магнитном поле

Рассмотрены результаты выполненных в СПбГУ экспериментов с пылевыми структурами в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока в сильном продольном магнитном поле [2]. Впервые удалось достигнуть в таких разрядах значений поля $B = 1$ Тл и получить зависимость угловой скорости вращения Ω пылевой структуры от B. Основная проблема – возникновение неустойчивости уже при $B > 0.1$ Тл. Эту проблему удалось преодолеть тщательным выбором условий эксперимента, хотя влияние нестабильности разряда проявляется на зависимости $\Omega(B)$. Приводится качественное объяснение этой зависимости. При $B < 0.1$ Тл полученные результаты согласуются с данными предыдущих экспериментов, включая инверсию вращения при $B \sim 0.03$ Тл и дальнейший довольно быстрый рост Ω с увеличением поля. В области $B = 0.3–0.4$ Тл имело место резкое замедление вращения, связанное, по-видимому, с неустойчивостью разряда, при этом происходила частичная деградация пылевой структуры. При дальнейшем увеличении магнитной индукции до 1 Тл скорость вращения росла, но значительно более медленно, чем при малых полях.

Результаты экспериментов «Кулоновский кристалл» в условиях микрогравитации

Продолжалась обработка результатов экспериментов «Кулоновский кристалл», выполненных в условиях микрогравитации на МКС с антипробкотронной магнитной ловушкой для диамагнитных (графитовых) частиц. Основные полученные результаты отражены в отчете за 2017 г. и опубликованы в статье [3].

Литература

1. Дьячков Л.Г., Кавыршин Д.И., Коршунов О.В., Чиннов В.Ф. Особенности распределения заселенностей атомных уровней в сильноионизованной дуговой плазме гелия. ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 625-628. DOI: 10.1134/S0018151X18040065.
2. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and V.Yu. Karasev. Complex plasma in glow discharge in a strong magnetic field. Europhys. Lett., 2018, V. 123, N 1, 15001. DOI: 10.1209/0295-5075/123/15001.
3. Dyachkov L.G., Ramazanov T.S., Petrov O.F., Vasiliev M.M., Myasnikov M.I., Fortov V.E., Dzhumagulova K.N., Gabdullin M.T., Dosbolayev M.K., Ussenov Y.A., Moldabekov Zh.A., Savin S.F., Musabaev T.A., Zhantayev Zh.Sh., Aimbetov A.A.. Structure of a

Coulomb cluster in the cusp magnetic trap under microgravity conditions. Contrib. Plasma Phys. 2018 (6 pp). DOI: 10.1002/ctpp.201700103.

Отдел № 1.2.4. – Теоретический отдел
Храпак Алексей Георгиевич, зав.отлела, д.ф.-м.н.

Связь между коллективными модами и структурой в простых системах, комплексной плазме и жидких металлах

Исследовано влияние зарядово-градиентной силы, связанной с изменением заряда частиц в ответ на внешние возмущения, на распространение низкочастотных звуковых волн в слабонеидеальной пылевой плазме. Показано, что величина зарядово-градиентной силы сопоставима с ранее исследованной поляризационной силой. Численные оценки влияния этой силы на спектр коллективных мод пылевой плазмы выполнены в области применимости приближения ограниченного орбитального движения [1].

Теоретическое исследование термодинамических и волновых свойств неидеальных кулоновских систем.

Совместно с МГТУ выполнено молекулярно-динамическое моделирование спектра коллективных мод двумерной кулоновской жидкости в широком диапазоне параметра неидеальности. Полученные дисперсионные соотношения сопоставлены с теоретическими подходами, основанными на квазикристаллическом приближении (известном также как квазилокализованное приближение). Получено хорошее согласие теории с результатами численного моделирования для продольной моды в длинноволновой области при умеренных параметрах неидеальности. Для поперечной моды в длинноволновом пределе хорошее согласие достигнуто лишь в области сильной неидеальности, когда волновое число (параметр обрезания) ниже которого сдвиговые волны не могут распространяться становится достаточно малым. Определена зависимость параметра обрезания сдвиговых волн от степени неидеальности [2].

Литература

1. A. Khrapak and S. Khrapak, Influence of a charge-gradient force on dust acoustic waves, Physics of Plasmas **25**, 034502 (2018); doi: 10.1063/1.5023480.
2. S. A. Khrapak, N. P. Kryuchkov, L. A. Mistryukova, A. G. Khrapak, and S. O. Yurchenko, Collective modes of two-dimensional classical Coulomb fluids, **149**, 134114 (2018); doi: 10.1063/1.5050708.

Лаборатория № 1.2.5. – диагностики вещества в экстремальном состоянии
Пикуз Сергей Алексеевич, зав.лаб., к.ф.-м.н.

Измерение параметров плотного вещества, изохорически нагреваемого при взаимодействии лазерных импульсов петаваттной мощности с твердотельными мишенями, методом абсорбционной спектроскопии.

При использовании ПВт лазеров с потоком лазерного излучения > 10^{20} Вт/см^2 в мишени происходит эффективная генерация пучков электронов с энергиями до сотен МэВ, которые могут проникать в мишень на глубину до десятков микрон и нагревать ее до значительных температур в сотни эВ. Для получения экспериментальных данных по прогреву внутренних областей твердотельных мишеней предложено использовать абсорбционную рентгеновскую спектроскопию, которая может применяться для диагностики как однородных, так и слоистых мишеней, в том числе для определения параметров областей с малой собственной светимостью

Содержанием предложенного метода является сравнение спектров собственного излучения плазмы, зарегистрированных спектрометрами в идентичных конфигурациях с передней и тыльной поверхности мишени. Излучательные и абсорбционные свойства плазмы рассчитываются при этом в рамках столкновительно-радиационной стационарной

кинетической модели, с учетом переноса излучения в рамках приближения факторов ускользания Бибермана-Холстейна для плоского плазменного слоя, и для заданных значений только двух параметров – электронной температуры и толщины слоя. Полученные в работе спектральные коэффициенты пропускания учитывали все возможные процессы поглощения фотонов за счет свободно-свободных, связанно-свободных и связанно-связанных переходов, и оказались весьма чувствительны к значению электронной температуры и толщины поглощающего слоя.

Метод применен в экспериментах по облучению сплошных кремниевых мишеней толщиной от 5 до 20 мкм лазерными импульсами длительностью 0.7 пс, и пиковой интенсивностью $3x10^{20}$ Вт/см^2[1]. Использование в эксперименте плазменного зеркала позволило обеспечить временной контраст лазерных импульсов не ниже $10^{11,}$ и, соответственно, поглощение энергии основного лазерного импульса в веществе твердотельной плотности. Спектры излучения плазмы регистрировались в идентичных диагностических конфигурациях с передней и тыльной поверхности мишени в диапазоне 4-7 кэВ. Сравнение спектров, измеренных с передней поверхности мишеней и умноженных на расчетную спектральную функцию пропускания, со спектрами, измеряемыми с тыльной поверхности, позволили определить температуру вещества (в диапазоне от 140 до 320 эВ) в глубине мишени, в области распространения лазерно-индуцированного тока релятивистских электронов, а также оценить толщину (~5 мкм) поглощающего слоя нагретого вещества твердотельной плотности.

Литература

1. Skobelev I.Y., Ryazantsev S.N., Arich D.D., Bratchenko P.S., Faenov A.Y., Pikuz T.A., Durey P., Doehl L., Farley D., Baird C.D., Lancaster K.L., Murphy C.D., Booth N., Spindloe C., McKenna P., Hansen S.B., Colgan J., Kodama R., Woolsey N., Pikuz S.A. X-ray absorption spectroscopy study of energy transport in foil targets heated by petawatt laser pulses // Photonics Research 6, 234 (2018). DOI:10.1364/PRJ.6.000234.

Научно-исследовательский центр физико-технических проблем энергетики ОИВТ РАН (НИЦ-2 ФТПЭ ОИВТ РАН)

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская 13/2

Лаборатория № 2.1.4.5 – плазмы

Амиров Равиль Хабибулович, д.ф.-м.н.

Отдел № 4.2.-плазменных процессов

Шавелкина Марина Борисовна, к.т.н.

Синтез углеродных нанотрубок и графенов в струе плазмы азота

Исследована возможность крупномасштабного синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) и графена при его образовании в струе плазмы азота, создваемой. мощным плазмотроном постоянного тока с расширяющимся анодным каналом [1]. Прекуросоры углерода в виде углеводородов вводились в плазмотрон одновременно с плазмообразующим газом. Синтезированные материалы были охарактеризованы методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и термогравиметрического анализаи. Синтезированные при 150-350 торр графеновые материалы представляли собой многослойный графен, содержащий от 2 до 5 слоев графена с поперечным размером до 200 нм. Показана возможность легирования графена при его синтезе в плазменной струе азота. Показано, что в синтезированном N-графене преобладает пиридиновый азот. Максимальная степень азотного легирования графена была получена при разложении ацетилена. Углеродные нанотрубки (УНТ), синтезированные при давлении 710 торр , имеют диаметр до 20 нм, при этом отношение длины к диаметру не превышало 100. При давлении 100 Торр нитевидные УНТ образуются в виде сплетений диаметром от 20 до 50 нм. Отношение длины к диаметру

этих УНТ составляет более 1000.

Предложена химико-кинетическая модель, описывающая процессы, инициируемые плазмой смеси N_2-CH_4. Для определения состава смеси в различных температурных диапазонах между соплом реактора и коллектором наноматериалов использовался программный комплекс RADICAL и расширенная схема химических реакций, включающая 753 реакции между 120 компонентами. Проведен расчет состава смеси N_2-CH_4 в процессе конверсии углеводородов. Результаты приведены для различных давлений и экспоненциального изменения температуры вдолб плазменной струи. Рассчитанные высокая концентрация CN и низкая концентрация атомов N подтверждены спектрами излучения, полученными в эксперименте.

Синтез углеродных волокон при разложении ацетилена и пропан-бутановой смеси в струе плазмы гелия и аргона

Получены углеродные нановолокна при конверсии ацетилена и пропан-бутана в струе плазмы гелия и аргона без использования катализаторов [2]. Синтез проведен без использования катализаторов в плазмоструйном реакторе. Продукты синтеза исследованы методами электронной микроскопии, синхронного термического анализа и энергодисперсионного микроанализа. Установлено влияние параметров синтеза на строение и свойства полученных в объеме углеродных нановолокон. При конверсии пропан-бутана в инертной среде найдены условия синтеза длинных полых волокон диаметром до 20 нм, отношением длины к диаметру до 1000. При конверсии ацетилена при 350 Торр образуются многослойные нанотрубки диаметром до 20 нм , а при при150 Торр - волокна диаметром до 200 нм.

Литература

1. M B Shavelkina, E A Filimonova, R Kh Amirov, E Kh Isakaev Methane/nitrogen plasma-assisted synthesis of graphene and carbon nanotubes // J of Physics D.- Applied Physics. 2018. V.51. No.29. 294005. DOI: 10.1088/1361- 463/aacc3d
2. М.Б. Шавелкина, Р.Х.Амиров, Т.Б.Шаталова, В.А.Катаржис Синтез углеродных волокон при разложении ацетилена и пропан-бутановой смеси в струе плазмы // Письма в ЖТФ, 2018, вып. 22., С.42. DOI: 10.21883/PJTF.2018.22.46920.17161

Научно-исследовательский центр физико-технических проблем энергетики ОИВТ РАН (НИЦ-2 ФТПЭ ОИВТ РАН)

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

Отделение 2.2. – магнитоплазменной аэродинамики и МГД преобразования энергии

Бочаров Алексей Николаевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

Управление воспламенением обедненных смесей выскочастотным неравновесным коронным разрядом

Предложен новый способ организации горения в двигателе внутреннего сгорания в двигателях гибридного типа [1]. В настоящее время создание двигателей гибридного типа – одно из ведущих направлений в двигателестроении. Предполагается, что используется обедненная смесь, которая обеспечивает при воспламенении низкую концентрацию NOx. Это также способствует экономии топлива. Трудности воспламенения и формирования волны горения в бедной смеси преодолеваются применением высокочастотных коронных разрядов, которые инициируют авто-воспламенение от сжатия. Время и длительность включения разряда определяются химическими свойствами топлива, а именно, наличием низкотемпературной стадии горения. Это помогает управлять временем воспламенения, предпочтительно - не дальше 10 градусов за верхней мертвой точкой. Разряд помогает решить проблему большой концентрации несгоревших углеводородов и оксида углерода, свойственных горению бедных смесей. Использование неравновесных электрических разрядов небольшой мощности не вносит заметного вклада в дополнительно образование нетермических NOx. Обычная свеча зажигания рассчитана на воспламенения

стехиометрических смесей. Для воспламенения бедных смесей с помощью свечи зажигания требуется значительно больший энерговклад (приблизительно 100-500 Дж/см^3, для сравнения - наносекундный разряд – 1-3 Дж/см^3). При таком большом энерговкладе срок службы свечи резко сокращается.

Исследования по созданию высокоэнтальпийных потоков большой длительности

Проведены испытания тестовой секции водоохлаждаемого канала, спроектированного и изготовленного в ОИВТ РАН, на аэродинамической трубе с магнитогазодинамическим ускорителем в ЦАГИ. Длительность сверхзвукового течения была увеличена более чем на порядок, до 10 с, без снижения полного давления за скачком уплотнения. Рассчитанная по экспериментальным данным с помощью численного кода “PlasmAero”, также разработанного в ОИВТ РАН, удельная полная энтальпия потока была на уровне 10 МДж/кг. Полученные результаты – важный шаг на пути к созданию платформы для широкомасштабных испытаний перспективных материалов теплозащиты и разработке новых, неинтрузивных, способов управления полетом гиперзвукового летательного аппарата на наземной установке в условиях квазистационарного высокоэнтальпийного гиперзвукового потока.

Литература

1. Filimonova E., Bocharov A., Bityurin V Influence of a non-equilibrium discharge impact on the low temperature combustion stage in the HCCI engine, J. Fuel 2018, V.228, p.309-322, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.124
2. D.S Baranov, V.A Bityurin, A.N Bocharov, S.S Bychkov, V.A Grushin, N.V Tretyakova, N.I Batura, E.B Vasilevsky, N.G Zhurkin, N.M Kolushov. Flow characteristics in the water-cooled channel of the MHD accelerator // Journal of Physics: Conf. Series 1112 (2018) 012017 doi:10.1088/1742-6596/1112/1/012017

Научно-исследовательский центр электрофизики и тепловых процессов ОИВТ РАН (НИЦ-4 ЭФТП ОИВТ РАН)

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская 13/2
Лаборатория № 4.1.2. – электрофизики и плазменных процессов
Бабаева Наталья Юрьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.
Найдис Георгий Вениаминович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Моделирование субнаносекундных импульсных разрядов в атмосферном воздухе

Проведено расчетно-теоретическое исследование динамики и структуры разрядов в атмосферном воздухе, формируемых высоковольтными импульсами с короткими (субнаносекундными) фронтами [1-3].. Показано, что в этих условиях создаются квазиоднородные области сильно неравновесной плазмы, с поперечными размерами, достигающими нескольких сантиметров, что представляет значительный интерес в связи с перспективными приложениями в плазмохимии, биомедицине, для накачки лазерных сред, для воспламенения горючих смесей и пр.

Наработка активных частиц в аргоновом СВЧ факеле

Проведены исследования наработки активных частиц в плазме СВЧ факела [4]. Такие частицы (O, O_3, O_2(a), NO, OH и др.) играют важную роль в плазменной медицине. Показано, что выход активных частиц существенно увеличивается при использовании смесей $Ar/O_2/N_2$ или $Ar/O_2/N_2/H_2O$ в качестве плазмообразующего газа. Было также показано, что при больших приложенных мощностях температура газа внутри СВЧ-горелки может быть достаточно высокой. Это может приводить к разрежению газа и нарушению режима производства некоторых видов активных частиц.

Исследование одиночных и комбинированных плазменных струй

Экспериментальными и расчетно-теоретическими методами изучались свойства единичных и комбинированных плазменных струй в аргоне и гелии [5]. Исследовалось

влияние сил гравитации на динамику таких струй. Для единичных струй показано, что в гелии струя имеет тенденцию к всплыванию вверх. Более сложную динамику взаимодействия струй проявляют комбинированные гелиевые струи. В частности, в комбинированных гелиевых струях характер взаимодействия зависит от расстояния между трубками. При одном и том же расстоянии гелиевые струи имеют тенденцию сливаться в одну струю, тогда как аргоновые струи распространяются независимо (каждая по своему каналу) и менее чувствительны к расстоянию между трубками.

Литература

1. Naidis G.V., Tarasenko V.F., Babaeva N.Yu., Lomaev M.I., Subnanosecond breakdown in high-pressure gases // Plasma Sources Science and Technology 27, 013001 (2018) DOI: 10.1088/1361-6595/aaa072
2. В.Ф. Тарасенко, Г.В. Найдис, Д.В. Белоплотов, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, Н.Ю. Бабаева, Стримерный пробой воздуха атмосферного давления в неоднородном электрическом поле при высоких перенапряжениях // Известия вузов. Физика 61 (6), 119-125 (2018) DOI: 10.1007/s11182-018-1507-2
3. В.Ф. Тарасенко, Г.В. Найдис, Д.В. Белоплотов, И.Д. Костыря, Н.Ю. Бабаева, Формирование широких стримеров при субнаносекундных разрядах в воздухе атмосферного давления // Физика плазмы .44(8). 652-660 (2018) DOI: 10.7868/S0367292118080097
4. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, D.V. Tereshonok, E.E. Son, M.M. Vasiliev, O.F.Petrov, V.E. Fortov, Production of active species in argon microwave plasma torch // J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 464004 (2018). https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae455
5. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, V.A. Panov, R. Wang, Y. Zhao, T. Shao, Interaction of Argon and Helium Plasma Jets and Jets Arrays with Account for Gravity // Physics of Plasmas, 25, 063507 (2018); doi: 10.1063/1.5024778

Научно-исследовательский центр электрофизики и тепловых процессов ОИВТ РАН (НИЦ-4 ЭФТП ОИВТ РАН)

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская 13/2

Лаборатория №4.1.2. - электрофизики и плазменных процессов

Смирнов Борис Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Неупругие процессы в газоразрядной плазме инертных газов

Выполнен анализ процессов в газоразрядной плазме инертного газа высокого давления. Вычислены константы скоростей возбуждения нижних возбужденных состояний атомов электронным ударом. Учитывается самосогласованный характер этого процесса, использованы измеренные скорости аналогичных процессов в плазме щелочных металлов. Определены константы скорости ступенчатой ионизации в плотной однородной газоразрядной плазме инертных газов, а также в неоднородной плазме, если неоднородность создана в результате прохождения газоразрядного тока. На основе скоростей указанных процессов вычислены заселенности нижних возбужденных уровней в случае, когда равновесие в газоразрядной плазме инертных газов определяется неупругими столкновениями.

Литература

1. В. П. Афанасьев, Б.М. Смирнов, Д.А. Жиляев. Неупругие процессы в газоразрядной плазме инертных газов // High Temp. 56, 621-631(2018)

Научно-исследовательский центр электрофизики и тепловых процессов ОИВТ РАН (НИЦ-4 ЭФТП ОИВТ РАН)

125412, Москва, Россия, ул. Ижорская 13/2

Лаборатория № 4.2.2. – плазменных энергетических установок

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

Исследование привязки аргоновой дуги к гафниевому катоду

Спектроскопические и термометрические измерения на катоде гафния в аргоновой плазме при атмосферном давлении в стабильном режиме горения дуги показало, что полученный теоретический диапазон значений падения напряжения в объемном слое заряда хорошо согласуется с экспериментальными результатами. На основе численного моделирования получен диапазон значений плотности тока ионов и электронов и напряженности электрического поля на наконечнике катода [1].

Комплексное исследование воздействия плазменной струи на термостойкие материалы

Создана экспериментальная установка для исследования взаимодействия высокоэнтальпийной плазменной струи с поверхностью термостойких материалов. Проведен анализ взаимодействие воздушно-плазменного потока с техническим (изотропным) графитом [2]. Методами двухпозиционной визуализации, микропирометрии и спектроскопии получены температурные поля на поверхности графитового образца и их временные и пространственные изменения, динамика скорости потери массы образца, изменения параметров (температуры и концентрации электронов, температуры тяжелых частиц) поступающего потока плазмы. Кроме этого, результаты использования оптических неоднородностей, введенных в поток графитового стержня для измерения скорости плазменной струи показывают пригодность предлагаемого способа и заслуживают дальнейшего развития.

Литература

1. Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh., Tereshonok D.V. and Tyuftyaev A.S. Investigation of argon arc binding to the hafnium cathode //Physics of Plasmas 25, 073511 (2018). DOI:10.1063/1.5037396.
2. Chinnov V.F., Tyuftyaev A.S., Kavyrshin D.I., Ageev A.G., Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh. Comprehensive Study of the Effect of Plasma Stream on Heat-Resistant Materials // High Temperature. 2018. Volume 56. Issue 1. pp 25–32. DOI:10.1134/S0018151X18010224.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (НИЯУ МИФИ)

115409, Москва, Россия, каширское шоссе 31
Кафедра №21 Физики плазмы
Крат Степан Андреевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Разработка физической модели соосаждения газов с металлами

Впервые разработана модель захвата газов в металлических пленках в ходе их осаждения в плазменном разряде (соосаждения) [1]. Модель основана на описании диффузии частиц, внедряемых в равномерно растущую пленку с ловушками нескольких типов, в квазистатическом приближении.

Для верификации модели проведены эксперименты по соосаждению дейтерия с вольфрамом, молибденом, алюминием. В экспериментах были получены зависимости содержания дейтерия в соосаждённых слоях для температур подложки во время соосаждения от комнатной до 500 °C с разрешением по температуре 25 °C. Полученные данные являются наиболее подробным и широким по диапазону температур результатом одного исследования из когда-либо проводившихся. Модель хорошо описывает экспериментальные данные. В частности, описывается ступенчатый характер температурной зависимости накопления.

Литература

1. Krat S.A., Gasparyan, Yu.M., Vasina, Ya.A., Davletiyarova, A.Ye., Pisarev, A.A. Tungsten-deuterium co-deposition: Experiment and analytical description // Vacuum. 2018. Vol. 149. P. 23–28. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.12.004

Институт ЛаПлаз (НИЯУ МИФИ), Кафедра физики плазмы
115409, Москва, Россия, Каширское шоссе 31
Огородникова Ольга Вячеславовна, с.н.с., к.ф.-м.н.

Комплексное исследование эрозии, транспорта и захвата водорода и гелия в мало-активируемые ферритно-мартенситные стали и нано-структурированные вольфрамовые покрытия на сталях

На основе комплексного исследования эрозии, транспорта и захвата водорода и гелия в мало-активируемые ферритно-мартенситные стали и нано-структурированные вольфрамовые покрытия на сталях, мы выявили существенное влияние (1) переходных процессов на увеличение накопление дейтерия вследствие высокого градиента температуры, (2) эрозии поверхности сталей на уменьшение накопление дейтерия вследствие формирования нано-структурированных приповерхностных слоев, обогащенных атомами тяжелых металлов, (3) наличия гелия на уменьшение накопления дейтерия. Были определены условия образования блистеров и металлического пуха в результате накопления дейтерия и гелия.

Мы рекомендуем использование сталей с оксидным дисперсным упрочнением (СОД) с 12Cr - это наиболее подходящая сталь для применения в термоядерном реакторе с точки зрения радиационной безопасности. Замена Al в СОД-сталях приводит к улучшению сопротивления сталей к коррозии и в то же время уменьшает накопление дейтерия, поэтому такие стали являются предпочтительными. Также мы рекомендуем использовать нано-структурированные вольфрамовые покрытия на сталях для защиты сталей от неминуемой эрозии и проникновения трития в систему охлаждения. Вольфрамовые покрытия также решат проблему роста индуцированного ионно-внедренным гелием пуха на сталях, так как температура вольфрама в качестве материала первой стенки будет меньше температуры образования пуха. Для решения проблемы роста пуха в области дивертора, где предполагается использовать вольфрам и температуры будут достаточно высокими для формирования пуха, индуцированного гелием, рекомендуется исследовать пути подавления роста пуха.

Литература

1. V.Kh. Alimov, O.V. Ogorodnikova, Y. Hatano, Yu.M. Gasparyan, V.S. Efimov, M. Mayer, Z. Zhou, M. Oyaizu, K. Isobe, H. Nakamura, T. Hayashi, ‘Surface modification and deuterium retention in reduced-activation steels exposed to low-energy, high-flux pure and helium-seeded deuterium plasmas’, J. Nucl. Mater. 502 (2018) 1-8, https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.01.060
2. O.V. Ogorodnikova, C. Ruset, D. Dellasega, A. Pezzoli, M. Passoni, K. Sugiyama, Yu. Gasparyan, V. Efimov, ’Deuterium retention in dense and disordered nanostructured tungsten coating’, J. Nucl. Mater. 507 (2018) 226-240, https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.04.039
3. O. V. Ogorodnikova, K.S. Klimov, A.G. Poskakalov, A.V. Kaziev, M. M. Kharkov, V.S. Efimov, Yu. M. Gasparyan, N.V. Volkov, V. Kh. Alimov, M. Tokitani, ‘Deuterium and helium retention in W with and without He-induced W ‘fuzz’ exposed to pulsed high-temperature deuterium plasma’, to be published in J. Nucl. Mater., 2018, 10.1016/j.jnucmat.2018.12.023
4. S.A. Ryabtsev, Yu.M. Gasparyan, O.V. Ogorodnikova, Z.R. Harutyunyan, N. S. Klimov, A. G. Poskakalov and A.A. Pisarev, ‘Influence of Preliminary Irradiation by a High Heat Flux on the Re-emission and Thermal Desorption of Deuterium Implanted from Reduced

Activation Steels', Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques 12(5), 2018, 1032-1036, DOI: 10.1134/S1027451018050312
5. A.G. Poskakalov, N.S. Klimov, Yu. M. Gasparyan, O.V. Ogorodnikova, V. Efimov, VANT, Series Thermonuclear fusion, 2018, 41 (1), 23, http://vant.iterru.ru/vant_2018_1/3.pdf

Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ)

199034, Санкт-Петербург, Россия, Университетская наб. 7-9
Кафедра Оптики
Голубовский Юрий Борисович, проф., д.ф.-м.н.

Кафедра Общей Физики 1
Карасев Виктор Юрьевич, проф., д.ф.-м.н.

Исследование неравновесной газоразрядной плазмы

В 2018 г. продолжались традиционные исследования по неравновесной газоразрядной плазме на кафедре оптики и первой кафедре общей физики. Разрабатывались спектроскопические методы диагностики дуговой сильноточной плазмы с высоким пространственным и спектральным разрешением. Продолжались исследования роли пленения резонансного излучения в различных источниках плазмы. Изучалось поведение пылевой плазмы в сверхсильных магнитных полях. Проводилась работа по изучению пробойных явлений. Выполнены работы по кинетике ионов в прикатодных областях. Обсуждались вопросы влияния пылевых частиц на свойства тлеющего разряда. Результаты работы отражены в прилагаемом списке публикаций за 2018 г.

Литература

1. D.V. Kalanov, R. Kozakov, A.V. Siasko, A. Bösel, Yu.B. Golubovskii and S. Gortschakow. Spatially resolved LAAS/OES diagnostics of a free-burning Ar arc: measurements of excited atom densities // Journal of physics D: Applied Physics (принята к печати, DOI:/10.1088/1361-6463/aaf5c)
2. Golubovskii, Y. B., Siasko, A. V., Kalanov, D. V. & Nekuchaev, V. O. Spatial and temporal formation dynamics of glow discharge constriction and stratification" // Plasma Sources Science and Technology 2018, V. 27, # 8, p. 085009. DOI:/10.1088/1361-6595/aad799.
3. Golubovskii, Y., Karasev, V. & Kartasheva, A. Resonance properties of a single dust particle in a stratified glow discharge // Plasma Sources Science and Technology 2018, V. 27, # 6, p. 065006. DOI: 10.1088/1361-6595/aaca73.

A. Kartasheva, Yu. Golubovskii, V. Karasev. Dust Particle Charge in a Stratified Glow Discharge // IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, V. 46 , # 4, p. 723. DOI: 10.1109/TPS.2017.2742462.

4. E. S. Dzlieva, L. G. Dyachkov, L. A. Novikov, S. I. Pavlov and V. Yu. Karasev. Complex plasma in glow discharge in a strong magnetic field // EPL, 2018, V. 123, # 1, p. 15001. DOI: 10.1209/0295-5075/123/15001.
5. V. Karasev, E. Dzlieva, S. Pavlov, L. Novikov, S. Maiorov. The Rotation of Complex Plasmas in a Stratified Glow Discharge in the Strong Magnetic Field // IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, V. 46 , # 4 , p. 727. DOI: 10.1109/TPS.2017.2754546.
6. Дзлиева Е.С., Новиков Л.А., Павлов С. И., Карасев В.Ю. Пылевая плазма в тлеющем разряде в магнитном поле до 3000 G // Письма ЖТФ, 2018. Т. 44., # 19, С. 66. DOI:10.21883/PJTF.2018.19.46684.17430.
7. Kalinin, S. A., Kapitonova, M. A., Matveev, R. M., Meshchanov, A. V., & Ionikh, Y. Z. Observation and Investigation of "Reverse Breakdown" in a Discharge Tube // Plasma Physics Reports, 2018, V.44, # 11, p. 1009-1018. DOI:10.1134/S1063780X18110053.

8. Meshchanov, A. V., Ivanov, D. O., Ionikh, Y. Z., & Shishpanov, A. I. Triggering of the breakdown in a discharge tube by visible-spectrum light pulses // Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, V.51, #33, p. 335202. DOI: 10.1088/1361-6463/aad1d8.
9. Pipa, A. V., Sushentsev, D., Hamann, S., Dufloux, C., Ionikh, Y. Z., Hannemann, M. Wiese, J. Ropcke, J. Wollweber, J. Design and optical study of a microwave plasma torch in nitrogen used for the evaporation of aluminium wires // Contributions to Plasma Physics, 2018, V. 58, # 5, p. 353-366. DOI:10.1002/ctpp.201700112.
10. Kalinin, S. A., Meshchanov, A. V., Shishpanov, A. I., & Ionikh, Y. Z. Dynamics of Breakdown in a Low-Pressure Argon–Mercury Mixture in a Long Discharge Tube // Plasma Physics Reports, 2018, V. 44, # 3, p. 345-358. DOI: 10.1134/S1063780X18030054.
11. Dyatko, N. A., Ionikh, Y. Z., Meshchanov, A. V., & Napartovich, A. P. Influence of a Nitrogen Admixture on the Anomalous Memory Effect in the Breakdown of Low-Pressure Argon in a Long Discharge Tube // Plasma Physics Reports, 2018, V. 44, # 3, p. 334-344. DOI:10.1134/S1063780X15080061.
12. Mustafaev, A. S., Nekuchaev, V. O., & Sukhomlinov, V. S. Effect of Elastic Collisions on the Ion Distribution Function in Parent Gas Discharge Plasma // High Temperature, 2018, V. 56, # 2, p. 162-172. DOI:10.1134/S0018151X18020165.
13. Sukhomlinov, V. S., & Mustafaev, A. S. Analytical Theory of Energy Relaxation Upon Propagation of a High-Energy Electron Beam in Gas // High Temperature, 2018, V. 56, # 1, p. 10-19. DOI:10.1134/S0018151X18010182.
14. Sukhomlinov V. S., Mustafaev A. S., Murillo O. Ion energy distribution function in the wall layer at a negative wall potential with respect to the plasma // Physics of Plasmas, 2018, V. 25, # 1, p. 013513. DOI:10.1063/1.5017309.
15. Sukhomlinov, V., Mustafaev, A., & Timofeev, N. Probe measurements of the electron velocity distribution function in beams: Low-voltage beam discharge in helium // Journal of Applied Physics, 2018, V. 123, # 14, p. 143301. DOI:10.1063/1.5019819.
16. Mustafaev A. S., Sukhomlinov V. S., Timofeev N. A. Comment on 'Information hidden in the velocity distribution of ions and the exact kinetic Bohm criterion' // Plasma Sources Science and Technology, 2018 V. 27, # 3, p. 038001. DOI:10.1088/1361-6595/aab026.
17. Serdobintsev, P. Y., Melnikov, A. S., Pastor, A. A., Timofeev, N. A., & Khodorkovskiy, M. A. Relaxation times measurement in single and multiply excited xenon clusters // The Journal of Chemical Physics, 2018, V. 148, # 19, p. 194301. DOI:10.1063/1.5025274.
18. Chen, Z. Q., Zhou, B. K., Zhang, H., Hong, L. L., Zou, C. L., Li, P., W. D. Zhao, X. D. Liu, O. Stepanova, Kudryavtsev, A. A. Characteristic plume morphologies of atmospheric Ar and He plasma jets excited by a pulsed microwave hairpin resonator // Chinese Physics B, 2018, V. 27, # 5, p. 055202. DOI:10.1088/1674-1056/27/5/055202.
19. Liang, Y., Wang, Y., Li, H., Tian, R., Yuan, C., Kudryavtsev, A. A., Rabadanov K. M., Wu J., Zhou Z., Tian, H. The nonlocal electron kinetics for a low-pressure glow discharge dusty plasma // Physics of Plasmas, 2018, V. 25, # 5, p. 053702. DOI:10.1063/1.5025140.
20. Yuan, C., Bogdanov, E. A., Kudryavtsev, A. A., & Zhou, Z. Vortex electron flux and EDF nonlocality of moderate and high-pressure gas discharge plasmas // Plasma Sources Science and Technology, 2018, V. 27, #. 4, p. 045007. DOI:10.1088/1361-6595/aab75f.
21. Yuan, C., Tian, R., Eliseev, S. I., Bekasov, V. S., Bogdanov, E. A., Kudryavtsev, A. A., & Zhou, Z. Numerical simulation and analysis of electromagnetic-wave absorption of a plasma slab created by a direct-current discharge with gridded anode // Journal of Applied Physics, 2018, V. 123, # 11, p. 113303. DOI:10.1063/1.4999919.
22. Tian, R., Yuan, C., Li, H., Liang, Y., Wu, J., Kudryavtsev, A. A., Kirsanov G. V., Zhou Z., Jiang, Y. Influence of dust particles on positive column of DC glow discharge // Journal of Applied Physics, 2018, V. 123, # 10, p. 103301. DOI:10.1063/1.5021289.
23. Astafiev, A., Kudryavtsev, A., Stepanova, O., Belyaev, V., Zamchy, R., & Chen, Z. DC glow microdischarge with a self-determined length in helium and argon at atmospheric

pressure // Journal of Applied Physics, 2018, V. 123, # 8, p. 083304. DOI:10.1063/1.4999551.

24. Liang, Y., Yuan, C., Li, H., Tian, R., Wu, J., Kudryavtsev, A. A., Zhou Z., Tian, H. Influence of dust particles on DC glow discharge plasma // Physics of Plasmas, 2018, V. 25, # 2, p. 023701. DOI:10.1063/1.5008968.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

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

Инженерный институт, кафедра технической физики и энергетики

Кашапов Наиль Фаикович, зав. каф., д.т.н., проф.

Кашапов Рамиль Наилевич, доцент, к.т.н.

Кашапов Ленар Наилевич, магистр

Исследование физических процессов между жидким и металлическим электродами.

Исследованы электрофизические, гидрогазодинамические и тепловые характеристики разряда, возникающего между струйным жидким и металлическим электродами. С использованием шлирен-метода осуществлена пространственная визуализация картин течения в зоне газового разряда[1, 2].

Исследование контактного тлеющего разряда в электролите (CGDE) при разных температурах электролитического катода для случаев погруженного анода и находящегося в контакте с поверхностью, привели к следующим результатам: 1) В области температур электролитического катода меньше 80ºС происходит горение дугового разряда. При превышении данного значения происходит горение «лидерного катода», что подтверждается кардинальными изменениями ВАХ разряда и его формы и структуры. 2) Обнаружена лидерная структура разряда для раствора гидроксида натрия. Путем погружения анода в электролит можно увеличивать длину лидеров от 3 мм на поверхности до 25 мм при погружении. Лидеры прорастают с анода и распространяются по поверхности электролита. 3)Определены условия горения разряда в аномально большой пузырьково-паровоздушной оболочке в растворе гидроксида натрия. 4) Показано, что именно интенсивное испарение электролита является причиной перехода из дугового в лидерный разряд в области напряжений от 0 – 350 В. 5) Предложен механизм образования лидерной структуры при CGDE. [3]

Исследования горения газового разряда между металлическим анодом марки 07Х16Н4Д4Б-Ш и жидким катодом показали возможность получения сферического порошка дисперсностью частиц от 0.5 до 40 мкм. Анализ полученных СЭМ-фотографий показывает схожесть с порошком, получаемым методом газовой атомизации. Определено влияние параметров газового разряда на производительность процесса и размер получаемых частиц. В диапазоне напряжений от 500 до 800 В происходит образование частиц размером менее 40 мкм с производительностью 10^{-2} г/с. Выше данного диапазона происходит оплавление электрода и процесс получения порошка прекращается. Расположение металлического электрода влияет на физико-химические процессы, протекающие в разряде и механизм образования частиц.[4]

Литература

1. Gaisin, A.F. Kashapov N.F. Investigation of Physical Processes in the Gas Discharge Region Between Liquid Electrodes // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2018. Volume 59. No. 4. pp 591-593. DOI: 10.1134/S002189441804003X.
2. Gaisin, A.F., Kashapov N.F., Kuputdinova A.I., Mukhametov R.A. Discharge between Liquid Jet and Metallic Electrodes // Technical Physics. 2018. Volume 63. No. 5. pp 695-699. DOI: 10.1134/S1063784218050080.

3. Kashapov, N.F., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Volume 51. No. 49. P. 494003.DOI: 10.1088/1361-6463/aae334.
4. Kashapov, R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F. Plasma electrolyte produce 17-4PH powder for use in 3D MicroPrint technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Volume 412, No. 1. – P. 012091. DOI: 10.1088/1757-899X/412/1/012091.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

634055, г. Томск, Россия, просп. Академический, д. 2/3
Лаборатория плазменных источников
Юшков Георгий Юрьевич, г.н.с., д.т.н.

Генерация ионов металлов с высоким зарядом в плазме сильноточной короткоимпульсной вакуумной дуги

В результате исследования процессов многократной ионизации в плазме сильноточной импульсной вакуумной дуги с амплитудой тока в единицы килоампер и длительностью импульса уровня 1 мкс микросекунд определены оптимальные условия, обеспечивающие повышение максимального зарядового состояния ионов тяжелых металлов в плазме дугового разряда. В ионном источнике с расположением катода вдали от других электродов и со струнной ионно-оптической системой, обеспечивающих меньший уровень давления в области плазмы разряда, получены пучки ионов висмута с амплитудой тока уровня 1 А и рекордными максимальным зарядовым состоянием 19+ при средней зарядности ионов висмута 17,1+. Полученный результат открывает новые возможности в генерации на основе отбора ионов из плазмы вакуумной дуги сильноточных пучков многозарядных ионов металлов для применения на практике.

Литература

1. V.P. Frolova, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, and G.Yu. Yushkov. Generation of high charge state metal ions in plasma of high current short pulse duration vacuum arc // Proc. 28th Int. Symp. on Discharges an Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV-2018), Sept.23-28, Greifswald, Germany, pp. 389-292.

Лаборатория вакуумной электроники
Нефедцев Евгений Валериевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Трехжидкостная гидродинамическая модель устойчивой стадии расширения плазменного факела эктона

Создана модифицированная гидродинамическая модель расширения плазменного факела взрывоэмиссионного центра (эктона) одноэлементной плазмы с ионами двух зарядностей и электронами. В рамках модели показано, что разделение ионов различных зарядностей по скоростям эффективно происходит в случае отсутствия внешнего электрического поля, в то время как в токонесущей плазме ионы разных зарядностей движутся с почти одинаковыми скоростями, что полностью согласуется с экспериментальными фактами. Данное согласие доказывает применимость модели для решения практических задач. Практическая ценность модели состоит в доступности её численной реализации на персональных компьютерах.

Литература

1. Е. В. Нефёдцев, А. В. Батраков. Моделирование устойчивого расширения моноэлементной трехкомпонентной плазмы взрывоэмиссионного центра// ЖЭТФ, 2018, Т. 153, вып. 4, с. 656-665.

Лаборатория вакуумной электроники
Озур Григорий Евгеньевич, в.н.с., д.т.н.

Гибридный источник сильноточного электронного пучка и металлической плазмы для технологий инженерии поверхности металлических материалов

Разработан и исследован экспериментальный образец устройства, сочетающего источник сильноточного электронного пучка на основе плазмонаполненного диода с взрывоэмисионным катодом и кольцевой магнетронный распылитель, совмещенные в одном корпусе. Показано, что магнитная система магнетронного распылителя не ухудшает характеристики электронного пучка, формируемого в источнике и транспортируемого через внутреннее пространство распылителя вдоль оси системы. Такой гибридный источник сильноточного электронного пучка является эффективным инструментом для формирования поверхностных сплавов на металлических материалах.

Литература

1. G.. Ozur, P. Kiziridi, A review on the recent results on production of low-energy, high-current electron beams // Book of Abstracts. EAPPC & BEAMS 2018, Changsha, China, 16-20 September 2018.- p. 182.
2. P.P. Kiziridi, A.B. Markov, G.E. Ozur, A.G. Padey, E.V. Yakovlev, A High-Current Electron Gun Integrated with a Magnetron Sputtering System // Instruments and Experimental Techniques.- 2018.- Vol. 61.- No. 3.- pp. 433–435.

Лаборатория оптических излучений
Тарасенко Виктор Федотович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Механизм субнаносекундного пробоя газов высокого давления в неоднородном электрическом поле

Исследован субнаносекундный пробой промежутка «остриё–плоскость» в молекулярных и атомарных газах повышенного давления. Показано, что временной ход динамического тока смещения, измеряемого токовым шунтом либо коллектором, расположенным за сетчатым электродом, определяется темпом перераспределения электрического поля в промежутке за счет изменения формы и размеров стримера. На основе измерений тока смещения рассчитан временной ход напряженности электрического поля в зоне вблизи заземленного электрода. Предложен новый механизм формирования диффузных разрядов за счёт стримеров с большими поперечными размерами. Согласно этому механизму высокая скорость ионизации газа при обеих полярностях обеспечивается быстрыми электронами с энергией сотни эВ – единицы кэВ, а предыонизация газа осуществляется убегающими электронами с энергией десятки кэВ и более – при формировании анодонаправленного стримера и рентгеновским излучением (характеристическим и тормозным) – при формировании катодонаправленного стримера.

Литература

1. Белоплотов Д. В., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А., Ломаев М.И. Формирование стримеров шаровой формы при субнаносекундном пробое газов высокого давления в неоднородном электрическом поле // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 106. – №. 10. – С. 627-632.
2. Д. В. Белоплотов, М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, Д. А. Сорокин / Измерение динамического тока смещения — новый способ исследования динамики формирования стримера при пробое газов высокого давления // Письма в ЖЭТФ. 2018. т. 107, в. 10, с. 636–642.

3. Dmitry V. Beloplotov, Mikhail I. Lomaev, Dmitry A. Sorokin, and Victor F. Tarasenko / Displacement current during the formation of positive streamers in atmospheric pressure air with a highly inhomogeneous electric field // Physics of Plasmas 25, 083511 (2018)
4. Белоплотов Д.В., *Ломаев М.И. Сорокин Д.А.,* Тарасенко В.Ф. / Стримеры при субнаносекундном пробое аргона и азота в неоднородном электрическом поле при обеих полярностях // Журнал технической физики. 2018. Т.88. вып. 6. С. 815-822.
5. Тарасенко В.Ф., Найдис Г.В., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Бабаева Н.Ю. / Стримерный пробой воздуха атмосферного давления в неоднородном электрическом поле при высоких перенапряжениях // Известия ВУЗов. Физика. 2018. Т.61. №6. С.119-125.
6. Тарасенко В.Ф., Найдис Г.В., Белоплотов Д.В., Костыря И.Д., Бабаева Н.Ю. / Формирование широких стримеров при субнаносекундных разрядах в воздухе атмосферного давления // Физика плазмы, 2018. том 44. № 8, С. 652–660.

Лаборатория низкотемпературной плазмы
Королев Юрий Дмитриевич, д.ф.-м.н.

Работа тиратрона с холодным катодом с наносекундной стабильностью запуска

Работа тиратронов с наносекундной стабильностью срабатывания относительно импульса запуска требуется в ряде технических применений, в частности, при параллельной коммутации большого количества приборов в схеме линейных ускорителей. Применительно к задаче параллельной коммутации в ускорителе ЛИУ-20 проведен цикл исследований тиратрона ТПИ1-10к/50 (коммутируемый ток до 10 кА, анодное напряжение до 50 кВ). Выявлены физические причины, обусловливающие нестабильность срабатывания прибора. Предложены схемы и методы запуска, обеспечивающие разброс срабатывания тиратронов на уровне 10 нс при анодных напряжениях до 40 кВ.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 14-19-00139, «Сильноточный импульсный разряд низкого давления с полым катодом» (рук. Ю.Д. Королев, 2014 – 2018 г.).

Литература

1. Ю. Д. Королев, Н. В. Ландль, В. Г. Гейман, О. Б. Франц, И. А. Шемякин, В. С. Касьянов, А. В. Болотов, «Исследование стабильности запуска тиратрона с холодным катодом при высоких анодных напряжениях», *Физика плазмы*, т. 44, № 1, с. 112-120, 2018.
2. Y. D. Korolev and N. N. Koval, “Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 51, 323001 (21 pp), 2018.
3. Y. D. Korolev, N. V. Landl, V. G. Geyman, O. B. Frants, and G. A. Argunov, “Hollow-cathode glow discharge in a trigger unit of pseudospark switch,” *Physics of Plasmas*, vol. 25, Article Number 113510, 2018. doi: 10.1063/1.5044711

Лаборатория теоретической физики
Козырев Андрей Владимирович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Моделирование разряда в азоте высокого давления с убегающими электронами с учетом объемной фотоионизации газа в гибридной теоретической модели

В рамках двумерной гибридной теоретической модели разряда впервые смоделирован разряд в азоте высокого давления с убегающими электронами с учетом объемной фотоионизации газа. Суть гибридного подхода к моделированию разрядов состоит в использовании различных методов описания тепловых электронов плазмы (метод гидродинамического описания) и убегающих электронов (метод физической кинетики). Моделирование позволило рассчитать пространственно-временную структуру

начальной стадии пробоя диода и определить основные параметры потока убегающих электронов в разряде. Рассчитанные с учетом объемной фотоионизации картины разряда в геометрии острие-плоскость позволили выявить заметную разницу в характеристиках и пространственной структуре разряда при смене полярности острийного электрода.

Литература

1. Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Семенюк Н.С., Коковин А.О. Теория высоковольтного импульсного разряда в газе высокого давления: гидродинамический и кинетический подходы // Известия высших учебных заведений. Физика. − 2018. − Т. 61. − № 4 − С. 3−10
2. V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, and A.O. Kokovin. Numerical simulation of fast atmospheric pressure discharge in gas diode with plane-grid cathode system // MATEC Web of Conferences 240, 05040 (2018).
3. V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, A.O. Kokovin. Hybrid Numerical Simulation of the Nanosecond Discharge in Gas-Filled Diode with Plane-Grid Cathode // Proc. Of 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Greifswald, Germany, 23−28 Sept. 2018, p. 483−486.
4. V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, A.O. Kokovin, and V. Goliak. Theoretical Modelling of Fast Atmospheric Pressure Discharge in Gas Diode with Plane-Grid Cathode System // 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE), 2018, September 16 – 22, Tomsk, Russia, P.200−203.

Лаборатория теоретической физики
Козырев Андрей Владимирович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Физический механизм формирования объемной структуры разряда с осциллирующими электронами

На базе кинетического описания электронной компоненты плазмы в разряде низкого давления выявлен физический механизм формирования объемной структуры разряда с осциллирующими электронами. Продемонстрированы самосогласованные процессы генерации плазмы и формирования профиля электрического потенциала в промежутке после инжекции электронов с катодной поверхности. Показано, что накопление ионов в промежутке сопровождается формированием немонотонного распределения потенциала и последующего заполнения образовавшейся потенциальной ямы горячими термализованными электронами. Моделирование позволяет проследить за всеми деталями этого процесса, а также рассчитать время формирования разряда и функцию распределения электронов по энергиям в плазме.

Литература

1. A.V. Kozyrev, Yu.D. Korolev, N. S. Semeniuk, and A.O. Kokovin. Physical Kinetics of a Gas Breakdown at Left Branch of Paschen Curve // Proc. Of 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Greifswald, Germany, 23−28 Sept. 2018, p. 69−72.

Лаборатория плазменной эмиссионной электроники
Коваль Николай Николаевич, г.н.с., д.т.н.

Генерация мощных электронных пучков субмиллисекундной длительности в источнике с сетчатым плазменным катодом и плазменным анодом для приложений в области физического материаловедения и технологий

Проведена модернизация источника электронов с сетчатым плазменным катодом и открытым плазменным анодом. Модернизация выполнена на основе изменения конфигурации электродов разрядов, оптимизации геометрии канала контрагирования, выборе оптимальной величины и конфигурации магнитного поля в области катода разряда

и использования источника питания разряда с индуктивным накопителем (источником тока). В результате получен импульсный электронный пучок с энергозапасом до 1 кДж, длительностью импульса до 500 мкс и амплитудой тока до 350 А, при отсутствии обрывов тока пучка. Определено, что при равной плотности энергии на облучаемой поверхности, увеличение длительности импульса тока пучка приводит к заметному росту износостойкости облученной стали 20Х13 (при длительности импульса 450 мкс рост более чем в 20 раз относительно исходной). Микротвердость поверхностного слоя после обработки импульсами 50 – 450 мкс остается постоянной и превышает исходную в ~ 1.5 раза [1].

Генерация импульсного электронного пучка, предназначенного для проведения процессов модификации поверхности материалов и изделий

Разработан и создан плазменный сеточный катод, работающий с частичным погружением в продольное магнитное поле (с величиной до (0.01-0.03) Т в области эмиссионной сетки) на основе импульсного (20-500) мкс дугового разряда низкого давления в котором за счет оптимизации разрядной системы получена стабильная, азимутально однородная генерация эмиссионной плазмы при наличии в газоразрядной системе дополнительного электрода, позволяющего управлять начальным распределением плотности тока пучка по его сечению при формировании электронного пучка с энергией электронов (5-25) кэВ, амплитудой тока (50-500) А и начальным диаметром (40-60) мм. Созданный катод может использоваться в электронных источниках, формирующих сильноточный низкоэнергетический электронный пучок, перспективный для использования в процессах наноструктуризации поверхности материалов и изделий с целью улучшения их потребительских и эксплуатационных свойств [2].

Система генерации плазмы несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов в протяженных полостях сложной формы.

Разработан новый метод обработки внутренних стенок криволинейных протяжённых полостей, в том числе труб. Для генерации плазмы при низком давлении (0,2-1 Па) использовалась двухступенчатая система, где основной несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом генерировал рабочую плазму в обрабатываемой полости, а плазма вспомогательного разряда, создаваемая плазмогенератором «ПИНК» (плазменный источник с накалённым катодом), являлась источником электронов для стабильного зажигания и горения основного разряда. В данной системе при ионно-плазменной обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т с помощью азотосодержащей плазмы несамостоятельного тлеющего разряда за 1 час азотирования при температуре (600 – 650) ºС был получен азотированный слой толщиной до 60 мкм с микротвёрдостью ≈7 ГПа, что более чем в 2 раза больше чем исходная твёрдость поверхности. Разработанный метод перспективен для использования в промышленности [3].

Литература

1. M.S. Vorobyov, Yu.F. Ivanov, Yu.H. Akhmadeev, P.V. Moskvin, E.A. Petrikova, I.V. Lopatin Surface structure and properties of high-chromium steel irradiated with a submillisecond pulsed electron beam // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 (2018) 032064; doi :10.1088/1742-6596/1115/3/032064
2. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. Плазменные сеточные катоды на основе контрагированного дугового разряда для генерации импульсного интенсивного низкоэнергетического электронного пучка в плазмонаполненном диоде с продольным магнитным полем // Труды VI Международного Крейнделевсого семинара «Плазменная эмиссионная электроника», г. Улан-Удэ, 3-8 августа 2018 г. с. 26-31. Электрон.
3. Игнатов Д.Ю., Лопатин И.В., Денисов В.В., Крысина О.В., Ахмадеев Ю.Х., Коваль Н.Н. Генерация плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом для химико-термической обработки внутренней поверхности полостей протяжённой и

сложной формы. // Труды VI Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника» – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 03-08 августа 2018 г., С. 65-69.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН
Отдел оптики низкотемпературной плазмы
Очкин Владимир Николаевич, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

Бернацкий Антон Владиславович, н.с., к.ф.-м.н.

Разработка методов спектроскопии высокой чувствительности для контроля примесей в плазменных реакторов

Разработан новый метод исследования состава многокомпонентной плазмы. Он сочетает недавно предложенную нами технику мультиспектральной актинометрии с концепцией промежуточных актинометров. Впервые, с использованием предложенного метода, экспериментально и теоретически исследуется химический состав плазмы разряда в инертных газах с добавками одновременно H_2O и D_2 [1]. По результатам измерений апробирована построенная плазмохимическая модель, описывающая превращения газовой смеси $He+H_2O+D_2$. Описаны динамика и стационарные концентрации около 20 атомных и молекулярных частиц в условиях плазмы полого катода для моделирования вакуумной изоляции первой стенки термоядерного реактора. При этом значительно расширяются возможности традиционной эмиссионной количественной спектроскопии. Получены рекордные по чувствительности и динамическим диапазонам данные для широкого набора исходных плазмообразующих газов (H_2O (10^6-10^{16}) $см^{-3}$ и D_2 (10^{12}-10^{16}) $см^{-3}$) и продуктов их трансформаций. Подход и полученные конкретные данные обеспечивают контроль за функционированием и предотвращением нештатных ситуаций в источниках плазмы, включая пристеночные области термоядерных реакторов.

Литература

1. A.V. Bernatskiy, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin. Transformations of neutral particles in the discharge plasma in inert gases with water vapor and deuterium // Physics of Plasmas. 2018, V. 25, No. 8, 083517 (9pp). DOI: 10.1063/1.5042839

Отдел физической электроники ФИАН (ОФЭ ФИАН)
Месяц Геннадий Андреевич, зав. отделом, академик, Яландин Михаил Иванович, зав. лаб., академик, Зубарев Михаил Иванович, гнс, член-корр. РАН (работа выполнена совместно с ИЭФ УрО РАН).

Формирование пучков убегающих электронов при импульсном пробое сильноперенапряженных газовых промежутков атмосферного давления

Получены пучки убегающих электронов с энергией до 1.4 МэВ в воздухе при импульсном разряде с рекордной скоростью роста напряжения – до 10 МВ/нс [1]. В экспериментах время нарастания напряжения в воздушном промежутке было сравнимо с временем ускорения электронов от катода к аноду, что позволило сформировать пучок убегающих электронов с релятивистскими энергиями, соответствующими амплитуде импульса напряжения. Рекордный импульс напряжения был получен с использованием полностью твердотельного импульсного источника питания и гиромагнитных нелинейных линий передачи.

Проведено исследование условий убегания электронов в газовом диоде в резко неоднородном электрическом поле, обусловленном геометрией электродов [2]. Для

кромочного катода получено аналитическое решение уравнений движения электронов, согласно которому для их убегания на периферии, в области слабого поля, требуется, чтобы приложенная разность потенциалов превышала некоторое пороговое значение, определяемое межэлектродным расстоянием и параметрами газа. Новое условие накладывает более высокие требования, чем классическое, на величину электрического поля для сильно заостренной кромки катода. Результаты расчетов подтверждены проведенными экспериментами, в которых определялись условия убегания электронов для серии катодов с различными радиусами скругления кромки.

Литература

1. Mesyats G. A., Pedos M. S., Rukin S. N., Rostov V. V., Romanchenko I. V., Sadykova A. G., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Ul'masculov M. R., and Yalandin M. I "Formation of 1.4 MeV runaway electron flows in air using a solid-state generator with 10 MV/ns voltage rise rate // Applied Physics Letters 112 163501(2018). DOI: 10.1063/1.5025751
2. Zubarev, N. M., Yalandin, M. I., Mesyats, G. A., Barengolts, S. A., Sadykova, A., Sharypov, K., Shpak V. G., Shunailov S. A., and Zubareva, O. V. 2018 "Experimental and theoretical investigations of the conditions for the generation of runaway electrons in a gas diode with a strongly nonuniform electric field" Journal of Physics D: Applied Physics 51 284003 (2018).

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ)

607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

125412, Москва, Россия

М.А.Мочалов, в.н.с., д.ф.-м.н., Р.И.Илькаев, почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ, академик РАН, В.Е.Фортов, научный руководитель ОИВТ РАН, академик РАН, А.Л.Михайлов, зам. научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, д.т.н., В.А.Аринин, с.н.с., А.О.Бликов, нач. лаб., к.ф.-м.н., В.А.Огородников, нач. отдела, д.ф.-м.н., А.В.Рыжков, зам. нач. отдела, В.А.Комраков, нач. группы, И.П.Максимкин, нач. отдела

Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия при давлении ~ 10 ТПа

С использованием сферической двухкаскадной камеры и блока взрывчатого вещества (ВВ) с массой $M \approx 85$ кг в тротиловом эквиваленте неидеальная плазма гелия сжата до плотности $\rho \sim 9$ г/см^3 давлением $P \sim 10000$ ГПа [1].

Эксперимент выполнен на рентгенографическом комплексе с использованием одновременно трех бетатронов с граничной энергией ≈ 60 МэВ и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. Давление сжатого гелия определено по результатам газодинамического расчета.

В результате проведенного эксперимента расширена область исследованных состояний квазиизэнтропически сжатой неидеальной плазмы гелия до уникально высокого давления $P \sim 10000$ ГПа. Анализ разработанной авторами методологии изготовления сферических устройств позволяет надеяться на возможность исследований квазиизэнтропической сжимаемости неидеальной плазмы гелия до давлений $P \sim 20000$ ГПа.

Литература

1. М.А.Мочалов, Р.И.Илькаев, В.Е.Фортов, А.Л.Михайлов, А.О.Бликов, В.А.Огородников, А.В.Рыжков, В.А.Комраков, И.П.Максимкин. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия при давлении ~ 10 ТПа. Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 10, с. 692-696, 2018. DOI: 10.1134/S0370274X18220022. M.A.Mochalov, R.I.Il'kaev, V.E.Fortov, A.L.Mikhailov, V.A.Arinin, A.O.Blikov, V.A.Ogorodnikov, A.V.Ryzhkov, V.A.Komrakov, I.P.Maksimkin. Measurement of Quasi-Isentropic Compressibility of Gaseous Helium at a Presure of ~10 TPa. JETP Letters, Vol. 108, No. 10, pp. 656-660, 2018. DOI: 10.1134/S0021364018220125.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН)
125047, Москва, Россия, Миусская пл. 4
Отдел № 15
Шпатаковская Галина Васильевна, эксперт-советник, д.ф.-м.н.

Зависимость от степени ионизации и релятивистские эффекты в электронных энергиях связи свободных атомов и ионов

Квазиклассический анализ энергий связи электронов, предложенный ранее для атомов, применяется к положительным ионам. В результате обнаружено свойство подобия энергий связи по атомному номеру и степени ионизации ионов. Найденный скейлинг позволяет сравнивать энергии связи в большом числе атомов и ионов, наглядно показывает влияние релятивистского спин-орбитального взаимодействия в тяжелых атомах и может быть использован для проверки новых данных по орбитальным энергиям связи. Энергии связи в заполненных оболочках могут быть выражены через две не зависящие от атомного номера функции. Для последних построены полиномиальные аппроксимации с целью аналитической оценки энергий связи в произвольном многоэлектронном ионе. Эти оценки могут быть использованы, например, как начальные значения в более точных расчетах или для приближенного вычисления сечения ионизации многоэлектронных атомов и ионов другими частицами [1].

Подобие по атомному номеру *K*- и *L*- рентгеновских термов в многоэлектронных атомах

В дополнение к известному закону Мозли обнаружены иные зависимости экспериментальных рентгеновских уровней K, L_I, L_{II}, L_{III} от атомного номера. Простейшая аппроксимация найденных зависимостей с помощью кубических полиномов позволяет не только описывать экспериментальные данные с погрешностью менее одного процента, но и контролировать их надежность [2].

Литература

1. Shpatakovskaya G.V. Dependence on Ionization Degree and Relativistic Effects in Electron Binding Energies in Free Atoms and Ions //Keldysh Institute Preprints. 2018. № 184. 12 p. DOI:10.20948/prepr-2018-184-e
2. Шпатаковская Г.В. Подобие по атомному номеру *K*- и *L*-рентгеновских термов в многоэлектронных атомах //Письма в ЖЭТФ. 2018. Том 108, вып. 11, с.781-784. DOI:10.1134/S0370274X18230091