

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР

КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

ЗА 2008 ГОД

Москва 2009

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2008 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Москва 2009

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2008 г. / Под ред. В.А. Курнаева. М.: НИЯУ МИФИ, 2009. - 56 с.

Отчет кафедры физики плазмы МИФИ за 2008 год содержит краткое изложение основных результатов теоретических, расчетных, экспериментальных и технологических исследований и разработок, выполненных сотрудниками, аспирантами и студентами кафедры. Отчет содержит 6 тематических разделов: теория плазмы, разряды в газах, диагностика плазмы, взаимодействие ионов и плазмы с материалами, экспериментальные установки и приборы. В седьмом разделе приведены обзоры, представленные от кафедры на конференциях 2008 года. Приведены также сведения о составе кафедры, работах, опубликованных в журналах и доложенных на конференциях в 2008 году, перечень защищенных на кафедре дипломных работ и изданных учебных пособий. В приложениях и семинарах.

This annual report of the Plasma Physics Department (PPD) of Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI) for 2008 represents main results of theoretical, numerical, experimental and technological investigations obtained by faculty and scientific stuff as well as by students in 2008. The report consists of 6 topics: theory of plasma, gas discharges, diagnostics of plasma, plasma and ion interactions with matter and experimental devices and instruments. The seventh part contains reviews presented by Department members at conferences of 2008. The list of faculty and scientific stuff as well as the list of the publications and scientific presentations, list of master thesis's defended and books for students issued in 2008 are given. The short information on conferences held by Department in 2008 is also presented n supplement to the report.

Редакционная коллеги	я	
Председатель	-	Курнаев В.А.
Зам. председателя	-	Писарев А.А.
Научный секретарь	-	Когут Д.К.

ISBN 978-5-7262-1178-7

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРИЯ ПЛАЗМЫ

В.М. СМИРНОВ, С.Ф. ПЕРЕЛЫГИН, В.В. КОНДАКОВ Оценка перспектив преобразования энергии плазмы в электрическую в замкнутых магнитных повишках	5
М. М. ЦВЕНТУХ	
Конвективная устойчивость плазмы в бесстолкновительном кинетическом описании	6
М М ПВЕНТУХ	
Амбиполярный транспорт плазмы в области слабого поля вблизи сепаратрисы двухдипольной ловушки	7
В.М. ЖДАНОВ	
Расширенная неравновесная термодинамика многокомпонентных газовых смесей и плазмы	8
О.А. БАРЫШЕВ, Д.В. ГОРДИЕНКО, А.Н. ДОЛГОВ, Н.В. ЗЕМЧЕНКОВА, В.В. НАУМОВ,	
Д.Е. ПРОХОРОВИЧ	0
моделирование динамики токового канала обетрого 2-пинчевого разряда	9
РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ	
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. ШУКШИНА, И.А.ЩЕЛКАНОВ	
Исследование сильноточного импульсного магнетронного разряда в среде аргона с добавками химически активных газов	10
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, А.Ю. СОКОЛОВ, И.А. ЩЕЛКАНОВ,	
Т.В. ШУКШИНА, Д.В. МОЗГРИН	
Время распада плазмы импульсного магнетронного разряда большой мощности	11
О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.С. САВЕЛОВ	10
Исследование рентгеновского излучения низкоиндуктивной вакуумной искры	12
J.J.NHENU, A.U.UADEJIUD	

2.

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. ШУКШИНА, И.А.ЩЕЛКАНОВ	
Исследование сильноточного импульсного магнетронного разряда в среде аргона с добавками	
химически активных газов	10
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, А.Ю. СОКОЛОВ, И.А. ЩЕЛКАНОВ,	
Т.В. ШУКШИНА, Д.В. МОЗГРИН	
Время распада плазмы импульсного магнетронного разряда большой мощности	11
О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.С. САВЕЛОВ	
Исследование рентгеновского излучения низкоиндуктивной вакуумной искры	12
Д.Л.КИРКО, А.С.САВЁЛОВ	
Оптимизация излучательных характеристик факела капиллярного разряда	13
И.О. БЫКОВ, В.А. КУРНАЕВ, Д.А. НОВИКОВ	15
Корреляционный анализ плазменно-пылевых структур в ВЧ разряде емкостного типа	14
при различных частотах его возбуждения	1.
И.В. ВИЗГАЛОВ, К.М. ГУТОРОВ, Е.А. МАРКИНА	
Влияние тонких диэлектрических пленок на электронную эмиссию и устойчивость	
плазменно-поверхностного контакта	15
В.А. КУРНАЕВ, Д.Н.СИНЕЛЬНИКОВ, Н.В. ТАТАРИНОВА	10
Низкополевая эмиссия заряженных частиц	16
	10

3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

температурах

И.В. ИВАНОВ, Д.Б. ПЕТРОВ, А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. ШУКШИНА,	
И.А. ЩЕЛКАНОВ	
Определение параметров плазмы в импульсном магнетронном разряде большой мощности	17
В.А. КУРНАЕВ, В.А. УРУСОВ	
Анализ режимов работы спектрометров с предварительным замедлением	18
С.А. БОЙКО, Г.В. КРАШЕВСКАЯ, В.А. КУРНАЕВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, М.М. ЦВЕНТУХ	10
Быстрые электроны в ЭПР плазме низкого лавления, улерживаемой в двухлипольной довушке	
«Marheron»	10
A A MANUTUR DA CADEROD E A OPETROD EV CARAVYTRINOD RADUREDA	19
О.А.БАШУТИН, В.А.САВЕЛОВ, Е.А. СВЕТЛОВ, Г.А. САЛАХУТДИНОВ, И.А.ПИНЯЕВА	
Методы восстановления рентгеновского спектра по кривым ослабления	20

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ

А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, П.Д. ПЬЯНКОВ, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН, Н.Н. ТРИФОНОВ, А.А. ПИСАРЕВ

ТДС спектры дейтерия из вольфрама при ионном облучении

А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН, Н.Н. ТРИФОНОВ, А.А. ПИСАРЕВ,	21
Б.И. ХРИПУНОВ, J. ROTH, M. MAYER	
Захват дейтерия в графит МПГ-8 при высокодозном плазменном облучении и высоких	
температурах	22

А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН, Н.Н. ТРИФОНОВ, А.А. ПИСАРЕВ,	
S.LINDIG, J. ROTH, M. MAYER	
Образование пор в вольфраме под действием облучения ионами дейтерия 10 кэВ/D ³	22
Ю.М. I ACHAPHH, A.A. HИCAPEB, M. KASINSKI, M. MAYEK, J. KOTH	23
Блияние углеродных пленок на проницаемость водорода через вольфрам Ю М ГАСПАРДИ А А ПИСАРЕР М РАСІМСИ М МАУЕР І РОТИ	24
Ю.М. I АСПАГЛП, А.А. ПИСАГЕВ, М. KASINSKI, М. МАТЕК, J. КОТП Лефекты в вольфизме с высокой энергией связи волополя	24
И В ШВЕТКОВ А А ПИСАРЕВ Е Л МАРЕНКОВ	25
Проницаемость волорода через многослойные мембраны	23
Ю.М. ГАСПАРЯН. А.В. ГОЛУБЕВА, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАУЕВ, Ј. КОТН	26
Проницаемость водорода через вольфрам при ионном внедрении при высоких температурах	20
А.А. АЙРАПЕТОВ, Л. Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.А. КАМНЕВА, А.А.КУЗЬМИН,	27
Л.Н.ХИМЧЕНКО, П.А. ШИГИН	
Захват изотопов водорода в перенапыленные углеродные слои и углеродную пыль токамака	
T-10 и оценка удержания трития в ИТЭР.	28
А.А. АЙРАПЕТОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. КУЗЬМИН, Я.С. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН	
Удаление кислорода из CFC, облученного в дейтериевой плазме с примесью кислорода.	
Д.К. КОГУТ, Н.Н. ТРИФОНОВ	29
Моделирование изменения микрорельефа поверхности мишени при ионном облучении	•
К.А. МОШКУНОВ, К. ШМИД, В. ЯКОБ, АЛЬМУТ В., РУСИНОВ А.А., КУРНАЕВ В.А.	30
захват деитерия в ооронизированный вольфрам и в вольфрам, покрытый оксидом алюминия	21
I. Б.КРАШЕВСКАЛ, А.А ПИСАРЕВ, I. Б. АОДАЧЕПКО, И.А. ЩЕЛКАПОВ Исспедовация образнов проминитенной католной фольти, доработанных плагмой метолом	31
ятемно–силовой микроскопии	
В В ПЕСКОВ Н В ИСАЕВ В А КУРНАЕВ Е Г ШУСТИН	32
Исследование взаимодействия плазмы с непроводящей поверхностью в пучково-плазменном	52
разряде при слабом магнитном поле	
	33
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ	
Е.А.ГРИДНЕВА, Н.Н.КОБОРОВ, В.А.КУРНАЕВ, Н.А.МАМЕДОВ	
Реконструкция установки для исследования взаимодействия с поверхностью ионов с	24
энергиями до 40 кэВ	34
Д.К. КОГУ Г, В.А. КУРНАЕВ, С.А. КАМНЕВА Собителенией сонд или или или или полного допологодини в полифорийной области	
Собирающий зонд для изучения неитралов перезарядки в периферииной области токомоко Т 10	25
ВАКУРНАЕВИЛЕГОРОВЕАГРИЛНЕВАСФПЕРЕЛЬГИН	55
Сверхвысоковакуумный полвижный зонл Ленгмюра	
И.Л.КЛЫКОВ, В.А.КУРНАЕВ, В.В.ПЕСКОВ, Е.Г.ШУСТИН	36
Электронная пушка для плазмо-химического реактора на основе пучково-плазменного разряда	
	37
6.0Б3ОРЫ	
B.A.KYPHAEB	
Проблемы накопления трития в материалах ТЯР по итогам заседания международной	
группы экспертов по физике дивертора и пристеночного слоя в токамаках (DIV SOL	
ПРА) 7-9 января 2008 Авила, Испания	20
B.A.KYPHAEB	38
Основные итоги 14-го международного конгресса по физике плазмы в Фукуоке 8-12 сентяоря	
2008F. (ICPP2008)	40
7 ПРИПОЖЕНИЯ	40
Перечень трудов кафедры за 2008 год	
Дипломные проекты, защищенные студентами кафедры в 2008 году с присвоением	42
квалификации инженер-физик	
Список сотрудников и аспирантов кафедры	45
Именной указатель авторов работ	47
	48
Программа 11 семинара по взаимодействию плазмы с поверхностью	49
Программа VI Российского семинара «Современные методы диагностики плазмы и их	
примените для контроля веществ и окружающей среды»	53
праткое резюме семинара	34

1. ТЕОРИЯ ПЛАЗМЫ

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯЭНЕРГИИ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ В ЗАМКНУТЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ

В.М. СМИРНОВ, С.Ф. ПЕРЕЛЫГИН, В.В. КОНДАКОВ

В ранних исследованиях по проблеме рекуперации рассматривалось прямое преобразование кинетической энергии заряженных частиц, попадающих в конус потерь и покидающих открытые ловушки через магнитные пробки, в электрическую. Позднее появились исследования возможного применения рекуперации в замкнутых ловушках. Нами проведены качественные оценки эффективности основных методов рекуперации и возможности их использования в замкнутых ловушках.

Рассмотрим эти методы: 1) классический паротурбинный цикл с высокотемпературной МГД ступенью, КПД \approx 60%; 2) преобразование "светового" излучения в электрическую энергию, КПД \approx 20%; 3) "классическая" рекуперация - прямое преобразование кинетической энергии частиц, покидающих плазменный шнур, а также ионов на выходе инжектора быстрых нейтралов в электрическую энергию, КПД \approx 30-70%; 4) "индуктивная" рекуперация - получение индуктивных токов в витках, охватывающих расширяющуюся во внешнем магнитном поле плазму при $\beta\approx$ 1, КПД \approx 30%; 5) "аккумулирующая" рекуперация – использование излучения (и энергии частиц) для зарядки "аккумулирующих" сред, КПД \approx 30%.

Для метода 3, исходя из достигнутых в настоящее время времени $\tau_1 \approx 10^{-2}$ с удержания энергии ионов в шнуре плазмы в замкнутой ловушке и времени $\tau_2 \approx 4$ с удержания ионов в шнуре, можно заключить, что даже при рекуперации энергии ионов, покидающих шнур, с КПД=100% можно получить лишь долю $\tau_1/\tau_2 \approx 1/400$ энергии, затраченной на поддержание энергии ионов методами дополнительного нагрева (а при зажигании термоядерной реакции - α -частицами). То же самое касается и метода 4.

Основной поток энергии (~99,7%) из плазмы на вакуумную стенку переносится не частицами, а излучением - преимущественно в виде тормозного излучения электронов. Поэтому следует обратить внимание на повышение КПД классического цикла 1 (где каждый дополнительный процент КПД перекрывает все возможные 100% КПД в методах 3 и 4), а также на малоисследованные возможности методов 2 и 5 для рентгеновской части спектра излучения. В качестве одного из вариантов рекуперации энергии рентгеновского излучения можно было бы исследовать возможности "оже-рекуперации", используя эмиссию электронов пластинкой металла под воздействием рентгеновских квантов.

Для уменьшения нагрузки на элементы термоядерной установки можно усовершенствовать методы 3 и 4. В частности, для ловушки типа ДРАКОН можно использовать метод А.В. Тимофеева (рекуперация энергии ионов и электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях, где магнитное поле спадает в несколько раз по ходу потока плазмы, при этом используется магнитный дрейф частиц против электрического поля). Ловушка типа ДРАКОН состоит из двух пробкотронов, выходы которых соединены друг с другом КРЭЛами (криволинейными элементами). В простейшем варианте каждый из КРЭЛов состоит из трех полуторов, повернутых в месте стыка друг относительно друга на 120°. В одночастичном приближении дрейфовые поверхности ионов и электронов в ловушке типа ДРАКОН являются замкнутыми и охватывающими ось установки. Однако для частиц, захваченных в локальную магнитную яму в центральном полуторе КРЭЛа, магнитный дрейф не скомпенсирован, и эти ионы и электроны покидают шнур, высаживаясь на вакуумную камеру в районе локальной магнитной ямы. Именно для таких частиц представляется целесообразным применить метод рекуперации А.В. Тимофеева.

КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОМ КИНЕТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ СОГЛАСОВАННАЯ С РАВНОВЕСИЕМ ПРИ КОНЕЧНОМ ДАВЛЕНИИ

М. М. ЦВЕНТУХ

Разработаны численные алгоритмы для расчета равновесия плазмы, согласованного с ее конвективной устойчивостью в спадающем поле в ловушках большой кривизны в соответствии как с МГД, так и с (необходимым и достаточным) кинетическим критерием устойчивости. Для этого проведена модернизация численного кода ESPHIB [1], который был дополнен алгоритмом расчета конвективноустойчивого распределения в соответствии с кинетическим критерием Крускала-Обермана (см. [2]), а также алгоритмом расчета анизотропного равновесия плазмы.

Результаты расчетов показали, что достижение высокого давления плазмы в центре при конвективно-устойчивом равновесии ограничено либо расширением сепаратрисы (в случае протяженных участков со слабым полем), либо «филаментацией» градиентного плазменного тока (в случае малых участков со слабым полем, когда основное падение давления происходит вблизи сепаратрисы).

В ходе сравнения двух моделей установлено, что кинетическое описание конвективной устойчивости дает лучшие параметры удержания плазмы в ловушках со спадающим полем с позиции равновесия и появления непотенциальных баллонных мод, чем более простая МГД модель и позволяет еще более улучшить эти параметры при задании определенного вида анизотропии.

Для реальной магнитной геометрии ловушки Магнетор [3] в ходе расчетов конвективно-устойчивой равновесной конфигурации было определено наибольшее достижимое давление плазмы, которое составило $\sim 10^{15}$ зВ/см³ (значение бета $\sim 30\%$). Такое давление может быть создано в центральных областях ловушки при нагреве быстрых электронов за счет ЭЦР, при этом сохранится крупномасштабная конвективная устойчивость при конечном давлении плазмы. Отметим, что измеренное давление фоновой ЭЦР плазмы находится на уровне $\sim 10^{12}$ зВ/см³ [3].

Из измеренного распределения плотности фоновой ЭЦР плазмы в Магнеторе [3] была рассчитана анизотропия функции распределения. Согласно расчетам конвективной устойчивости с учетом этой анизотропии, критический по конвективной устойчивости градиент профиля давления может быть примерно вдвое выше, чем в случае изотропной плазмы. То есть, наибольшее давление плазмы, сосредоточенное в быстрой электронной компоненте, может быть выше, чем ~10¹⁵ эВ/см³.

Литература

- 1. Цвентух М.М. // Физика плазмы. 2007. Т.33. №7 С.591.
- 2. Арсенин В.В., Куянов А.Ю. // Физика Плазмы. 2001. Т.27. №8 С.675.
- G. V. Krashevskaya, V. A. Kurnaev, and M. M. Tsventoukh, Proc. of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic, P. 393.

АМБИПОЛЯРНЫЙ ТРАНСПОРТ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ СЛАБОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ СЕПАРАТРИСЫ ДВУХДИПОЛЬНОЙ ЛОВУШКИ

М. М. ЦВЕНТУХ

Рассмотрение распределения плотности фоновой плазмы, измеренного в ловушке Магнетор, показало, что, в целом, оно близко к конвективно-устойчивому: pU''=const (при $\gamma=1$, или $\gamma=5/3$) [1]. Отклонения определяются влиянием пробочных потерь на ряде силовых линий (проходящих через край бандажа внутренней катушки), транспортом плазмы, а также распределением источника плазмы.

В конфигурации Магнетора при помощи специально созданного кода Amdiff (Ambipolar Diffusive Flux) было рассчитано распределение плотности плазмы в предположении амбиполярной диффузии по Шоттки. Из рис. 1 видно, что рассчитанное диффузионное распределение (3) достаточно близко к $pU^{5/3}$ =const (2), в том числе и в слабом поле. При этом из сравнения с экспериментально измеренным распределением плотности (1) видно, что отклонения от pU^{γ} = const в основном можно описать в рамках простой амбиполярной диффузии при задании распределенного источника плазмы. В приведенных расчетах источник задан в точке минимума поля на одной из силовых линий (в точке r=11см, z=8см) (рис.1). В таких областях, как известно, могут наиболее эффективно генерироваться быстрые ЭЦР электроны. Близость измерений к диффузионной модели при таком задании источника может говорить о том, что: 1) быстрые ЭЦР электроны являются основным источником фоновой ЭЦР плазмы, 2) при более точном задании источников измеренное распределение может быть описано более точно.



Рис. 1. Слева – радиальные профили, проходящие через z = 9см: I – плотность плазмы n(r) – измерения при давлении 20мкТорр в Магнеторе, 2 – рассчитанный профиль плотности p_{mhd}/T_e (где $p_{mhd}U^{5/3}$ =const), 3 – рассчитанный в соответствии с амбиполярной диффузией. Справа – расчетное диффузионное распределение n(r,z)

Литература

1. G. V. Krashevskaya, V. A. Kurnaev, and M. M. Tsventoukh, Proc. of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic, P. 393.

РАСШИРЕННАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ И ПЛАЗМЫ

В.М.ЖДАНОВ

В последние годы при описании процессов переноса в различных физических средах предприняты успешные попытки [1-3] выйти за пределы применимости классической линейной неравновесной термодинамики (ЛНТ). Основная идея обобщения канонического подхода состоит в расширении числа переменных, описывающих неравновесное состояние системы. Помимо обычных классических переменных ЛНТ в качестве новых независимых переменных используются диссипативные потоки (например, поток тепла, тензор вязких напряжений, диффузионный поток и т.п.). В такой постановке локальная энтропия системы также оказывается функцией новых переменных, приобретают иной (обобщенный) вид выражения для плотности потока энтропии и производства энтропии, входящие в общее уравнение баланса энтропии. Существенно, что в отличие от классических переменных, которые подчиняются законам сохранения и меняются относительно медленно, потоки относятся к числу "быстрых" переменных и удовлетворяют дифференциальным уравнениям эволюционного типа. Реализация указанного подхода нашла свое выражение в построении так называемой расширенной необратимой термодинамики (PHT) которая развивалась главным образом для однокомпонентных систем.[1,2].

В настоящей работе рассматриваются вопросы кинетического обоснования расширенной неравновесной термодинамики (PHT) многокомпонентных газовых смесей и плазмы с использованием метода моментов Грэда при решении линеаризованного кинетического уравнения Больцмана.[3,4] Получены обобщенные выражения для плотности энтропии, потока энтропии и производства энтропии в зависимости от произвольного числа переменных состояния (моментов функции распределения). Рассмотрены различные варианты записи соотношений между потоками и термодинамическими силами в PHT, которые приводят к усложнению вида обобщенных термодинамических сил, включающих производные по времени и пространственные производные от диссипативных потоков. Проанализированы некоторые следствия и новые физические эффекты, вытекающие из полученных уравнений. Релаксационный характер этих уравнений позволяет, в частности, разрешить парадокс о бесконечной скорости распространения тепловых, сдвиговых и концентрационных возмущений в газовых смесях и плазме, вытекающий из обычных линейных законов ЛНТ. Показаны преимущества использования уравнений многокомпонентной диффузии и термодифузии в газах и плазме, записанных в обобщенной форме Стефана-Максвелла, по сравнению с обычно используемыми линейными соотношениями диффузии [5].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 06-01-00374а, № 06-01-00695а) и в рамках программы "Государственная поддержка ведущих научных школ" (НШ-397 2008-1).

Литература

1. I.Muller, T.Ruggeri., Extended Thermodynamics, New York, Berlin:, Springer-Verlag, 1992

 D.Jou, J.Casas-Vazquez, G.Lebon, Extended Irreversible Thermodynamics, Springer-Verlag, New-York, Berlin ,1993

3. Жданов В.М., Ролдугин В.И., ЖЭТФ, 2002, т.122, с.789-804.

4. Жданов В.М., Тирский Г.А. Прикладная математика и механика. 2003 , т.67, вып.3, с.406-433

5. Жданов В.М., Тирский Г.А. Прикладная математика и механика, 2007, т.71, вып.5, с.794-815

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТОКОВОГО КАНАЛА БЫСТРОГО Z-ПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА

О.А. БАРЫШЕВ, <u>Д.В. ГОРДИЕНКО</u>, А.Н. ДОЛГОВ, Н.В. ЗЕМЧЕНКОВА, <u>В.В. НАУМОВ</u>, Д.Е. ПРОХОРОВИЧ

Усилия подавляющего числа исследователей были связаны с изучением природы возникновения плазменной точки (ПТ) и ее излучательных характеристик в процессе "жизни". Динамика периферийной по отношению к ПТ плазмы исследована в меньшей степени. Нами исследовался импульсный разряд типа "низкоиндуктивная вакуумная искра (НВИ)", в котором при определенных условиях реализуется режим микропинчевания, сопровождающийся рождением уникального по своей природе объекта – ПТ.

Для получения наглядной информации о динамике плазмы и локализации области развития перетяжки в разряде НВИ создана оптическая схема теневого фотографирования межэлектродного промежутка. Теневое фотографирование области разряда НВИ осуществляется от момента инициирования разряда и до стадии развала плазменного образования при различной величине максимально достигаемого тока в разряде.

Вследствие специфики процессов, происходящих в межэлектродном промежутке, проследить за изменением параметров плазмы в режиме реального времени с помощью диагностической аппаратуры не представляется возможным. В среде Visual Studio на языке C# (sharp) написана моделирующая программа и составлена пользовательская документация к ней. Написанная программа обладает интуитивно понятным интерфейсом и наглядностью получаемых результатов. В ней реализованы все необходимые для экспериментатора функции: возможность задания параметров плазмы, учёт компонентов модели, пошаговое, мгновенное и автоматическое моделирование, сохранение результатов моделирования.

На основании экспериментальных данных по лазерной тенеграфии проведено моделирование динамики плазменного канала разряда НВИ.

Результаты моделирования показали, что помимо наблюдаемой в межэлектродном промежутке структуры присутствует и плазма более низкой плотности, не регистрируемая методом лазерного теневого зондирования. Именно эта плазма низкой плотности, обладающая отличной от нуля электрической проводимостью, способна обеспечить протекание в разрядном промежутке токов, регистрируемых в эксперименте.

В рамках проводимых исследований студентом группы К10-125 факультета кибернетики Гордиенко Д.В. успешно защищён дипломный проект «Разработка программного комплекса для моделирования динамики движения токоплазменной оболочки импульсного вакуумного разряда».

2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ АРГОНА С ДОБАВКАМИ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

Г.В.КРАШЕВСКАЯ, А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. ШУКШИНА, И.А.ЩЕЛКАНОВ

В МИФИ на кафедре «Физика плазмы» ведутся исследования двух новых импульсных форм разряда, которые перспективны для использования в качестве технологии нанесения покрытий, из-за расширяющегося круга задач и повышения требования качеству создаваемых.

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде ПИНЧ [1]. Целью проводимых экспериментов было получение покрытия TiN на алюминиевой фольге. Был проведен поиск устойчивых режимов горения разряда при варьировании амплитуды напряжения импульса питания, давления и состава рабочей среды, величины и конфигурации магнитного поля. Непрерывно проводился контроль характера течения разряда.

В качестве рабочих газов использовался аргон Ar и молекулярный азот N₂. При напылении в среде аргона Ar уменьшается вероятность образования дуги и снижаются негативные факторы её воздействия. Добавление же активного газа увеличивает вероятность формирования дуги и может привести к "прожиганию" катода и анода в точках привязки дуги.

Установка предварительно откачивалась до давления (воздуха) 10^{-4} Тор, после этого в камеру напускался молекулярный азот N₂ до давления 10^{-3} Тор, и далее добавлялся аргон Ar до рабочего давления $8 \cdot 10^{-3}$ Тор (значение дано без переводного коэффициента, т.е. для воздуха). Менялось напряжение стационарного магнетронного разряда, служащего для создания предварительной ионизации, и снимались соответствующие ему вольт-амперные характеристики разряда.

В результате проведенного эксперимента был подобран стабильный режим сильноточного импульсного магнетронного разряда, реализующийся при напряжении стационарного разряда U_{стац} = 340B, и характеризующийся напряжением горения разряда U_{разряда}=1100B и током I_{разряда} = 43A.

В найденном режиме была проведена серия экспериментов по осаждению на алюминиевую фольгу толщиной 30мкм нитрида титана TiN. Эксперимент имел своей целью определение толщины и скорости осаждения данного покрытия. Покрытие наносилось в течение ста токовых импульсов, длительность которых была ограничена 20мс. В процессе всего времени напыления проводился контроль формы и характеристик разряда.

Толщина и скорость осаждения нитрида титана оценивались косвенным способом по разнице массы образцов до и после осаждения покрытия. Взвешивание образцов производилось при помощи прецизионных весов, погрешность измерения которых составляет 0,05мг.

Толщина наносимого покрытия согласно сделанным оценкам по данной формуле толщина покрытия за 100 токовых импульсов составила в среднем (0,17±0,02) мкм.

При этом импульсная скорость осаждения покрытия составила 4 мкм/мин. При пересчете на среднюю скорость напыления, например, с частотой следования импульсов 25Гц и скважностью 2 она составляет 1 мкм/мин, что почти на 2 порядка выше типичной скорости напыления стационарным магнетронным разрядом.

Работа выполнена в рамках проведения научно-исследовательских работ по государственному контракту № 02.527.12.9009, заключенному между Федеральным агентством по науке и инновациям и Закрытым акционерным обществом "Специальное Конструкторско-Технологическое Бюро КАСКАД" в целях реализации мероприятий федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (договор с ЗАО «СКТБ КАСКАД» № 87-3-021-219)

Литература

[1] D.V. Mozgrin, I.K. Fetisov, G.V. Khodachenko // High-current low-pressure Quasi-Stationary discharge in a magnetic field: experimentals results// Plasma Physics reports, vol.21, №5, 1995 pp.400-409

ВРЕМЯ РАСПАДА ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, Г.В. ХОДАЧЕНКО<u>, А.Ю. СОКОЛОВ</u>, И.А. ЩЕЛКАНОВ, Т.В. ШУКШИНА, Д.В. МОЗГРИН

Для осуществления перевода данного вида разряда в импульсно периодический режим для технологического применения необходимо выбрать оптимальный частотный режим, предельная частота следования импульсов которого определяется временем распада плотного плазменного образования. На рис.1 представлена упрощенная схема установки импульсного магнетронного напыления, Создание сильноточного разряда в системе производиться путём приложения импульса напряжения на разрядное устройство, заполненное предварительно созданной плазмой низкой плотности. Начальная концентрация плазмы в разрядном устройстве составляет $n = 10^7 \div 10^9$ см⁻³. Источником предионизации является стационарный магнетронный разряд. Наличие предварительной ионизации промежутка не является обязательным, однако вероятность перехода в дуговой режим в случае ее отсутствия возрастает. В качестве разрядного устройства используется планарный магнетрон, который состоит из: плоского катода, являющегося корпусом магнетрона и кольцевого анода. Магнитное поле на поверхности катода создаётся магнитной системой состоящей из кольцевого постоянного магнита и магнитопровода. Величину магнитного поля на поверхности катода можно регулировать в пределах 400÷1000 Гс посредством продольного перемещения магнитной системы.





Рис.2. Зависимость времени распада плаз мы от мощности разряда

Для определения времени распада плазмы использовался двойной зонд Ленгмюра в режиме ионного насыщения. Время распада плазменного образования измерялось по изменению ионного тока насыщения на зонд после прекращения импульса разряда.

Время распада плазмы уменьшается с ростом мощности разряда, но до величины не меньше 15 мкс, а также то, режимы большой мощности на смеси рабочих газов, в которой содержание азота превышает 50%, труднодостижимы

Сравнение времени затухания тока в цепи питания импульсного магнетронного разряда и времени распада плазмы в разрядном промежутке (рис.2) показывает, что время распада плазмы больше переходных процессов в цепи, что свидетельствует о наличии плазмы уже после выключения питания разряда. С учетом этого явления эффект уменьшения времени существования плазмы в разрядном промежутке, можно объяснить тем, что при значительной мощности, вкладываемой в разряд и резком выключении напряжения питания импульсного разряда, происходит отрыв плазменного образования от поверхности катода как целого.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.С. САВЕЛОВ

Существенную роль в получении информации о параметрах плазмы играет исследование собственного рентгеновского излучения разряда, его спектральных и энергетических характеристик. При проведении спектроскопических исследований пинчующихся разрядов, как правило, полагается, что основным источником рентгеновского излучения являются так называемые «плазменные точки» - локальные области разряда размером ≤ 50 мкм, временем жизни ≤ 100 нс и концентрацией электронов до 10^{22} см⁻³, хорошо выделяющиеся на рентгеновских обскурограммах разряда. Известно, что в разрядах типа низкоиндуктивной вакуумной искры за один импульс может формироваться до нескольких плазменных точек вдоль оси разряда. Кроме того, имеет место существенный разброс в пространственном положении точек от разряда к разряду. Все это затрудняет использование такого типа разрядов в технологических целях, где важна стабильность как параметров, так и пространственого положения источника.

Проведены исследования пространственного распределения источников рентгеновского излучения из низкоиндуктивной вакуумной искры по спектрам гелиеподобных ионов железа FeXXV, традиционно используемых для определения параметров плазмы. Исследования проводились на микропинчевой установке Зона–2. Катод представлял собой плоский стальной цилиндр диаметром 20 мм с 3 мм отверстием посередине, анод – стальной стержень диаметром 3 мм, заостренный на конце. Расстояние между электродами составляло 5 мм. В качестве накопителя использовалась конденсаторная батарея емкостью 20 мкФ, заряжаемая до напряжения $U_0=10$ - 15 кВ. Максимальный ток разряда достигал 150 кА при периоде разряда 8,5 мкс. Инициирование разряда производилось триггерными разрядниками, расположенными радиально в 25 мм от оси разряда.

Для регистрации спектра рентгеновского излучения использовались фокусирующие спектрографы ФСПР-1Д/ФСПР-2Д, собранные по схеме Иоганна с пространственным разрешением. В качестве диспергирующего элемента использовался кристалл слюды, изогнутый по сферической поверхности радиусом 150 мм. Спектрографы располагались с противоположных сторон вакуумной камеры таким образом, что плоскость дисперсии одного была параллельна, а второго перпендикулярна оси разряда.

Обнаружено существенное изменение интенсивности диэлектронного сателлита резонансной линии *j* ($1s2p^{2} {}^{2}D_{5/2} - 1s^{2}2p {}^{2}P_{3/2}$) по отношению к интенсивности резонансной линии *w* ($1s2p^{1}P_{1} - 1s^{2} {}^{1}S_{0}$) при изменении ориентации плоскости дисперсии кристалла спектрографа. Сделан вывод об анизотропии электронного распределения по скоростям. Проведен анализ изменения интенсивности спектральных линий гелиеподобных ионов железа в зависимости от положения источника излучения. Выделены локализованные области размером менее 100 мкм с высокими значениями электронной плотности и температуры. Произведена оценка электронной концентрации по отношению резонансной *w* и интеркомбинационной *y* линий и температуры по отношению резонансной линии к ее диэлектронному сателлиту *j*. Установлено, что максимальная электронная концентрация N_e ~ 10^{21} см⁻³ и температура T_e ~ 1,5 кэВ достигается на расстоянии около 1 мм от анода. Подтверждена зависимость максимальных параметров, достигаемых при пинчевании от начальной линейной плотности плазмы, соответствующая модели радиационного сжатия.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАКЕЛА КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА

Д.Л.КИРКО, А.С.САВЁЛОВ

Плазменный факел капиллярного разряда является интенсивным источником электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра. Для проведения научных и практических исследований требуются источники излучения с перестраиваемой интенсивностью в зависимости от диапазона излучения. Было изучено изменение спектрального состава и угловой расходимости излучения факела при изменении состава электродов и материала диэлектрика, из которого изготовлен капилляр.

Плазма в данном устройстве формируется при разряде в капилляре при атмосферном давлении. Параметры разряда: ток I = 100 - 150 A, длительность импульса тока $\tau = 6 - 10$ мс, зарядное напряжение U = 200 - 300 B, энергия конденсаторной батареи E = 50 - 150 Дж. После срабатывания установки возникает протяженное свечение (длина l = 10 - 15 см, диаметр d = 2 - 4 см), обладающее собственной токовой и излучательной структурой – факел [1]. Для структуры факела характерны четыре излучательные области. При диэлектрике из оргстекла ($C_2H_8O_3$), графитовом катоде и медном аноде излучение наиболее интенсивных ионов факела: СШ, ОШ, NII сосредоточено в области капилляра (длина l = 3-4 мм, диаметр d = 1-2 мм, температура и концентрация плазмы $T \approx 8500$ K, $n_e \approx 6,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³). Более низкотемпературная приосевая область (длина l = 3-5 см, диаметр d = 2-3 мм) содержит также атомы HI, CI, OI, а в периферийных областях присутствует также излучение молекул C₂ и CN. Временная регистрация интенсивности спектральных линий осуществлялась с помощью малогабаритного монохроматора МУМ.

При использовании в качестве диэлектрика нитрида бора (BN) с примесью алюминия (около 1%) в спектре капиллярного разряда появляется ряд интенсивных линий: All, FeI и CuI. Было установлено, что линии AlI 308,2 и 309,2 нм, 394,4 и 396,1 нм испытывают значительное уширение величиной до $\Delta\lambda_{max} = 0,4$ нм. Величина уширения варьируется вдоль оси факела в диапазоне $\Delta\lambda=0,05-0,4$ нм. При исследовании контура данных линий было обнаружено, что центр линий является самообращенным и содержит впадину. Возникновение этого эффекта связано с большой оптической толщиной плазмы для данных длин волн алюминия [2]. В спектре разряда при использовании медного анода появляются интенсивные линии: CuI 324,7 и 327,3 нм, FeI 358,1 и 380,5 нм, а для латунного анода линии: ZnI 328,2 и 334,5 нм, FeI 291,8; 307,5; 310,0; 323,0 нм. Вольтамперные характеристики капиллярного разряда проявляют зависимость от содержания в плазме легкоионизуемых примесей.

В работе были получены энергетические характеристики излучения факела в зависимости от параметров разрядного устройства. Была измерена зависимость интегральной энергии излучения от диаметра капилляра (d=0,5-4 мм). Для измерений применялся болометр и широкополосной светофильтр, и максимальное значение энергии составило $E = (1,8 \pm 0,2)$ мДж. Полученная зависимость является практически линейной. Также были измерены угловые распределения интегрального излучения при различных диаметрах капилляра. На данных зависимостях излучение сконцентрировано в пределах $\alpha = 10 - 30^0$, при максимальном значении (на оси факела) $E = (0,67 \pm 0,04)$ мДж/град.

В данных исследования было показано, что при варьировании материала диэлектрика и электродов разрядного устройства капиллярного разряда регистрируется ряд интенсивных линий в ближнем ультрафиолетовом диапазоне спектра. Изменение диаметра капилляра позволяет достичь оптимальной угловой направленности излучения.

Литература:

1. Димитров С.К., Жданов С.К., Кирко Д.Л. Определение концентрации, температуры и структуры импульсного плазменного потока // Сиб. физ.-тех. журн., 1992, вып.2, с.57-60.

2. Коуэн Р., Дике Ж. Самопоглощение спектральных линий. В кн.: Оптическая пирометрия плазмы (Ред. Соболев Н.Н.), М: Изд. иностр. литер., 1960, с.83-112.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В ВЧ РАЗРЯДЕ ЕМКОСТНОГО ТИПА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ ЕГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

И.О. БЫКОВ, В.А. КУРНАЕВ, Д.А. НОВИКОВ

Разработана методика получения и исследования парных корреляционных функций g(r) плазменнопылевых структур из цифровых снимков плазмы ВЧ емкостного разряда. Для вычисления g(r) использовалась программа "Stochastic Geometry". Перевод снимков структуры в оцифрованный вид, осуществлялся при помощи кода, разработанного в среде MatLab. Эксперименты с разным давлением в камере и частотой ВЧ разряда, показала, что структура пылевого облака зависит от частоты ВЧ поля (рис.1,2)





Рис. 1 Парная корреляционная функция для частиц в плазме, возбуждаемой на частоте 2,4

Рис. 2. Парная корреляционная функция для частиц в плазме, возбуждаемой на частоте 13,56

Если на частоте 2,4 МГц получаемая структура является скорей неким подобием жидкости с кластерами (структурами кристаллической формы), то на частоте 13,56 МГц g(r) имела вид типичный для кристаллических структур.

Для определения воздействия, какое может быть оказано на характер поведения пылевых частиц в плазме ВЧ разряда, был сконструирован и собран блок модуляции ВЧ напряжения разряда, позволяющий формировать прямоугольные импульсы с дискретно изменяемой частотой в диапазоне от 0,1 до 1 кГц и скважностью от 0 до 90%.

Проведенные эксперименты показали, что в указанном диапазоне частот модулирующих импульсов увеличение их скважности приводит к увеличению степени упорядоченности пылевой структуры, а также к уменьшению среднего межчастичного расстояния и количества частиц, удерживаемых в разряде. Это объясняется уменьшениям средней вкладываемой в разряд мощности и уменьшением кинетической энергии пылевых частиц. Фотографии частиц до и после включения модуляции приведены на (рис. 3) и (рис. 4) соответственно.



Рис.3. Фрагмент структуры до включения модуляции



Рис. 4. Фрагмент структуры после включения модуляции. Скважность импульсов 50%.

Таким образом, включение модуляции ВЧ напряжения разряда способно влиять на характер поведения частиц и на степень упорядоченности образуемых ими структур. Такое воздействие не является локальным и влияет на всю структуру в целом. Таким образом, воздействие модулирующих импульсов, может приводить – в зависимости от параметров импульсов – как к стабилизации, так и к дестабилизации структуры как целого. Для локального воздействия на фрагменты пылевого кристалла такой способ не подходит.

ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ЭЛЕКТРОННУЮ ЭМИССИЮ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЕННО-ПОВЕРХНОСТНОГО КОНТАКТА

И.В. ВИЗГАЛОВ, К.М. ГУТОРОВ, Е.А. МАРКИНА

Неустойчивость электрического контакта между неравновесной плазмой и поверхностью с повышенной вторично-эмиссионной способностью может проявляться в автогенерации мощных как регулярных, так и стохастических электромагнитных колебаний, а также отдельных высоковольтных импульсов в приповерхностном слое объемного заряда. Соответствующие условия могут возникать во многих газоразрядных системах низкого давления, в периферийной области магнитных ловушек, в том числе и при проведении зондовых измерений. С динамическими по вторично-эмиссионному механизму дебаевскими слоями (ДС) могут быть связаны некоторые особенности аномальных переносов и значительное увеличение (на порядки величины) мгновенного значения падения потенциала в приэлектродном слое по сравнению с его усредненным значением или значением, характерным для стационарного ДС. Данные о толщине, составе и структуре эмиссионных пленок представляют большой интерес и могут внести существенный вклад в понимание эффекта неустойчивого протекания тока через ДС. Особо высокими вторично-эмиссионными характеристиками обладают тонкие диэлектрические пленки.

Были исследованы три типа таких пленок: пленка окисла на поверхности чистого алюминия, пленка окисла на поверхности алюминиевого сплава Д16 и пленка двуокиси кремния на поверхности стали X18H10T. Использование SiO₂ удобно в связи с инертностью кремния, в отличие от алюминия, к окислению на воздухе при низких температурах.

Пленки формировались следующим образом. Подложка, представляющая собой круглую пластину толщиной 3 мм и диаметром 56 мм, закреплялась в охлаждаемом водой коллекторном устройстве на торцевом фланце установки. Поверхность подложки очищалась аргоновой плазмой пучково-плазменного разряда (ППР). Пленки оксида на алюминии и сплаве Д16 появлялись в водородной плазме за счет кислорода, присутствующего в фоновом газе (концентрация на уровне 1%). Индикатором формирования пленки служило появление высокочастотных колебаний в цепи коллекторного устройства, на которое подавалось отрицательное смещение от внешнего источника питания. Для получения пленки оксида кремния в аргоновую плазму вводился кусочек кварца, и подавалось отрицательное смещение на коллекторный узел. Оксид кремния переосаждался в течение 15–20 мин, после чего кварц выводился из плазмы. Далее пленка стравливалась аргоном до требуемой толщины, индикатором также служило появление колебаний в цепи коллекторного устройства. Подготовленные описанным способом образцы с пленкой на поверхности способны стабильно работать в качестве холодных катодов в разрядах на водороде с возбуждением автоколебаний. Распыление и восстановление оксидных пленок компенсируются окислением за счет фонового кислорода.

Был проведен топологический анализ поверхности с помощью растрового электронного микроскопа. Химический состав приповерхностного слоя мишени определялся методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа. С использованием данных микроанализа оценивалась толщина пленок. Результаты исследований показали, что автоколебания возникают в присутствии очень тонких пленок (всего 3 – 5 нанометров), что значительно меньше пробега высокоэнергетичных плазменных электронов. Это указывает на полевую природу эмиссии. Пленки толщиной десятки и сотни нанометров не приводят к возникновению регулярных автоколебаний, но могут пробиваться с образованием кратеров и генерацией пылевых микрочастиц.

НИЗКОПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В.А. КУРНАЕВ, Д.Н.СИНЕЛЬНИКОВ, Н.В. ТАТАРИНОВА

Известно, что в установках типа токамак между плазмой и первой стенкой образуется дебаевский слой, напряженность электрического поля в котором может достигать 10⁴ В/м [1]. Ранее [2] было установлено это поле намного меньшее, чем поле, при котором наблюдается полевая (автоэлектронная) эмиссия, может вызвать эмиссию заряженных частиц в плазму, что приведет к изменению её свойств.

Измерение низкополевой эмиссии токов проводилось в разборной стеклянной колбе, которая подсоединяется к вакуумному посту с помощью сильфонного узла, который позволяет изменять расстояние между электродами в диапазоне от 0 до 6 мм, с точностью 0,01мм. Предварительная откачка проводилась двумя цеолитовыми насосами, а для получения безмасляного высокого вакуума использовались магниторазрядные насосы НЭМ-100 и НОРД-1.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) для вакуумного промежутка в 2мм для графита МПГ-8 (рис.1) показывают, что после 5 дней выдержки в остаточном вакууме порядка 10⁻¹торр эмиссионный ток увеличивается. Кривая *1* получена сразу после откачки образца с атмосферы. Выдержка в остаточном





Рис.1. ВАХ графита МПГ-8 после различной выдержки: 1 – сразу после первой откачки, 2, 3 – через неделю при выдержке при давлении ~10⁻¹ Торр, вакуумный промежуток 2 мм

Рис.2. ВАХ СС композита с добавками кремния после различной выдержки: 1,2 – при давлении 5·10⁻⁶ Торр сразу после первой откачки, 3 – через сутки при выдержке при давлении ~2·10⁻¹ Торр

вакууме, похоже, позволила обезгазиться образцу до более оптимального для процессов резонансной десорбции давления в порах, что и привело к увеличению тока спустя неделю (кривые 2 и 3).

Исследования эмиссионных способностей СС композита с включениями кремния дают на 3 порядка большие эмиссионные токи (рис.2). Характеристики 1 и 2 сняты при давлении P=5*10⁻⁶ Торр сразу после откачки с атмосферы (20 мин) при подъеме(1) и снятии(2) напряжения. Кривая 3 снята после суточной выдержки в остаточном вакууме 2*10⁻¹ сразу после откачки до 2*10⁻⁵. В течении получаса ток (~20 мкА) при 6 кВ оставался стабильным.

Для определения состава эмиссионного тока был поставлен эксперимент с вторично-эмиссионным умножителем и магнитным полем ~100 Гс, создаваемым постоянными магнитами на пути эмиссионного тока.. При такой напряженности радиус ларморовской окружности для электронов порядка сантиметра, и будучи эмитированными с катода они не могут достичь ВЭУ, в то время как ларморовский радиус для ионов составляет несколько десятков сантиметров. Т. е. на ВЭУ должны дойти только отрицательные ионы. При разности потенциалов в 6 кВ ток и суммарном токе на анод порядка 5 мкА, на первом диноде, установленным позади малого отверстия в аноде ток на ВЭУ составил порядка 0.6 нА. При снятии напряжения с вакуумного промежутка ток ВЭУ исчезал. Это доказывает, что одной из составляющих эмитируемого катодом тока являются отрицательные ионы.

Литература

- 1. V. A. Kurnaev, N.V.Tatarinova, J.Nucl.Mater. 220-222 (1995) p.939-942;
- 2. Н.В.Татаринова, Вакуумная техника и технологии, т.13, №1 (2003) С.3-29

3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

И.В. ИВАНОВ, Д.Б. ПЕТРОВ, А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. ШУКШИНА, И.А. ЩЕЛКАНОВ

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде сильноточного импульсного магнетронного напыления «ПИНЧ». Целью проводимых экспериментов было определение электронной температуры и концентрация заряженных частиц в прикатодной области планарного магнетрона во время импульса мощного разряда.

Для измерений использовался одиночный плоский зонд с импульсной системой развертки напряжения на зонде. Зонд располагался на расстоянии 20 мм от поверхности катода в области максимально яркого свечения плазменного образования стационарного магнетронного разряда, используемого для предварительной ионизации разрядного промежутка. В точках измерения индукция магнитного поля не превышала 100Гс.

С помощью цифрового осциллографа Tektronix 2014 регистрировались осциллограммы тока и напряжения, которые сохранялись в электронном виде для дальнейшей обработки на компьютере. По полученным данным стоились вольтамперные характеристики призондового слоя, по которым оценивались плотность плазмы и электронная температура. Эксперименты проводились в среде аргона с титановым катодом. Погрешность определения температуры составила ~50%. Погрешность в расчете абсолютных значений концентрации ~20%.

Поскольку в плазме присутствуют ионы титана (материал катода) и аргона (рабочий газ) бралась средняя для них масса аргона, т.к. в случае если металлических ионов больше чем ионов аргона происходит переход разряда в дуговой режим.

На рисунках 32а и 32б, в качестве иллюстрации, приведены графики зависимости электронной температуры T_e и плотности плазмы N_e в зависимости от мощности импульсного магнетронного разряда.



Рис.1а,б. Изменение параметров плазмы в зависимости от мощности импульсного магнетронного разряда: а) электронной температуры T_c ; б) плотности плазмы N_c

Из анализа проведенныъх экспериметов можно сделать следующие выводы:

- 1. Плотность плазмы может быть получена в диапазоне 10¹⁰-10¹³ см⁻³ в зависимости от мощности разряда.
- 2. Наблюдается высокая степень ионизации, что подверждается спетральной диагностикой
- 3. Электронная температура в в зависимости от мощности разряда и области измерения находится в диапазоне 1-10 эВ.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СПЕКТРОМЕТРОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ЗАМЕДЛЕНИЕМ

В.А. КУРНАЕВ, В.А. УРУСОВ

Большинство современных электростатических спектрометров снабжены системой предварительного замедляющий потенциал линейно связаны (режим постоянного фактора торможения - ПФТ); во втором, энергия настройки дисперсионного анализатора фиксирована, а развертка спектра осуществляется изменением замедляющего потенциала (режим постоянной энергии пропускания - ПЭП). Для режима ПЭП ряд фирм-производителей утверждает, что интеграл от аппаратной функции обратно пропорционален энергии настройки спектрометра [1]. Однако существует большое количество экспериментальных работ [2] в которых показано, что это утверждение не соответствует действительности. В настоящей работе исследовалось влияние предварительного замедления в электростатических спектрометрах на связь между функцией распределения частиц по энергии и сигналом на выходе спектрометра. Простейшая модель спектрометра с предварительным замедлением представляет собой систему торможения (две-три диафрагмы с круглыми отверстиями) и дисперсионный анализатор (Рис. 1). В этой модели аппаратную функцию (функцию пропускания) системы торможения можно найти как отношение телесных углов частиц, прошедших через диафрагмы при тормозящем потенциале U и нулевом тормозящем потенциале и, используя результат работы [3], получить приближенное уравнение

$$I(U,U_1) \approx f(W) \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{1 - qU/W}\right)^2}{4} \cdot C \cdot qU_1$$

где C = const, $W = qU + kqU_1$ - энергия настройки.

Результаты теоретического моделирования сравнивались с результатами, полученными с помощью программы Simion 3D (Рис.2). Получено хорошее качественное и количественное соответствие при малых размерах отверстий и, соответственно, малом провисании потенциала.



Рис.1. Геометрическая модель дисперсионного спектрометра с системой предварительного замедления: 1 - входная диафрагма, 2 - первая коллимирующая диафрагма, 3 - вторая коллимирующая диафрагма, 4 - дисперсионный анализатор, 5 - выходная диафрагма, 6 - детектор.



Рис.2. Зависимость функции пропускания системы предварительного замедления от тормозящего потенциала: 1 - Simion 3D после первой коллимирующей диафрагмы; 2 - Simion 3D после второй коллимирующей диафрагмы; 3 - теоретическая модель;

4 - $(1 - qU/E_0)^{0.4}$ аппроксимация эксперимента [2]; 5 - $(1 - qU/E_0)^{0.5}$ аппроксимация эксперимента [4]; 6 - $(1 - qU/E_0)$ согласно закону Гельмгольца-Лагранжа.

Литература

[1]. Y.M. Cross and J.E. Castle// J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1981. 22. p.53

- [2] M. Scharli and J. Brunner// J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1983. 31. p.323
- [3] Курнаев В.А., Урусов В.А. // ЖТФ. 1997. т.67. №6. с.86
- [4] J.E.Castle and R.H.West // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 1980. 19. 409

БЫСТРЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ЭЦР ПЛАЗМЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ УДЕРЖИВАЕМОЙ В ДВУХДИПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ МАГНЕТОР

С.А. БОЙКО, Г.В. КРАШЕВСКАЯ, В.А. КУРНАЕВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, М.М. ЦВЕНТУХ

Исследования концептуальных магнитных ловушек дипольной конфигурации представляют значительный интерес благодаря возможности реализации на их основе стационарного термоядерного реактора с перспективными топливными циклами – D-3He и D-D [1]. Устойчивость плазмы относительно конвективных возмущений достигается в них в отсутствии минимума поля плавным спадом давления наружу [2]. Интерес конфигураций окруженных магнитной сепаратрисой в том, что, согласно теории [2], на сепаратрисе можно иметь нулевое давление без потери конвективной устойчивости (то есть плазма в простой осесимметричной стационарной конфигурации может быть оторвана от стенок).

Двухдипольная ловушка «Магнетор» была создана именно для экспериментального исследования удержания плазмы в спадающем поле – в компактной конфигурации, окруженной сепаратрисой при самосогласованном поддержании конвективно-устойчивого профиля давления. С помощью заполнения ловушки плазмой электрон циклотронного разряда (ЭЦР) при низком давлении рабочего газа экспериментально была продемонстрирована значительная локализация плазмы сепаратрисой – перепад плотности из центра к периферии (к сепаратрисе) превышал 20 крат [3]. Максимальная плотность плазмы ~(2-3)·10¹¹ см⁻³, температура электронов фоновой плазмы примерно 10эВ. Для ЭЦР плазмы при низком давлении газа характерна генерация быстрых электронов с энергией до нескольких сотен кэВ. При этом вклад горячей группы электронов в плазменное давление может являться определяющим. Так в ЭЦР экспериментах с левитирующим диполем LDX быстрые электроны обеспечивали локальное плазменное бета более 20% [4].

В настоящей работе проводились исследования генерируемой ЭЦР горячей электронной компоненты в «Магнеторе» по тормозному излучению из плазмы. Для регистрации тормозного излучения применялись рентгеновские фотопленки (РФ) и термолюминесцентные детекторы (ТЛД) из LiF. Были проведены исследования спектра рентгеновского излучения при помощи метода серых фильтров (Al фольги толщиной 10 ÷ 400 мкм), а также исследования пространственной структуры источника излучения при помощи камеры-обскуры и специальных коллимационных систем. На рисунке 1 представлен полученный методом эффективных энергий спектр быстрых электронов. На рисунке 2 представлена результат облучения рентгеновской фотопленки с помощью камеры-обскуры, установленной на оси установки.



Рис.1. Энергетический спектр быстрых электронов



Рис.2. Обскурограмма

Анализ спектра показал присутствие быстрых электронов с энергией вплоть до 20кэВ, при этом двухтемпературная аппроксимация рентгеновского спектра дает значения $T_{e,hot,1} \approx 2$ кэВ и $T_{e,hot,2} \approx 6$ кэВ. Исследования пространственно структуры источника рентгеновского излучения (рис.2) показали, что быстрые электроны локализованы в кольцевой области, в центре ловушки.

Работа выполнена в рамках работ по государственному контракту №Н.4д.47.03.08.153

Литература

- [1]. J. Kesner, D.T. Garnier, A. Hansen, M.Mauel and L. Bromberg // Nucl. Fusion 44 (2004) 193
- [2]. Кадомцев Б.Б. // Физика Плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. М.: изд-во АН СССР, 1958. Т. 4. С.353
- [3]. G. V. Krashevskaya, V. A. Kurnaev, and M. M. Tsventoukh // Proc. of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic, P. 393
- [4]. D.T. Garnier, A. Hansen, M.E. Mauel, E. Ortiz, A. C. Boxer, J. Ellsworth, I. Karim, J. Kesner, S. Mahar, and A. Roach // Phys. Plasmas 13, 056111 (2006)

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА ПО КРИВЫМ ОСЛАБЛЕНИЯ

О.А.БАШУТИН, В.А.САВЕЛОВ, <u>Е.А. СВЕТЛОВ,</u> Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, <u>И.А.ПИНЯЕВА</u>

Спектры рентгеновского излучения плазменных объектов позволяют получить информацию о параметрах плазменного объекта. Поэтому точность восстановления спектра по результатам измерения с помощью различного типа датчиков важна для определения истинного распределения частиц в плазме. Основные методы измерения рентгеновского излучения основаны на спектральной селекции первичного излучения (метод «серых» фильтров, метод фильтров Росса и т.д.). В методе «серых» фильтров измеряется поглощенная энергия импульсного рентгеновского излучения в детекторе за фильтрами различной толщины из различных материалов.

Восстановление спектра может проводиться несколькими математическими методами [5] и основаны на математической обработке кривой ослабления, представляющей собой зависимость энергии J(x) излучения, прошедшей сквозь фильтр, от толщины данного фильтра x и полностью поглощенной в детекторе:

$$J(x) = \int S(E) \cdot \varphi(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot x) \, dE \,, \tag{1}$$

где S(E) – спектральная характеристика детектора; $\varphi(E)$ – искомый спектр; $\mu(E)$ – коэффициент ослабления излучения в фильтре. Уравнение (1) является уравнением Фредгольма 1-го рода относительно функции $\varphi(E)$. Оно относится к классу некорректно поставленных задач, когда незначительные флуктуации измеряемой величины J(x) могут вызвать существенные изменения $\varphi(E)$. Функция J(x) называется кривой ослабления, ее значения измеряются детекторами в каждом канале спектрометра.

Из уравнения (1) видно, что точность его решения зависит от взаимонезависимых параметров, заранее определенных и не изменяющихся в ходе эксперимента. Использование фильтров поглощения из различных материалов (Be, Al, Cu, Pb) позволяло использовать особенности К-скачков поглощающих фильтров по методу фильтров Росса, а также учитывая, что кривая поглощения для различных материалов характеризуется различной крутизной спада в зависимости от энергии квантов, существенно расширить спектральную область исследуемого излучения. Восстановление спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы в ряде работ [1,2] осуществлялось по следующему алгоритму:

- методом фильтров Росса определяли интенсивности рентгеновского излучения в области К-скачков поглощающих фильтров;
- методом эффективных энергий проводилось разложение импульсного рентгеновского излучения на ряд моноэнергетических компонент с присущей ей интенсивностью;
- зная качественный ход спектра, полученного из первого и второго пунктов, находили решение уравнения (1) методом математического моделирования физического процесса методом Монте-Карло.

Данный метод восстановления спектров импульсного рентгеновского излучения показал высокую степень надежности полученных результатов [2].

Литература

- 1. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Ляпидевский В.К. и др.// ПТЭ.1992.№5.С.158-162.
- 2. Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х.// Препринт №006-2007.М.: МИФИ,2007.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ

ТДС СПЕКТРЫ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ВОЛЬФРАМА ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, <u>П.Д. ПЬЯНКОВ</u>, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН, Н.Н. ТРИФОНОВ, А.А. ПИСАРЕВ

Вольфрам – один из кандидатов на использование в качестве обращенного к плазме материала для будущего термоядерного реактора. Изучение радиационных дефектов, образующихся, в том числе, и при воздействии энергетичных ионов, необходимо для предсказания захвата изотопов водорода в материалах ТЯР.

В работе был исследован захват ионов дейтерия в вольфрам методом термодесорбционной спектроскопии. Образец был вырезан из вольфрамовой фольги толщиной 50 мкм, производства фирмы Plansee. Исследования проводились на установке МЕДИОН, где образец облучался масс-сепарированным пучком ионов D_3^+ с энергией 10 кэВ/ D_3^+ , плотность потока ионов составляла 10^{14} D/см²сек, дозы облучения от 10^{15} до 10^{19} D/см². Термодесорбция проводилась со скоростью 2 К/сек до 1750 К. Для удаления дефектов образец отжигался при 1750 К в течение 1 часа.

Эволюция ТДС спектров при увеличении дозы облучения от 2×10^{16} до 2×10^{18} D/cm² (рис. 1) показала, что визуально спектр десорбции дейтерия состоит из двух широких пиков с $T_{M} \approx 400$ К и $T_{M} \approx 600$ К при дозах меньше 10^{17} D/cm² и из трех пиков с $T_{M} \approx 400$ К, с $T_{M} \approx 600$ К и $T_{M} \approx 750$ К при дозах больше 10^{17} D/cm². При дозах выше 2×10^{18} D/cm² становится заметным пик при 850 К. С увеличением дозы амплитуды всех пиков растут, насыщения не наблюдается.

Захват в дефекты, соответствующие выходу в ТДС в низкотемпературной области спектров (от 300 до 700 К) был исследован методом малой (пробной) дозы. Для этого отожженный образец облучался высокой дозой (6×10¹⁷ D/см²) для создания радиационных дефектов (повреждения), затем проводилась термодесорбция (весь внедренный дейтерий покидает образец после 900 К), но образец не отжигался. В результате в материале оставались радиационные дефекты. ТДС после пробной дозы (2×10¹⁶ D/cm²) из такого образца сильно отличается от отожженного образца, т.е. по форме спектра после пробной дозы можно судить об изменении концентрации тех или иных дефектов. ТДС спектры после пробной дозы показали, что в образец с повреждениями захватывается больше дейтерия, чем в отожженный, амплитуды всех пиков в области 300-700 К выросли, также стало очевидно, что в этой области можно выделить пики с Т_и=390 К, 450 К, 530 К, 630 К. В спектрах отсутствует пик при 750 К, несмотря на то, что соответствующие дефекты были созданы при облучении дозой 6×10¹⁷ D/см². Возможно, это связано с тем, что соответствующие дефекты очень быстро отжигаются уже во время проведения термодесорбции. При последовательном облучении поврежденного образца пробной дозой и проведении ТДС оказалось, что амплитуды пиков в области 300-700 К постепенно падают (рис. 2), что означает постепенный отжиг дефектов при линейном нагреве до максимальной температуры, причем скорость этого отжига у низкотемпературных дефектов (T_{M} =390 и 450 K) ниже, чем у более высокотемпературных (T_{M} =550 и 630 K).



Рис. 1. Эволюция ТДС спектров D2 после облучения вольфрама дозами $2 \times 10^{16} \div 2 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$



Рис. 2. ТДС спектры из образца с радиационными дефектами (от дозы $6 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$), последовательное облучение пробной дозой $2 \times 10^{16} \text{ D/cm}^2$

ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В ГРАФИТ МПГ-8 ПРИ ВЫСОКОДОЗНОМ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН, Н.Н. ТРИФОНОВ, А.А. ПИСАРЕВ, Б.И. ХРИПУНОВ¹⁾, J. ROTH²⁾, М. MAYER²⁾

¹⁾РНЦ Курчатовский Институт, Москва ²⁾Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany

В будущем экспериментальном токамаке-реакторе ИТЕРе часть диверторной области будет покрыта углеродным композитом (область наибольших тепловых нагрузок, нижняя часть вертикальных пластин). В экспериментах по захвату изотопов водорода в углеродные материалы наблюдается проникновение водорода в объем при плазменном воздействии [1], эксперименты проводились с невысокими температурами. В данной работе был проведен модельный эксперимент по взаимодействию интенсивного плазменного потока с графитом при высоких температурах.

Мишень из мелкозернистого графита МПГ-8 (размеры $30 \times 40 \times 5$ мм) была облучена на установке ЛЕНТА (РНЦ Курчатовский институт) потоком D плазмы, мощность источника плазмы составляла 0,8 кВт, давление рабочего газа 1 Па. Мишень находилась под плавающим потенциалом. Радиус плазменного пучка составлял около 20 мм, периферийная область облучалась форплазмой, концентрация которой на порядок меньше. Доза составляла порядка 10^{21} D⁺/см², поток порядка 10^{17} D⁺/см²сек. В области пятна облучения из-за интенсивного потока мишень была нагрета до 1100-1200 °С, на границе пятна до 900 °С, на периферии до 600 °С. Затем мишень была распилена на несколько частей поперек облученной поверхности (передние образцы, одна из сторон облучалась плазмой), чтобы исследовать разные области, и вдоль, чтобы исследовать тыльную часть (задние образцы, плазмой не облучались). Исследования проводились методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) и методом ядерных реакций (МЯР).

Профили концентрации, полученные МЯР (рис. 1) в различных зонах облучения показали, что дейтерий мигрирует за поверхностную зону в объем графита достаточно глубоко, до нескольких мкм. Видно, что в центральной области количество захваченных частиц в несколько раз меньше, чем на периферии, где температура была меньше. На некоторых профилях имеются максимумы на глубине порядка 1 мкм. На поверхности задних образцов также был обнаружен дейтерий, но концентрация слишком мала, чтобы восстановить профиль, оценочно она составляет около D/C=8×10⁻⁶.

Пример ТДС спектров дейтерия из передних образцов показан на рис. 2. Дейтерий десорбируется при более низких температурах у периферийных образцов (максимум в спектре при 1400 К), чем у центральных (максимум в спектре при 1600 К). Общее количество захваченных частиц на порядок больше, чем по результатам МЯР. Более того, термодесорбция задних образцов показала такие же спектры, как для передних, количество захваченных частиц всего в несколько раз меньше.

Полученные результаты можно объяснить тем, что во время облучения при высоких температурах дейтерий проникает в объем образца из окружающего газа на большие расстояния (порядка 1 мм), поэтому ТДС передних и задних образцов дали похожие результаты, а МЯР можно измерить профили только до 10-15 мкм. Оценки накопления водорода в графите по значению растворимости [2] показывают значение, близкое к результатам ТДС оценок.



Рис. 1. Профили концентрации дейтерия по глубине образца со стороны облучения, полученные МЯР



Рис. 2. ТДС спектры дейтерия из графита, облучавшегося плазмой на установке ЛЕНТА

Литература

[1] Roth et. al., JNM, 363-365 (2007) 822-826

[2] Yoshirou Shirasu, Shinsuke Yamanaka and Masanobu Miyake, JNM, 179-181 (1991) 223-226

ОБРАЗОВАНИЕ ПОР В ВОЛЬФРАМЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ДЕЙТЕРИЯ D₃⁺ С ЭНЕРГИЕЙ 10 кэВ

А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН, Н.Н. ТРИФОНОВ, А.А. ПИСАРЕВ, S.LINDIG¹⁾, J. ROTH¹⁾, M. MAYER¹⁾

¹⁾Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany

Вольфрам – один из кандидатов на использование в качестве материала первой стенки для будущего термоядерного реактора. Изучение радиационных дефектов, образующихся, в том числе, и при воздействии энергетичных ионов, необходимо для предсказания захвата изотопов водорода в материалах ТЯР. Особую роль в захвате изотопов водорода в вольфраме играют трехмерные макроскопические дефекты, такие, как блистеры, поры, трещины, в которых может накапливаться существенное количество дейтерия. Поры или блистеры могут создаваться при ионном или плазменном воздействии.

В данной работе исследовалось образование пор в поликристаллическом вольфраме и взаимодействие дейтерия с ними при облучении ионами. Захват в поры изучалось на установке МЕДИОН методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) после облучения. Внутренняя структура изучалась путем локальной резки металла фокусированным ионным пучком (Focused Ion Beam, FIB) с последующим изучением поверхности среза в сканирующем электронном микроскопе (Scanning Electron Microscope, SEM).

Образец из вольфрамовой фольги (толщиной 50 мкм производства фирмы Plansee) облучался ионами D_3^+ с энергией 10 кэB/ D_3^+ и плотностью потока ионов около 10^{14} D/см²сек. При необходимости образец отжигался в течение 1 часа при температуре 1750 К.

Были получены ТДС спектры дейтерия из образца, имевшего разную историю облучения. Первоначально исходный образец был отожжен при 1750 К в течение 1 часа. Если произвести облучение относительно большой дозой (больше 10^{17} D/cm²), то в образце останутся радиационные дефекты, которые, в принципе, можно отжечь. Было установлено, что в наших условиях (отжиг 1 час при 1750 К) не все радиационные дефекты отжигаются. В ТДС спектрах дейтерия после облучения одной и той же малой дозой 2×10^{16} D/cm² это выражается в появлении пика с T_m =630 К. Если дозу облучения постепенно увеличивать, каждый раз после этого отжигая образец, то амплитуда этого пика в ТДС спектре после малой дозы увеличивается (рис. 1). Аналогичная тенденция наблюдается и в спектрах после внедрения дозы 6×10^{17} D/cm².

После того как образец был однажды облучен дозой 5×10^{18} D/см², стала наблюдаться зависимость амплитуды пика при 630 К от плотности тока при одной и той же дозе внедрения. При увеличении времени облучения (при одной и той же дозе), т.е. при снижении плотности потока ионов, амплитуда пика при 630 К уменьшается.

Исследование внутренней структуры образца (срез с помощью FIB) показало, что после дозы 2×10^{18} D/cm² на глубине до 500 нм образовались мелкие поры диаметром порядка 20 нм (рис. 2). После зоны толщиной 500 нм, а также вне зоны облучения, поры отсутствуют, что говорит об их радиационном происхождении. Поры наблюдались не во всех зернах, что, по-видимому, говорит о влиянии ориентации зерен на образование пор. Можно предположить, что вакансии, создаваемые падающими ионами, могут собираться в кластеры и поры при миграции в поле напряжений около зоны торможения ионов и/или при последующем отжиге образца.



Рис. 1. ТДС спектры D_2 из вольфрама после дозы облучения 2×10^{16} D/см². В легенде указана максимальная доза облучения в истории облучений



Рис. 2. Срез образца с помощью FIB (масштаб 500 мкм). Стрелкой указана одна из пор в глубине зерна

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ ВОЛЬФРАМ

Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, М. RASINSKI¹⁾, М. MAYER¹⁾, J. ROTH¹⁾

¹⁾Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany

Вольфрам и углерод планируются для использования в ITER в качестве обращенных к плазме материалов. При одновременном использовании углерода и вольфрама возможно переосаждение распыленного материала на соседние элементы конструкции, что может приводить к формированию пленок.

В данной работе впервые было измерено влияние углеродных пленок на проницаемость водорода через вольфрам при облучении ионами. Эксперименты проводились на установке PERMEX (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany). Образцы были вырезаны из фольги поликристаллического вольфрама толщиной 50 мкм, на входную поверхность была напылена углеродная пленка методом магнетронного распыления. Предварительно поверхность полировалась электрохимически и чистилась ионами непосредственно в камере осаждения. Толщина пленки составляла 120 нм с хорошей однородностью вдоль поверхности. Плотность пленки равнялась 1.65 г/см³, что заметно ниже плотности графитов.

Облучение проводилось ионами D_3^+ с энергией 600 эВ при температуре 873 К, плотность потока ионов составляла порядка 10^{18} D/cm²c. Температура эксперимента находится вблизи максимума химического распыления (определенная в данных экспериментах скорость распыления составила 0.25 C/D), поэтому в процессе эксперимента толщина пленки постепенно уменьшается, и к концу эксперимента пленка полностью распыляется.





Рис.1. СЭМ изображение поперечного сечения образца на сколе механически сломанного образца

Рис.2. Зависимость проникающего потока дейтерия от дозы облучения через вольфрам и вольфрам с пленкой толщиной 120 нм на входной стороне. Поток ионов 7.5×10¹⁷ D/cm²c

Эксперименты показали, что пленка оказывает существенное влияние на проницаемость дейтерия. Время задержки оказалось в 15 раз больше, чем в экспериментах без покрытия, что свидетельствует об очень медленном транспорте дейтерия в пленке. Проникающий поток через вольфрам без пленки быстро достигает некоего стационарного значения, а проникающий поток через вольфрам с пленкой медленно возрастает до некоего максимума, после чего уменьшается. Максимум проникающего потока при проникновении через вольфрам с углеродным покрытием имеет значение сравнимое со значением в экспериментах без покрытия и достигается, когда толщина пленки уменьшается до 10-15 нм. При дальнейшем распылении пленки проникающий поток уменьшается, и после «полного» ее удаления оказывается заметно меньше значения в экспериментах без покрытия. Наиболее вероятно, причиной этого является углерод, внедренный в результате ионного перемешивания углерода с вольфрамом. Такое перемешивание предсказывается расчетами, выполненными с помощью компьютерного кода TRIDYN. Был показано, что в результате ионного облучения в конечной стадии эксперимента в глубине образца в конце зоны торможения ионов сформировывался слой углерода, который, вероятно, и служил барьером для транспорта внедряемых дейтронов вглубь вольфрама. После прекращения облучения проникающий поток быстро спадал, а при повторном включении быстро (с временами задержки как у вольфрама) возрастал до уровня, который был перед выключением пучка.

ДЕФЕКТЫ В ВОЛЬФРАМЕ С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ СВЯЗИ ВОДОРОДА

Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, М. RASINSKI¹⁾, М. MAYER¹⁾, J. ROTH¹⁾

¹⁾Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany

Вольфрам планируется для использования в ITER в качестве обращенного к плазме материала (ОПМ) в области дивертора. Захват трития в ОПМ является одним из основных с точки зрения безопасности работы реактора. Наличие в материале дефектов с высокой энергией связи водорода даже с относительно малой концентрацией может существенно повысить количество удерживаемого трития, особенно при высоких температурах, а также осложнить удаление захваченного трития из материала.

В некоторых экспериментах по термодесорбции дейтерия из вольфрама, а также в наших недавних экспериментах по проницаемости были обнаружены ловушки, энергия выхода из которых составляет около 2 эВ. Эти ловушки присутствовали как изначально, то есть имели технологичекую природу, так и появлялись после облучения высокой дозой и отжига. Многие исследователи полагают, что этими ловушками могут быть адсорбционные места на поверхности внутренних пор. В данной работе производилось исследование образцов, которые использовались в наших экспериментах по проницаемости и термодесорбции, на наличие пор для подтверждения этой гипотезы.



Рис.1. Два вида макроскопических дефектов, обнаруженных на СЭМ изображениях поперечного сечения образцов вольфрама: слева – «трещина» в образце после эксперимента по проницаемости, справа – поры в образце до эксперимента по проницаемости

Образцы исследовались с помощью установки HELIOS (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany), которая снабжена пучком ионов галлия для поперечной резки образцов и электронным пучком для получения СЭМ-изображения на поперечном срезе. На полученных изображениях (рис.1) были обнаружены два вида макроскопических дефектов: 1 – поры диаметром порядка 70 нм, 2 – «трещины», имеющие в двух направлениях размер порядка микрометра, а в третьем около 50 нм. Оба вида дефектов расположены на границах зерен и присутствуют в образцах до и после эксперимента по проницаемости, в ходе которого образец находится в течение нескольких дней при температуре около 873 К.

На основе полученных изображений была произведена оценка суммарной поверхности пор и трещин, а также мест, доступных для адсорбции водорода в предположении возможности заполнения одного монослоя на их поверхности. В пересчете на количество атомов вольфрама в образце концентрация центров захвата атомов дейтерия составила порядка 10^{-5} ат. долей, что находится в хорошем согласии со значением концентрации центров захвата, полученным при описании экспериментов по проницаемости с помощью кода ТМАР 7 (также ~ 10^{-5} ат. долей). Анализ образцов различной толщины (50 и 360 мкм) демонстрирует схожую картину.

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение существования трехмерных микродефектов с большой свободной поверхностью, которые способны выступать в роли ловушек для водорода с высокой энергией связи.

ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНЫЕ МЕМБРАНЫ

И.В. ЦВЕТКОВ, А.А. ПИСАРЕВ, Е.Д. МАРЕНКОВ

В работе рассмотрен новый подход к решению стационарной задачи проницаемости изотопов водорода через многослойные мембраны. Предложено общее уравнение проницаемости для многослойной мембраны и в стационарном режиме. Показано, что стационарная задача диффузии может быть сведена к решению алгебраического уравнения. Получены аналитические выражения для фактора снижения проницаемости в нескольких предельных случаях.

Проницаемость водорода через многослойные структуры представляет интерес для ряда приложений, в частности, является важной задачей для анализа утечек трития через конструкционные материалы в термоядерных реакторах. Для снижения проницаемости изотопов водорода через конструкционные материалы ТЯР предлагается использовать защитные покрытия. В качестве барьеров обычно рассматривают оксидные пленки, например, окислы алюминия или нанесенные покрытия (депозиты), например, из вольфрама.

Рассматривая баланс потоков через многослойную мембрану в стационарном режиме, можно показать, что концентрация на выходной стороне мембраны, обезразмеренная на концентрацию Сивертса, удовлетворяет уравнению:

$$V_n^2 u_{nr}^4 + 2V_n u_{nr}^3 + (1+\gamma)u_{nr}^2 = 1$$

где $V_n = k_{rn} S_n^2 \sqrt{P} \sum_{i=1}^n l_i / (D_i S_i)$ и $\gamma = k_{an} / k_{a1} = k_{rn} S_n^2 / k_{r1} S_1^2$. По аналогии с однослойной мембраной,

параметр V_n может быть назван «обобщенным параметром проницаемости», а параметр γ - «параметром асимметрии». Необходимо отметить, что для однослойной мембраны параметр асимметрии определялся как отношение коэффициентов рекомбинации на входной и выходной сторонах, в то время как для многослойной мембраны более логичным является определение его как отношения коэффициентов абсорбции. Это связано с тем, что растворимость водорода в однородной однослойной мембране на входной и выходной сторонах одинакова, и разницы между обоими определениями нет.

В случае $V_n >> 1$ и $V_n / \gamma >> 1$ диффузия определяется процессами в толщине мембраны. Поэтому этот режим проницаемости может быть назван DLR для многослойной мембраны. Можно показать, что в этом случае проникающий поток равен:

$$J_p = \sqrt{P} \left(\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{D_i S_i} \right)^{-1}.$$

Из этого соотношения видно одно из основных свойств DLR: проникающий поток не зависит от порядка слоев в мембране. Действительно, перестановка любых двух слоев приведет к изменению порядка слагаемых в сумме, следовательно, значение потока не изменится.

В случае однослойной мембраны зависимость $\ln J_p$ от обратной температуры является прямой линией. Для многослойной мембраны эта линия становится кривой. Можно показать, что эта кривая всегда выпукла вверх, т.к.

$$\frac{\partial^2 J_p}{\partial \left(1/T\right)^2} < 0$$

Если один из параметров V_n или V_n / γ много меньше единицы, проницаемость водорода определяется свойствами поверхностей мембраны. Поэтому этот режим может быть назван SLR. Поскольку уравнение проницаемости для однослойной и многослойной мембран имеет один и тот же вид (разница сводится к определению параметров V_n и γ), все свойства режима SLR, известные для однослойной мембраны, переносятся на многослойную мембрану. Основной особенностью многослойной мембраны является то, что материалы первого и последнего слоев, как правило, различны, поэтому многослойная мембрана ассиметрична (т.е. параметр $\gamma \neq 1$). Поток проницаемости в SLR не может быть больше потока проницаемости в DLR. Поэтому в случае SLR зависимость ln J_p от обратной температуры также является кривой, выпуклой вверх.

ПРОНИЦАЕМОСТЬ ИОННО ВНЕДРЕННОГО ВОЛОРОЛА ЧЕРЕЗ ВОЛЬФРАМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ю.М. ГАСПАРЯН, А.В. ГОЛУБЕВА¹⁾, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАУЕR²⁾, J. ROTH²⁾

¹⁾РНЦ Курчатовский институт

²⁾Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany

Поведение изотопов водорода в вольфраме широко исследуется применительно к проблеме накоплению трития в обращенных к плазме материалах ИТЭР. Вместе с тем, имеется лишь крайне ограниченное количество работ по проницаемости водорода из газа и при ионном облучении из-за технических сложностей, связанных с низкой растворимостью и диффузионной подвижностью водорода в вольфраме.

В данной работе впервые производилось исследования проницаемости водорода (дейтерия) через вольфрам при ионном внедрении в области сравнительно низких температур 823-923 К. Большинство экспериментов было проведено с образцами, вырезанными из фольги поликристаллического вольфрама производства Plansee толщиной 50 мкм. Для сравнения был также исследован образец толщиной 360 мкм того же производителя. Поверхность образцов полировалась с обеих сторон электрохимически, «толстый» образец предварительно полировался механически. Облучение производилось ионами D_3^+ с энергией 600 эВ, плотность потока ионов составляла порядка 10¹⁸ D/см²с.

На рис.1 показана типичная кривая проницаемости. После включения ионного пучка проникающий поток выходит на стационарный уровень. После выключения пучка проникающий поток спадает, но не до нуля. До нуля он спадает после прекращения натекания газа в ионный источник. Это свидетельствует о том, что в данных экспериментальных условиях имеет место параллельное проникновение из ионного пучка и из газа. Моделирование эксперимента с помощью программы ТМАР 7 показало прекрасное согласие со всеми тремя стадиями эксперимента. Принципиальным является использование коэффициента диффузии Фраунфельдера и ловушек с высокой энергией освобождения 2 эВ.



Сравнение Рис.1. экспериментальной кривой проницаемости при температуре 893 K И TMAP 7 моделирования С помощью кода (коэффициент диффузии Фраунфельдера, ловушки с энергией $E_t = 2$ эВ и концентрацией $n_t = 1.6 \times 10^{-5}$

ат. долей)



Рис.2. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии. Линия – экстраполяция данных Фраунфельдера, точки – наш эксперимент. Приведены также значения энергии связи, полученные для различных образцов. Толщина образцов: "ex18" - 360 мкм, остальные - 50 мкм

Возрастающие участки всех кривых проницаемости прекрасно описываются также известными формулами, которые обычно применяются для описания проницаемости из газа в режиме, лимитированном диффузией с некоторым эффективным значением коэффициента диффузии D_{eff}. Зависимость эффективного коэффициента диффузии от обратной температуры показана на рис.2. Полученные значения на четыре порядка меньше значения Фраунфельдера для диффузии без дефектов. Это говорит о том, что в условиях нашего эксперимента существенным оказывается влияние дефектов. Хорошее описание экспериментальных данных формулой для проницаемости из газа через образец с дефектами возможно при выполнении следующих условий: 1 - проницаемость дейтерия лимитирована диффузией за пределами зоны торможения ионов, 2 – концентрация дейтерия в зоне внедрения устанавливается мгновенно по сравнению со временем транспорта дейтерия через образец, 3 - дефекты, определяющие время задержки, заполнены слабо. Из температурных зависимостей эффективного коэффициента диффузии получено значение энергии освобождения из дефектов $E_t = (2.05 \pm 0.15)$ эВ, что отлично согласуется со значением, полученным подгонкой ТМАР 7.

ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПЕРЕНАПЫЛЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ СЛОИ И УГЛЕРОДНУЮ ПЫЛЬ ТОКАМАКА Т-10 И ОЦЕНКА УДЕРЖАНИЯ ТРИТИЯ В ИТЭР

А.А. АЙРАПЕТОВ, Л. Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.А. КАМНЕВА¹⁾, <u>А.А.КУЗЬМИН</u>, Л.Н.ХИМЧЕНКО¹⁾, П.А. ШИГИН

¹⁾РНЦ Курчатовский институт

Для понимания процессов осаждения пленок и образования пыли в токамаках было проведено изучения углеродной пыли и пленок с поверхности вакуумной камеры, удалённых из токамака T-10 летом 2008. Топология пленок была изучена с помощью РЭМ, а содержание в них газов методом термодесорбционной спектрометрии.

Анализ показал, что как пленки, так и частички пыли, имеют различные структуры, зависящие, повидимому, от места и условий их образования. При этом частички пыли являются, в основном, разрушенными пленками, так как сходны с некоторыми из них по структуре и составу, а их формы указывает на то, что они являются фрагментами плоского слоя.

Спектры термодесорбции пленок также имеют разную структуру, еще раз подтверждая, что условия образования пленок были различны. Так, спектры некоторых пленок подобны спектрам десорбции дейтерия из графитов, облученных низкоэнергетичными ионами; другие схожи со спектрами графитов, облученных высокоэнергетичными ионами; третьи представляют собой набор пиков, характерных для различных условий облучения. Также на спектрах присутствует пик, соответствующий захвату водорода из водяных паров.

Количества удерживаемых в плёнках дейтерия и водорода (в том числе в виде углеводородов), а также содержание кислорода сильно различаются. Концентрация дейтерия в плёнках колеблется от D/C \approx 0.04 до D/C \approx 0.30, при этом доля дейтерия, находящегося в составе C_xD_y молекул, изменяется от 12% до 60%. Для пыли эти значения составляют следующие величины: D/C от 0,05 до 0,15, доля дейтерия в углеводородах от 20 до 40 %. Меньший разброс этих значений для пыли обусловлен, скорей всего тем, что пыль является набором осколков различных пленок. Повышенное (относительно пленок) содержание водорода в пыли (H/C от 0,1 до 0,15 для пыли, от 0,02 до 0,1 для пленок) может быть обусловлено большим захватом на поверхностях пылинок воды из атмосферы. Следует отметить, что примерно в том же диапазоне (D/C от 0,1 до 0,3) варьируется концентрация дейтерия в пленках JET.

Различие в концентрациях захваченного дейтерия подтверждает вывод о том, что в разных частях токамака (в различных условиях) формируются пленки с разной структурой.

Для определения связи между условиями осаждения углеродного слоя и количеством захваченных атомов водорода и для выявления условий, способствующих наименьшему захвату водорода в углеродные слои, была выполнена специальная программа исследований. Эксперименты проводились на установке, позволяющей осаждать углеродные слои в контролируемых условиях (МИФИ).

Было показано, что при осаждении слоя в остаточном газе при комнатной температуре концентрация H/C в нем не превышает 0,1; при формировании пленки в атмосфере водорода или при сопутствующем облучении ионами водородной плазмы с энергией $E \le 200$ эВ отношение $H/C \le 0,2$; а при облучении в плазме ионами с энергией $E \ge 200$ эВ величина H/C возрастает и достигает 0.4 при E=400 эВ.

Результаты этих экспериментов позволяют заключить, что в условиях токамака концентрации изотопов водорода в осажденных углеродных слоях превышает величину H/C = 0,2 и дорастает до 0,4 в тех случаях, если растущий слой облучается быстрыми атомными частицами. Такими частицами могут быть, по-видимому, атомы перезарядки.

Известно, что осажденные в диверторе перенапыляемые углеродные слои считаются основным объектом накопления трития в ИТЭРе с графитовыми (CFC) приёмными пластинами. В расчётах по определению времени работы ИТЭР до достижения "T-limit" удержание изотопов водорода в таких слоях принимается равным (D50% + T50%)/C = 0.4.

Углеродные слои, формирующиеся в диверторе ITERa не будут подвергаться облучению быстрыми атомами перезарядки. Поэтому, основываясь на приведенных выше результатах, можно заключить, что величина (D50% + T50%)/C = 0.4, принимаемая для оценки накопления трития существенно завышена, и, следовательно, время работы ITERa до достижения предела накопления трития, на самом деле, будет примерно в 2 раза большим.

УДАЛЕНИЕ КИСЛОРОДА ИЗ СС-КОМПОЗИТА, ОБЛУЧЕННОГО В ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЕ С ПРИМЕСЬЮ КИСЛОРОДА.

А.А. АЙРАПЕТОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. КУЗЬМИН, Я.С. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН

Кислород является одной из основных и трудно устранимых примесей в современных термоядерных установках. В токамаках, использующих углеродосодержащие тайлы первой стенки и дивертора, его концентрация в плазме обычно составляет несколько процентов. Взаимодействие кислорода со стенкой приводит к ее интенсивному разрушению и загрязнению плазмы. Внедряясь в графитовые тайлы, кислород накапливается в них в больших количествах. Удаление его из тайлов является важной задачей, однако ее реализация затрудняется тем, что до сих пор практически не выделены основные параметры и закономерности захвата и удержания кислорода при плазменном облучении.

В работе исследованы закономерности удаления кислорода из углеграфитового композита (CFC) при его облучении в дейтериевом разряде. Эксперименты проводились на установке PITER-2, позволяющей облучать образцы CFC в плазме газового разряда и определять количество удерживаемых в них частиц методом TДC-анализа. Облучение CFC ионами $D_2+2\%O_2$ проводилось в кислородосодержащей плазме. «Чистящее» облучение проводилось в чистой дейтериевой плазме. Предполагалось, что эффективность чистящего облучения зависит как от энергии ионов во время предварительного облучения в кислородосодержащей плазме, так и от энергии ионов дейтерия чистящего облучения. Поэтому в исследовании проведено и внедрение, и удаление кислорода ионами разных энергией. Для облучения были выбраны энергии 100 и 400 зВ/ат, т.к. при внедрении ионов с энергией 100 эB/ат механизм захвата – потенциальный, а при внедрении ионов с энергией 400 зB/ат – кинетический [1]. Параметры предварительного облучения: плотность потока ионов на образец была $j = 1 \times 10^{20} ar/(m^2 cek)$, температура образца T = 120; 200 °C, доза облучения D = $5 \times 10^{23} ar/m^2$, состав ионов в бомбардирующем потоке - $D_2 + 2\%$ O_2 . Параметры чистящего облучения: плотность потока ионов на образец $j = 3 \times 10^{19} ar/(m^2 cek)$, температура образца T = 120; 200 °C, доза облучения D = $(2 \div 50) \times 10^{22} ar/m^2$, облучение ионами D₂. Толщина слоя, распыленного за время чистящего облучения, рассчитывалась, исходя из потери массы образца.

В результате проделанных экспериментов получены зависимости количества удерживаемого кислорода от толщины распыленного слоя графита и от времени чистящего облучения. При распылении СFC во время чистящего облучения до глубин порядка 50 нм наблюдалось слабое уменьшение количества удерживаемого кислорода для всех комбинаций энергий чистящего и предварительного облучения. Дальнейшее распыление ускоряло эмиссию кислорода, но скорость удаления различалась для разных комбинаций энергий облучения. Так, для комбинаций энергий облучения 400/100 эВ/ат (400 эВ/ат – энергия предварительного облучения, 100 эВ/ат – энергия чистящего облучения), 100/100 эВ/ат время очистки от кислорода гораздо больше (≥250 мин), чем для комбинаций энергий 100/400 эВ/ат и 400/400 эВ/ат (порядка 80 мин). С другой стороны, для удаления всего кислорода в экспериментах с комбинацией энергий 100/400 эВ/ат и 400/400 эВ/ат и 400/100 эВ/ат и 400/100 эВ/ат и 400/100 эВ/ат и 400/400 эВ/ат и 400/100 эВ/ат и 400/200 эВ/ат и 400/400 эВ/ат и 400/200 эВ/ат и и кислород во время истящего и кислород во время предварительного истя ист

Предложено объяснение прохождения атомов кислорода глубоко в объем графита. Кислород смещается в результате столкновительных каскадов, вызванных внедрением быстрых ионов в CFC. Основная часть атомов мишени получает импульс, направленный в объем графита. Атомы кислорода, удерживаемые в CFC, так же как и атомы углерода могут быть вовлечены в каскады. Атомы кислорода, выбитые со своих мест, проникают вглубь материала и образуют химическую связь с атомами углерода после торможения. Они не могут участвовать в процессах диффузии и остаются на своем месте до следующего удара, который смещает их вглубь графита.

Литература

[1] A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, J.P. Gunn, C. Grisolia, A. Kuzmin, T. Loarer, M. Lipa, P. Monier-Garbet, P. Shigin, E. Tsitrone and A. Zakharov // J. Nucl. Mater. (2009), V. 390-391, P. 589-592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Д.К. КОГУТ, Н.Н. ТРИФОНОВ

В результате распыления при ионном облучении на поверхности может происходить развитие микрорельефа. Одно из самых заметных явлений – формирование конусов и ямок на поверхности различных металлов, сплавов и полупроводников при бомбардировке ионами с энергиями от сотен эВ. Одна из первых моделей конусообразования была предложена в работе [1], в которой частицы примесей на поверхности препятствуют распылению находящимся под ними участкам мишени. Согласно [1], основным механизмом преобразования бугорков-зародышей в конические выступы при ионной бомбардировке является зависимость коэффициента распыления мишени от угла падения налетающих частиц. При этом наиболее стабильным оказывается конус, у которого угол при вершине составляет $\alpha_{kp} = 180^\circ - 2\theta$, где θ – угол максимального распыления. В случае облучения медной мишени ионами аргона в диапазоне 20-80 кэВ экспериментальные данные [2] хорошо согласуются с теоретически рассчитанными значениями.

Авторами разработана программа, позволяющая моделировать изменение микрорельефа любой заданной поверхности при ионном облучении, основанная на модели бинарных соударений, учитывающая процессы отражения и распыления, а также потоки переотражённых и перепылённых. Для этого в код SCATTER [3] были внесены дополнения, позволяющие учесть изменение рельефа поверхности под действием падающих на неё частиц. Поверхность задается в плоскости XZ, определяется конечным набором точек $z(x_i)$, где $x_i = i\Delta x$. В промежутках между точками для задания поверхности используется линейная интерполяция. Предполагается, что изменение рельефа поверхности происходит за счёт процессов распыления и перепыления. При взаимодействии частицы с поверхностью рассчитывается изменение координаты $z(x_i)$ четырёх ближайших к точке события узлов и соответствующее этому изменение рельефа.

Для моделирования использовалась поверхность с конусом с основанием 20 мкм на подложке и различными углами при вершине конуса. Полученная поверхность облучалась ионами аргона с энергией 1 кэВ.



На рис. 1 представлено распыление конуса с углом при вершине α =60° ионами Ar (1кэВ) при нормальном падении на мишень для двух значений флюенса. Видно, что с ростом дозы облучения конус распыляется, так как скорость распыления склонов конуса немного превышает скорость распыления подложки, что согласуется с зависимостью коэффициента распыления от угла падения частиц к нормали поверхности. Также заметно формирование канавки вокруг конуса: при проведении моделирования без учёта потоков переотражённых и перепылённых частиц (полученный рельеф приведён на рис. 1 для сравнения с первоначальным) данный эффект не наблюдается.

Моделирование распыления конуса с углом α =30° обнаруживает другую закономерность (рис. 2). С ростом дозы облучения до некоторого момента форма конуса не изменяется, он сдвигается вниз, при этом увеличивается угол при вершине и достигает равновесного значения 50°±5° при дозе облучения 10²⁴ частиц на м². Это согласуется с результатами эксперимента [2] по облучению меди аргоном с энергией 1.05 кэВ и с расчётами угла вершины конуса по теории угла максимального распыления.

В случае наклонного падения ионов аргона – 60° (рис. 3) к нормали наблюдается следующая картина. Во-первых, за счёт разности коэффициентов перепыления сторон в процессе облучения, конус сдвигается вправо как единое целое, а во-вторых, у подножия конуса образуются бугорки. На начальной стадии видно затенение правой стороны конуса, которая с ростом флюенса ориентируется по касательной к потоку.

Литература

- [1] Stewart A.D.G., Thompson M.W. // J. Mater. Sci. 1969. V. 4. P. 56.
- [2] Witcomb M.J. // J. Mater. Sci. 1974. V. 9. P. 1227.
- [3] Курнаев В.А., Трифонов Н.Н. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2002. Вып. 3. С. 76.

ВЛИЯНИЕ ПЛЕНОК БОРА И ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМ

МОШКУНОВ К.А., ШМИД К.^{*}, ЯКОБ В.^{*}, АЛЬМУТ В.^{*}, РУСИНОВ А.А., КУРНАЕВ В.А. ^{*} Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany

Образующиеся в термоядерных установках при перепылении материалов пленки могут влиять на накопление трития в обращенных к плазме материалах. Одной из возможных для ИТЭР ситуаций является осаждение бериллия с первой стенки на вольфрамовые элементы баффла и дивертора с возможным образованием оксида Ве. В современных машинах, широко используется процедура боронизации стенок разрядной камеры. Мы попытались оценить вклады обеих пленок на захват дейтерия в вольфрам. Однако работа с бериллием требует особых установок для обеспечения безопасности, поэтому был использован алюминий, который по свойствам близок к бериллию.

Эксперимент был проведен на базе Института физики плазмы в Гархинге, Германия. Образцы из вольфрама были отполированы механически и электролитически, на часть из них была нанесена пленка бора (300 Å) при боронизации в токамаке ASDEX Upgrade. На другие были нанесены пленки аморфного Al_2O_3 (40 Å). Потом образцы парами (опорный + образец с пленкой) были облучены дейтериевой плазмой, где основным компонентом был D_3^+ с энергией 150 эВ/D. Температура при облучении была примерно 250 С.

Одновременно с облучением состояние поверхности наблюдалось с помощью эллипсометрии, так что в любой момент можно было, зная известные характеристики пленки, определить ее толщину. Таким образом, облучение проводилось в полтора – два раза дольше, чем требовалось для полной эрозии пленки. После этого образцы были проанализированы на наличие дейтерия методом ядерных реакций (NRA), спектры которой представлены на рис. 1. Суть метода заключается в том, что, регистрируя спектр протонов реакции He³+D→He⁴+p, можно оценить профиль захвата дейтерия в материале. Пик около 1220 канала соответствует дейтерию у поверхности образца, а плечо справа – дейтерию, захваченному в глубине образца. Причем спад этого плеча справа соответствует резкому падению чувствительности методики с увеличением глубины, что лимитирует анализ глубиной в 8 мкм, и в случае наличия плеча справа не дает оценить общее количество захваченного дейтерия.



Рис. 1. NRA спектр протонов для опорных вольфрамовых образцов и образцов, покрытых пленками оксида алюминия и бора и после высокодозного облучения ионами дейтерия с энергией 150 эВ до полного удаления пленок.

Из анализа представленных спектров следует, что даже при полной эрозии пленки образец захватывает больше, чем изначально чистый (опорный) образец в случае оксида алюминия и меньше в случае с пленкой от боронизации. Причем в случае образца, на который был нанесена пленка Al₂O₃, концентрация в глубине оказалась больше, чем в опорном, что говорит о том, что оксид работает как барьер для выхода дейтерия из вольфрама, но при этом и обеспечивает диффузию дейтерия сквозь пленку в вольфрамовую подложку. В результате количество захваченного дейтерия сильно возрастает, что было подтверждено результатами термодесорбционной спектроскопии.

Что касается боронизированных образцов, то в них не наблюдается диффузия дейтерия в толщу подложки вообще, а только приповерхностный пик. Это позволяет заключить, что бор, даже в остаточных количествах подавляет проникновение дейтерия в вольфрам. Наличие бора в вольфраме после облучения было подтверждено методом вторичной ионной масс-спектрометрии.

Если предположить, что оксид бериллия по отношению к водороду будет вести себя аналогично оксиду алюминия, то можно заключить, что его образование приведет к заметному увеличению захвата трития, в то время как боронизация уменьшает количество захваченных в материале стенок изотопов водорода.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ АТОМНО–СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ОБРАЗЦОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ КАТОДНОЙ ФОЛЬГИ, ДОРАБОТАННЫХ ПЛАЗМОЙ

Г.В.КРАШЕВСКАЯ, А.А ПИСАРЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ

В работе исследовались образцы катодной промышленной фольги, доработанные плазмой стационарного и сильноточного импульсного магнетрона. Воздействию подвергались промышленные фольги WFC 206 и WFC 320.

В таблице 1 представлено описание полученных образцов.

Маркировка образца	Подложка, толщина ленты	Нанесенные слои	Толщина основа/ покрытие, мкм
206-1	А1 / 20мкм	(TiN,Ti)/TiN (стационарный магнетрон)	0,4/0,1
206-2	А1 / 20мкм	(TiN,Ti)/TiN (стационарный магнетрон)	0,4/0,05
320-1	А1/30мкм	(Ti,TiN)/TiN (стационарный магнетрон)	0,8/0,1
320-2	А1/30мкм	(Ti,TiN)/TiN (стационарный магнетрон)	0,8/0,05
9	Al /20мкм	(Ti,TiN)/TiN (импульсный магнетрон)	0,4/
8	А1/30мкм	(Ti,TiN)/TiN (импульсный магнетрон)	0,4/

Таблица 1. Описание образцов и состав покрытий

Диагностика образцов проводилась на атомно-силовом микроскопе ACM (Veeco MultiModeV). На рисунке 1 представлены трехмерные изображения поверхности образцов промышленной фольги WFC 320 с нанесенным на нее слоем нитрида титана в стационарном магнетронном разряде.

Образцы 320-1 и 320-2 отличаются толщиной нанесенного покрытия. По структуре наблюдаемой в АСМ образцы очень похожи. Измерение удельной емкости фольги показывают лучший результат у образца с более толстым слоем нитрида титана: 1993 мкФ/см² к 1742 мкФ/см². Тест образцов на стабильность емкости, который заключается в измерении емкости при приложении небольших напряжений к фольге и сразу после снятия данного напряжения, показал увеличение емкости образцов. Эффект пока не объяснен и требует дополнительного исследования, т.к. как правило после замеров под напряжением емкость начинает уменьшаться.

На рисунке 1 представлены трехмерные изображения поверхности фольг доработанных импульсным магнетроном. Образец №8 представляет собой доработанную фольгу WFC 320, а образец №9 - WFC 206.



Рис. 1. Трехмерное изображение поверхности образцов 8 и 9 при наблюдении в АСМ

Видно, что структура получаемых покрытий очень похожа, отличается только размером. Образец №9 имеет более крупный размер структуры. Измерение емкости образцов показали небольшой рост емкости при измерении под напряжением и хорошую стабильность ее параметров. Таким образом, была показана стабилизирующая роль нитрид титанового покрытия и возможность увеличения емкости за счет этого проводящего слоя.

Работа выполнена в рамках проведения научно-исследовательских работ по государственному контракту № 02.527.12.9009 через договор с ЗАО «СКТБ КАСКАД» № 87-3-021-219

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С НЕПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ ПРИ СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

<u>В.В. ПЕСКОВ</u>, Н.В. ИСАЕВ¹, В.А. КУРНАЕВ, Е.Г. ШУСТИН¹

Іинститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова ран (фрязинский филиал)

В плазмохимической технологии полупроводниковых приборов в основном используются ВЧ и СВЧ разряды. Энергия ионов в таких разрядах, как правило, трудно контролируется и управляется. В [1,2] предложена технология травления поверхности на основе пучково-плазменного разряда, сочетающая простоту конструкции с легкостью управления энергией ионов.

В случае с непроводящей поверхностью возникают проблемы с зарядкой её до плавающего потенциала. В пучково-плазменном разряде поверхность заряжается до положительного потенциала нескомпенсированным ионным потоком; таким образом, ионы тормозятся и травление прекращается. Для борьбы с этим эффектом было предложено подавать на держатель подложки переменное напряжение. При этом электроны, приходящие на поверхность в положительном полупериоде, компенсируют заряд. Подобный режим автоматически реализуется в ВЧ разрядах, но для данного типа разряда этот метод является оригинальным.

Для исследования, влияния модулированного потенциала на взаимодействие ионного потока с непроводящей поверхностью было проведено компьютерное моделирование в соответствии с эквивалентной электрическая схема (рис.1а.) (а) и вольт-амперной характеристикой (б). Емкость C1



образована непроводящей средой между держателем подложки, к которому подводится переменное напряжение, и поверхностью, контактирующей с плазмой. Емкость C2 образована слоем объемного заряда между невозмущенной плазмой и поверхностью образца.

Диод, по которому протекает ток *I1*, является условным обозначением нелинейного сопротивления слоя объёмного заряда. ВАХ этого слоя (рис. 1б) получается экспериментально – при замене структуры, подвергаемой травлению, металлическим электродом равной площади. Как видно из рис. 2б, экспериментальная кривая с большой точностью аппрок- симируется экспоненциальной зависимостью

$$I_1 = -I_i + I_e \times \exp(\frac{eU}{kT})$$

Уравнения для эквивалентной схемы:

$$V \times \sin(\omega t) = \int_0^t \frac{(I1 + I2)}{C1} dt + \int_0^t \frac{I2}{C2} dt,$$

Рис.1. Эквивалентная электрическая схема, заложенная в основу модели (а) плазменного слоя (б),

$$U = \int_0^t \frac{I2}{C2} dt$$

Решения этих уравнений с заданными начальными условиями методом Рунге-Кутта 4-го решалось в среде

Matlab 7.0. Параметры эквивалентной схемы *Ii, Ie, T*, таким образом, брались из аппроксимации экспериментальной ВАХ. Программа позволяет извлекать информацию о токах и напряжениях на подложке при различных параметрах плазмы и сигнала на держателе подложки. Для проверки адекватности моделирования было проведено экспериментальное определение напряжения на изолированном зонде при подаче на держатель подложки переменного сигнала с различной частотой и амплитудой. Емкость конденсатора, образованного зондом и держателем подложки, соответствовала ёмкости технологического образца с $\varepsilon = 12$ (AsGa). На держатель подложки подавалось переменное напряжение с амплитудой от 20 до 200 В и частотой от 50 до 800 кГц. При помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS1012 регистрировались входной сигнал и сигнал с обращённой к плазме поверхности зонда. Отклонение модели от эксперимента наблюдается при больших амплитудах сигнала, а также при частотах сигнала >500 кГц. Это объясняется тем, что модель не учитывает зависимость ёмкости слоя объёмного заряда от напряжения, а также динамику ионов на частотах ~ ωpi .

Таким образом, разработанная программа позволяет по набору экспериментально измеренных вольтамперных характеристик большого зонда и функций распределения ионов по энергиям в различных режимах разряда правильно выбрать параметры напряжения, модулирующего потенциал подложки, и оптимизировать таким образом технологический режим обработки изолированной поверхности.

Литература

- 1. Н.В. Исаев, А.И., Чмиль, Е.Г Шустин.// Физика плазмы. 2004. Т. 30. №3. С. 257
- 2. Н.В.Исаев Е.Г.Шустин, М.П.Темирязева, В.П.Тараканов, Ю.В.Федоров// Прикладная физика, 2008, №3, с.73

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ИОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 40 кэв

Е.А.ГРИДНЕВА, Н.Н.КОБОРОВ, В.А.КУРНАЕВ, <u>Н.А.МАМЕДОВ</u>

Установка «Большой масс-монохроматор МИФИ» (БММ) на протяжении многих лет успешно использовалась для моделирования взаимодействия легких ионов килоэлектронвольтных энергий с твердым телом. Задача модернизации установки включала замену ионного источника на прогреваемый с повышенным ресурсом работы без замены катода, замену элементов вакуумной системы морально устаревших и не позволявших применять современные откачные средства и средства для измерения вакуума, а главное – замену элементов системы питания и управления установкой на источники питания, обеспечивающие цифровое компьютерное управление параметрами ионных пучков. При этом необходимо было обеспечить возможность получения ионов с энергией до 40 кэВ. Помимо изменения вакуумной системы установки была произведена модернизация поворотной камеры магнита с заменой фланцев на новые, удовлетворяющие современному общепринятому стандарту CONFLAT, а также тщательная очистка камеры в ультразвуковой ванне. Принципиальная схема основного ионного канала модернизированной установки представлена на рис.1

Полученные характеристики: разрешение системы масс сепарации не меньше $R \ge 1.3\%$, максимальный ток (на ⁴He⁺ при энергии 5 кэВ) на мишени – I = 0.4 мкА, при плотности тока j = 10 мкА/см², остаточное давление в ионном тракте после длительной откачки (без прогрева) $6 \cdot 10^{-9}$ Торр, При работе с гелием основной примесью является водород. Таким образом, осуществлена реконструкция на современной вакуумной и элементной базе основного ионного канала Большого масс -монохроматора МИФИ.



Рис.1. Принципиальная схема основного ионного канала модернизированной установки «Большой масс - монохроматор»: 1-дуоплазматрон, 2 -электростатическая линза, 3 - сепарирующий электромагнит, 4 – вакуумная камера дифференциальной откачки, 5 - пролетный шибер, 6 - мишень, 7- электростатический энергоанализатор, 8 - турбомолекулярные насосы Pfeiffer TMU 071, 9,10 – форвакуумные насосы Varian SH-100, 11 – турбомолекулярный насос TMH 1500, 12 – отклоняющие в вертикальной плоскости пучок пластины, 13 – зонд для измерения профиля пучка, 14 – пластина для измерения тока, 15 – натекатель, 16 – баллон с рабочим газом.

помощью С разработанных средств диагностики пучка проведены первые испытания вакуумной И ионносистемы установки оптической и показано, что уровень активных примесей снижен, как минимум на 3 порядка до 10⁻⁸ Па, что обеспечивает проведение экспериментов в намного более чистых условиях, чем до реконструкции.

Кроме того, проведенная реконструкция резко увеличивает ресурс непрерывной работы ионного источника, что значительно повышает производительность при эксплуатации установки.

Применение новых цифровых блоков питания и разработанных к ним программ управления позволяет автоматизировать управление ионным пучком и дает возможность проводить ионно-пучковые эксперименты по заранее разработанным программам облучения.

В итоге, проведенная модернизация переводит установку БММ в класс современных компьютерно-управляемых электрофизических установок с широким диапазоном возможностей для проведения облучения материалов различными газовыми ионами с энергиями до 40 кэВ и проведения экспериментов по взаимодействию ионов поверхностью твердого тепа

СОБИРАЮЩИЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА Т-10

<u>Д.К. КОГУТ</u>, В.А. КУРНАЕВ, С.А. КАМНЕВА¹)

¹⁾РНЦ Курчатовский институт

В современных термоядерных установках с магнитным удержанием большую роль играют нейтралы перезарядки. С точки зрения корпускулярной диагностики они несут важную информацию о ионной температуре плазмы, с другой стороны наиболее высокоэнергетичные нейтралы участвуют в процессе распыления материала первой стенки. Для того, чтобы точнее моделировать особенности формирования рельефа на поверхности первой стенки, распыление в щелях тайлов токамака и другие процессы необходимо знать как энергетический, так и угловой спектр нейтралов перезарядки. Для определения углового распределения нейтральных частиц в периферийной области токамака T-10 был разработан пассивный собирающий зонд. Прибор также позволяет изучать захват низкоэнергетичных ионов дейтерия и осаждения углеводородных плёнок в пристеночной области.

На рис. 1 представлен сборочный чертёж зонда. Основание зонда – стальная платформа 5, которая крепится к штоку существующего шлюзового ввода движения в камеру токамака. После откачки ввода, зонд можно вдвигать на требуемую глубину в пристеночный слой на время изучаемого разряда. К платформе 5 при помощи винта 12 крепится медный стакан 11, в котором закреплены облучаемые образцы: кремниевый 7 при помощи держателя 9 и кольцевая танталовая фольга 10 при помощи держателя 4. Кремниевый образец 7 используется для изучения распределения захваченных быстрых нейтралов перезарядки, попавших в телесный угол анализатора – отверстие диафрагмы 8 диаметром 1 мм. Использование кремния в качестве материала образца позволяет исключить диффузию дейтерия из рассмотрения при небольших температурах. При этом стакан 11 служит радиатором для охлаждения образца благодаря большой теплопроводности меди. Экран 2 с отверстиями позволяет выделить четыре взаимно перпендикулярных направления потоков ионов в периферийной области для облучения танталовой фольги 10. Таким образом, можно получить информацию о преимущественном направлении движения часты зонда в сборке при снятой диафрагме представлена на рис. 2.



Рис. 1. Сборочный чертёж собирающего зонда

Рис. 2. Вид сверху при снятой диафрагме

После экспозиции образцы вынимаются из зонда для последующего изучения. На поверхности танталовой фольги исследуются профили осаждённых углеводородных плёнок методом атомно-силовой микроскопии. Затем проводится ТДС-спектроскопический анализ участков фольги, соответствующих различным направлениям потоков частиц в периферийной области, определяется полный захват дейтерия в тантале. Профиль внедрённого дейтерия в кремниевом образце определяется при помощи вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Компьютерное моделирование с использованием программы SCATTER [1] показало наличие пиков концентрации дейтерия в образце, соответствующих наиболее вероятному углу падения нейтралов на поверхность первой стенки токамака. Следовательно, анализ экспериментального профиля внедрённого дейтерия позволит определить угловое распределение нейтралов перезарядки в периферийной области токамака T-10.

Литература

[1] Курнаев В.А., Трифонов Н.Н. // ВАНТ, серия «Термоядерный синтез». 2002. В. 3-4. С. 76.

СВЕРВЫСОКОВАКУУМНЫЙ ПОДВИЖНЫЙ ЗОНД ЛЕНГМЮРА

В.А.КУРНАЕВ, И.Д.ЕГОРОВ, Е.А.ГРИДНЕВА, С.Ф.ПЕРЕЛЫГИН

Исследование плазмы, создаваемой в сверхвысоковакуумных системах, требует применения зондов, обладающих минимальным натеканием и возможностью прогрева с целью обезгаживания. Ниже описан простой зонд, в конструкции и системе питании которого применены недорогие стандартные комплектующие.

Внешний вид зонда показан на рис.1. Внутри корпуса диаметром 42 мм и длиной 140 мм расположены стандартные прогреваемые электрический ввод и сильфон с длиной изменяемой на 30 мм с присоединительными фланцами CF16. Соединение с плазменной установкой осуществляется через фланец CF40. Конструкция позволяет осуществлять как медленные точные перемещения зонда с помощью винта с мелкой резьбой, так и использовать зонд в «прыгающем» режиме, быстро вводя его в область плазмы с высоким потоком мощности. Возвращение зонда в исходное состояние осуществляется посредством пружины, время возвратно-поступательного движения составляет ≤ 100 мс. Точность позиционирования зонда в перпендикулярном продольной оси направлении обеспечивается специальной трубчатой направляющей и составляет ±0,2мм на длине 30 см. Точность позиционирования вдоль направления перемещения составляет 0,1мм. Все детали зонда немагнитны, что допускает его использование в установках с магнитным полем. Положение зонда измеряется с помощью датчика положения на основе потенциометра, что позволяет осуществить автоматизацию измеряений. Все детали зонда измерений. Все детали зонда измерений измераения и немагнитных материалов, что позволяет применять его в установках с магнитным полем.



Рис.1. Внешний вид прогреваемого подвижного зонда Ленгмюра

Для измерения зондовых характеристик использована АЦП ЛА-50USB, которая отличается небольшой ценой и содержит 8 дифференциальных каналов (16 однополюсных) с разрядностью 10 бит и частотой преобразования до 20кГц. Кроме того, плата содержит цифровой выход, позволяющий использовать её для запуска развертки зонда с компьютера. Питание АЦП обеспечивается от порта USB компьютера.

Расчетное значение измеряемой вольфрамовым зондом длиной 5 мм и диаметром 0,5 мм концентрации водородной плазмы при ее температуре ~100 эВ составляет до 10¹³см⁻³.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ДЛЯ ПЛАЗМО-ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

И.Л.КЛЫКОВ¹⁾, В.А.КУРНАЕВ, <u>В.В.ПЕСКОВ</u>, Е.Г.ШУСТИН¹⁾

В разработанной электронной пушке (рис.1) все вакуумные соединения предполагают использование медных прокладок. Отличие данной электронной пушки от аналогов, применяемых в СВЧ приборах,



Рис. 1. Вид электронной пушки в разрезе: 1 - плоский катод LaB₆ с косвенным нагревом; 2- фланец с электрическими вводами; 3- анод пушки; 4 – перепадная трубка; 5 – водяное охлаждение; 6 - дистанционные кольца; 7 - труба в области катода; 8 - выходной фланец; 9, 10 -откачка турбомолекулярным насосом и подключение вакуумного датчика

заключается в том, что конструкция предусматривает возможность, как периодической замены катода, так и ремонта в случае возникновения неисправностей. Данная пушка работает в газовой среде и предназначена для создания пучка в камере с малым магнитным полем. Жёсткость конструкции при сборке обеспечивается закреплением основных элементов пушки на фланце с сильноточными электрическими вводами и на аноде пушки. фиксирующемся в перепадной трубке. Поскольку перепадная трубка охлаждается водой, тем обеспечивается теплозащита самым анода. Bce элементы в области катода изготовлены из жаропрочного материала - молибдена. В конструкции предусмотрено пушки использование сменных дистанционных колец, при помощи которых можно менять расстояние между катодом и анодом, что в свою позволяет регулировать первеанс пушки. очередь фокусирующих катушек предусмотрен в Монтаж области перепадной трубки и катода, для чего труба в области катода и выходной фланец имеют диаметр 70 MM.

В конструкции предусмотрены разборные фланцевые соединения для откачки турбомолекулярным насосом и подключения вакуумного датчика. Соединение пушки с камерой обеспечивается посредством переходника, представляющего собой двусторонний фланец.

Питание пушки осуществляется через модулятор. Система модуляции необходима для предотвращения перегрева анода пушки, а также обрабатываемого образца выполнена на основе вакуумного триода «ГИ 39б». Схема модулятора приведена на рис.2а. Управление осуществляется с помощью программы LabView 6.0 через стандартный LPT порт компьютера. Интерфейс программы позволяет регулировать длительность импульса и длительность промежутков между импульсами. Программа также позволяет задавать количество рабочих импульсов, ведет подсчет их количества и выводит значение суммарной длительности экспозиции. Интерфейс программы представлен на рис.26.



Рис.2. Принципиальная схема модулятора и интерфейс его управлением

Ускоряющее напряжение до 3 кВ. Ток накала до 20 А. Ток эмиссии до 0.5 А. Диаметр пучка на входе в камеру 1–1,5 см.

ПРОБЛЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В МАТЕРИАЛАХ ТЯР ПО ИТОГАМ ЗАСЕДАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ ПО ФИЗИКЕ ДИВЕРТОРА И ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ В ТОКАМАКАХ (DIV SOL ITPA) 7-9 ЯНВАРЯ 2008 АВИЛА, ИСПАНИЯ

В.А.КУРНАЕВ

Тематика совещания отражена в названиях секционных заседаний, которые были предварительно определены как наиболее важные на данный момент. К ним относятся: (в скобках указаны председатели секций)

- Захват и удаление дейтерия и трития (V.Phillips)
- Физика дивертора и сценарии включая физику отрыва плазмы (W.Fundamenski)
- Тепловые нагрузки в переходных режимах и их подавление (A.Kallenbach)
- Предсказания нагрузок для ИТЭРа и удаление трития (A.Loarte)
- Диагностика ИТЭР (объединенное с диагностической группой заседание) (R.Neu)
- Что можно узнать во время водородной фазы в ИТЭРе?
- Генерация и перенос пыли (S.Krasheninnikov)

Кроме того, обсуждалось сотрудничество международного энергетического агентства (IAE) и ITPA

(N.Asakura) и тематика следующего заседания (B.Lipschultz).

В обзоре автора, представленном на 11 Межотраслевом семинаре по взаимодействию плазмы с поверхностью (МИФИ, 25.01.2008) рассмотрены новые данные, представленные на первой из указанных секций.

Новые вести с установок:

- 1. На имитационной установке PILOT набраны дозы 2 ·10²⁶ м⁻² при очень высокой плотности потока 1,4 ·10²⁴м⁻²c⁻¹ (30 выстрелов). Показано, что на W нет насыщения, что соответствует 3000 импульсов на ИТЭРе, явное свидетельство диффузии по ловушкам, при меньших дозах обнаружен больший захват, (но температура образца и распределение плотности потока были явно недостаточно определены), кроме того признана сильная зависимость от шероховатости мишени.
- В токамаке ASDEX-U из распределения под поверхностью ограничивающих плазму диафрагм установлено, что перенос в этой области определяется углеводородами с высоким коэффициентом прилипания β: 80–90% осадка состоит из



частиц с $\beta = 1$; и 10–20% из частиц с $\beta = 0.2–0.3$ (рис.1). В то время, как перенос частиц с низким коэффициентом прилипания (CD₃) (рис.2) приводит лишь к образованию нескольких монослоев осадка и вносит пренебрежимо малый вклад в накопление дейтерия.



Рис.2

3. Плановая замена обращенных к плазме стенок

токамака ASDEX-U привела к уменьшению переосаждения С в 15 раз и уменьшение захвата D в 10-15 раз. Источниками углерода по мере замены графитовых элементов вольфрамовыми были: при полностью графитовом покрытии- графитовая защита антенн ИЦР нагрева (80%) и приемная пластина внешнего дивертора, при первой стенке из W и графитовом диверторе – перенос С от внешней «ноги» дивертора к внутренней, при полностью W покрытии –осаждение С резко уменьшилось. Осаждение С и соосаждение D на 60% происходит в зоне дивертора и на 20% в зоне откачки (remote area). Захват в W происходит в ловушки, созданные быстрыми ионами и нейтралами перезарядки. Неясным остается вопрос о роли ловушек, которые будут создаваться нейтронами.

4. При исследовании взаимодействия ионов водорода и гелия с W установлено, что ниже порога физического распыления при температуре T< 800 К под поверхностью Могут образовываться блистеры, в то время как при T >1600 К при облучении в гелиевой плазме образуются поры и пузыри субмикронных размеров. А вот в диапазоне 1150–1600 К на поверхности образуются наноразмерные пузыри и вырастает «нанотрава» (рис.3). Механизм этого явления не очень понятен, но очевидно, что



Рис.3 Нанотрава на поверхности катанного W, полученная на симуляторе **PISCES-B** в чистой He плазме: T= 1200 K, t = 4290 c, $2x10^{26}$ He⁺/M², E_i = 25 эB



Рис.4 Содержащие нанонопузырьки элементы «травы», полученные на установке **NAGDIS-II:** Не плазме Ts = 1250 K, t = 36,000 c, $3.5x10^{27}$ He⁺/м², $E_i = 11$ эВ большой вклад дает накопления диффундирующего D и He в дефектах и вакансиях. Толщина слоя нанотравы зависит как корень от времени облучения, что соответствует диффузионным процессам, толщина слоя соответствует $d = (4Dt)^{1/2}$ с $D_{1120 \text{ K}} = 6.6 \pm 0.4 \times 10 - 12 \text{ см}^2 \text{c}^{-1}$ и $D_{1320 \text{ K}} = 2.0 \pm 0.5 \times 10^{-11} \text{ см}^2 \text{c}^{-1}$ при энергии активации ~0.7 эВ.

5. Активно продолжались эксперименты по анализу слоев осажденных в токамаках между элементами, так как именно там ожидалось наибольшее накопление изотопов водорода за счет переосаждения. Особенно целенаправленно исследования ведутся на токамаке TEXTOR. На рис.5 показан элемент

лимитера из этой установки с отчетливо видными осадком толщиной до 10 мкм после 30 импульсов плазмы длительностью по 5 с, повернутый так, что видна щель между плитками в полоидальном (слева) и тороидальном (справа) направлениях. Анализ осадка проводился самыми разными методами (SIMS, NRA/RBS, EPMA). Толщина слоя на дне (~1,1мкм) на порядок больше чем на боковых сторонах (ближе к дну) и состоит в основном из углерода, и на порядок меньшего количества дейтерия.. Причем их количество



Рис.5. Облученный в TEXTOR графитовый тайл

как правило, находится в противофазе. У вершины щели толщина осадка составляет до 20 мкм. Оценки по данным этого эксперимента количества дейтерия захваченного в щелях реактора ИТЭР дает небольшую величину ~ 2,5%.

6. Специальный эксперимент, в котором в одном элементе лимитера были помещены 3 разных образца: графит EK98, CC композиты DMS780 и NB31 (рис.6).. Захват дейтерия, как следует из Рис.7, практически одинаков во всех образцах и близок к данным, полученным на симуляторе PISCES-B.



Рис.6. Составленный из разных углеродных материалов элемент лимитера



 Проведенные оценки и расчеты позволили предсказать, какое колическтво «выстрелов» ИТЭР приведет к накоплению в его материалах предельно допустимой доза трития в 350г (сейчас эта доза оценивается в 700г) (рис.8). Видно, что при изготовлении

стенок из графита предел по тритию будет через 25 превышен импульсов длительностью 400с. При использовании Ве как материала первой стенки. W для ограничивающей вход плазмы в дивертор полоидальной диафрагмы СС композит зоны максимальной выделения как возможно от 200 до 600 мощности выстрелов. И только полностью покрытие вольфрамом всех обращенных к плазме элементов позволяет обеспечить планируемую рабочую кампанию реактора (10000).Правда, при этом не рассматривался возможный захват водорода в ловушки, создаваемые нейтронным облучением. Расчеты американской группы (D.White) снизили этот порог на порядок. Таким образом, этот важнейший вопрос остается открытым.

Рис.7. Захват дейтерия как функция дозы облучения



Рис.8. Зависимость накопления трития в ИТЭРе в зависимости от времени его работы для разных обращенных к плазме материалов

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 14-ГО МЕЖДУНАРОДНОГО КОНГРЕССА ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ В ФУКУОКЕ (ЯПОНИЯ) 8-12 СЕНТЯБРЯ 2008 (ICPP2008)

В.А.КУРНАЕВ

Большой конгресс собрал более 650 участников. Поэтому параллельно работало сразу несколько секций. Были и общие пленарные заседания. Особенностью конгресса явилось широчайшее участие японских исследователей, и особенно молодых, в изучении и применении плазмы для самых разнообразных областей знаний и технологических применений. Краткое перечисление тематики приглашенных докладов отражает современные тенденции в развитии и применениях плазмы.

Конгресс открылся выступлением P.3.Сагдеева, посвященном 50-летней истории термоядерных исследований, в которой огромна роль отечественной науки. Подробно были доложены большие успехи японцев на их большом сверхпроводящем стеллараторе LHD, на котором была получена плотность 10^{15} см⁻³ и температура 6,8 кэВ. Впервые на стеллараторе было получено высокое значение $\beta \sim 5\%$ (и это при разряде, длящемся 54 минуты!), что позволило Канеко говорить о реванше стеллараторов над токамаками. Среди термоядерных «новинок» следует упомянуть подробный обзор сферических токамаков и очень подробный рассказ о новом южнокорейском сверхпроводящем токамаке KSTAR, график работ на котором очень четко скоординирован с программой ИТЭРа. Из «термоядерного блока» интересны были доклады о структуре турбулентностей в токамаках, роли зональных переносов, внутренних барьеров, нелинейной связи между турбулентностью и конвективными ячейками, открытие внутреннего динамо, когда тепловая турбулентность порождает магнитное поле, и переносе «блобов» на краю плазмы.

На конгрессе были представлены чрезвычайно болезненные для токамака-реактора темы: это попытка объяснения необычных и сложных явлений в периферийной плазме и расчеты эрозии стенок. Современное представление о краевой плазме – это ее сложность, неразделимость макро- и мезо- профилей, разный масштаб явлений во времени, перекрывающий 6 порядков по величине. До сих пор вызывают споры природа *H*-моды улучшенного удержания плазмы, связанная с перестройкой всей периферийной зоны плазмы. Для расчета эрозии и перепыления стенок ИТЭРа был использован разработанный Киршнером новый трехмерный Монте Карло код ERO, в котором учитываются процессы и в плазме, и влияние магнитного поля на движение частиц, и моделирование распыления и переноса материала первой стенки. Расчеты показали, что при нормальном режиме бериллиевым стенкам ИТЭРа ничто не угрожает, в то время как время жизни бериллиевых покрытий лимитеров при переходных процессах ограничено.

Проблемы быстрого поджига в системах с инерциальным синтезом были подробно рассмотрены в работе, представленной американцами. На коническую мишень направлялся сверхмощный лазерный импульс, с помощью совершенных систем визуализации и спектральных измерений удалось построить достаточно подробную картину передачи энергии от фотонов к электронам и последующему их взаимодействию с плотной мишенью.

Были затронуты и астрофизические аспекты, из которых следует все большая переоценка плазменного состояния вещества во Вселенной. Сейчас за плазмой осталось только 4%, 74% занимает темная энергии, остальное -темная материя. На первый взгляд, парадоксально звучит словосочетание «лабораторная астрофизика», но генерируемые в лабораторных условиях сверхзвуковые струи с большими числами Маха уже похожи на подобные астрофизические объекты, а лабораторное моделирование радиационных ударов позволяет оттестировать коды, применяемые для описания астрофизических явлений. Совершенно новая и необычная физика обсуждалась (С.Tompson) применительно к магнетарам - нейтронным звездам с экстремально большими магнитными полями (до 10¹²Тл), при которых уровни возбуждения Ландау становятся релятивистскими. Энергия вращения звезды переходит в релятивистский ветер с рождением электронно-позитронных пар. Наблюдаемое необычное поведение магнетаров связано с деформацией внешнего магнитного поля неустойчивостями жесткой корки звезды, которые «перекидывают» токи из внутренней ее части в магнитосферу. При этом возникает релятивистки горячее ядерное облако и происходит ярчайшая вспышка гамма-излучения.

На Земле же рост применений плазмы позволяет уверенно говорить о ее широчайшем вторжении во многие сферы науки и производства.

Очень подробный обзор исследований по физике высоких плотностей энергии, проводящихся в КНР, не только позволил представить масштабы развития этой области науки в Китае, но и дал впечатляющий перечень применений эффектов, возникающих под действием сверхмощных лазерных воздействий на вещество. Среди них: лазерная генерация мэвных пучков ионов, применяемых в лучевой терапии онкологических заболеваний (за счет узкого брэгговского пика выделения энергии в конце пробега частиц), генерация излучения терагерцового диапазона, возбуждение фемтосекундными лазерными импульсами *К* оболочек атомов с генерацией жесткого рентгеновского излучения, прямое возбуждение ядер, астрофизические применения для определения спектров поглощения в рентгеновском диапазоне, имеющие важное значение в астрофизике. При мощности (> 10²³ BT/cм²) можно наблюдать прямое ускорение протонов и ионов, возбуждение вакуума (генерацию электрон-дырочных пар), генерацию пионов и мюонов.

Из обзора по плазменным ускорителям частиц, в которых электроны (или позитроны) ускоряются как при серфинге в электрическом поле кильватерной волны, создаваемой сверхмощным лазером в плазме, следует, что темп ускорения может составлять до 20 ГэВ/м при диаметре пучка 0,1-1 мм. Начиная с 80 года, максимальная энергия частиц на выходе плазменных ускорителей растет экспоненциально по годам (аналог закона Мура), обгоняя по этому параметру обычные ускорители. В ускорителе ULCA использована литиевая плазменная мишень, а энергия электронов на выходе доходит до 100 ГэВ. Преимуществами плазменных ускорителей являются и возможность ускорять позитроны и фокусировать пучок до нанометровых размеров, обеспечивая при этом высокую стабильность и минимальное дрожание пучка.

Один из 9-ти пленарных докладов (P.Chabert) был посвящен многочастотному емкостному разряду, который широко применяется при производстве *IT* компонентов. Многочастотный разряд имеет определенные преимущества в плазменных технологиях. При двух частотах оказывается возможным независимо управлять интенсивностью потока ионов и их энергией, а с помощью третьей частоты можно видоизменять нужным образом функцию распределения по энергиям падающих на подложку ионов. Комбинация двух частот оказывается более эффективной для нагрева электронов в ВЧ двойном слое. Повышение же высшей частоты до пределов, когда ее длина волны оказывается сравнимой с размерами электрода, приводит к тому, что у электрического поля наряду с перпендикулярной электроду компонентой появляются индуктивная - параллельная поверхности, что может снизить однородность разряда – весьма критический параметр при обработке пластин большого диаметра (сейчас происходит переход на пластины с диаметром 450 мм).

Было представлено большое число докладов, в которых описывалось применение плазменных фокусов с малой энергетикой для самых разных целей: и для получения нейтронного выхода в джоульном ПФ, и для моделирования тяжелоионного синтеза, и для генерации мэвных ионов.

Плазма применяется и для создания источника экстремального ультрафиолета (EUV) столь необходимого для перехода к производству чипов с существенно меньшими характерными размерами элементов - порядка десятка нанометров. Для обеспечения малых размеров источника EUV (S.Fujioka) были использованы капли цинка диаметром 20 мкм. С целью повышения эффективности генерации излучения они предварительно нагревались импульсом неодимового лазера мощностью 0,63 кВт и при этом увеличивались до 300 мкм. Последующее их облучение CO₂ лазером с энергией в импульсе 0,3 Дж и длительностью 40 нс приводило к генерации из образовавшегося плазменного облачка 11 мДж излучения с длиной волны 13,5 нм с полушириной в 2%. При частоте повторения 50 кГц это позволило создать источник EUV мощностью 180 Вт с эффективностью преобразования мощности в излучение около 4%.

Костя Остриков из Австралии привел четкие аргументы в пользу огромной перспективности плазменной «нанонауки» как основы многих нанотехнологий. Плазма, по его словам, это именно тот инструмент, который позволяет зафиксировать саморегулирующиеся нанообъекты в нужном нам виде. В частности, им было показано, что в отличие от поатомного инжиниринга плазменное осаждение атомов германия на кремниевую подложку позволяет сразу же создать однородно распределенные квантовые точки.

А. Фридман показал широкий спектр медицинских применений плазмы – от стерилизации инструментов и тканей, до коагуляции крови и лечения многих кожных болезней за счет различного взаимодействия с патогенными биообъектами и живыми тканями. Излучение и активные частицы плазмы служат стимуляторами полезных процессов в плазме крови. Бактерии, как правило, значительно меньше клеток человека, а, значит, соотношение поверхности к объему у них меньше, поэтому, под действием плазмы, в отличие от клеток, они быстро погибают. Как показали исследования, злокачественные клетки меланом после воздействия плазмы продолжают гибнуть еще в течение многих часов.

Интересные применения открывает изучение плазме в жидкой фазе (Т.Капеко). Есть аналогия между биомолекулами и углеродными наночастицами типа фуллеренов и нанотрубок - и те и другие свободно могут находиться в жидкости. Для получения плазмы использовались негорючие ионные жидкости, имеющие исключительно низкую упругость пара, состоящие только из положительных и отрицательных ионов без нейтральных атомов растворителей и имеющих высокую теплопроводность. Разряд постоянного тока зажигался между электродом, помещенном в газе над поверхностью, и электродом внутри жидкости. Удалось не только изучить реакции на границе раздела плазма-жидкость, но и получить наночастицы, а также контролировать их размер, более того, удалось получить углеродные нанокапсулы, содержащие внутри ДНК.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПЕРЕЧЕНЬ ТРУДОВ КАФЕДРЫ ЗА 2008 ГОД

Отечественные журналы

- 1. Кузнецов А.П., Башутин О.А., Бялковский О.А., Вовченко Е.Д, Коротков К.Е., Савёлов А.С.// Интерферометрические исследования динамики электронной плотности плазмы в периферийной области микропинчевого разряда // Физика плазмы, 2008, т.34, № 3, с.219-225.
- 2. Долгов А.Н., Прохорович Д.Е Корпускулярная диагностика как инструмент исследования быстрых зет-пинчей // Прикладная физика, №3, с.52-58.
- 3. Мошкунов К.А., Курнаев В.А. //Эффект уширения энергетических спектров фрагментов молекулярного иона при малоугловом отражении от поверхности// Поверхность, синхротронные и нейтронный излучения// №5 2008 с.34-38
- 4. Когут Д.К, Курнаев В.А., Трифонов Н.Н // Моделирование отражения дейтерия от плазменнонапыленного вольфрама // «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные и исследования» №3 2008, с.7-10
- 5. Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев, Я.А. Садовский. Формирование двухкомпонентных металлических пленок при высоких температурах. Поверхность, 2008, №5, стр. 109-112.
- 6. А.А. Писарев, И.В. Цветков, С.С. Ярко, «Использование приближения эффективного коэффициента диффузии для описания проницаемости водорода через среду с ловушками в различных режимах транспорта», ВАНТ, Сер. Теоретическая и прикладная физика, 2008, вып.1., стр.65-75.
- 7. А.А.Русинов, Ю.М.Гаспарян, А.А.Писарев, Н.Н.Трифонов // Термодесорбция дейтерия из углеродных материалов МПГ-8 и NB-31 после плазменного облучения // Известия РАН, серия физическая, 2008, том 72, № 7, с. 1011–1014
- 8. Сотников В.М.//Эволюция геометрии конуса при ионной бомбардировке// Известия РАН сер.физическая, 2008, Т.72, №5, с636-640
- 9. Сотников В.М. Обобщенная зависимость коэффициента отражения от рельефной поверхности// Поверхность, синхротронные и нейтронный излучения, №5, 2008, с.30-33

Международные журналы

- Nosenko V., Zhdanov S., Ivlev A. V, Morfill G., Goree J, and Piel A. //Heat Transport in a Two-Dimensional Complex (Dusty) Plasma at Melting Conditions Phys. Rev. Lett. 100, 025003 (2008)
- I.A. Shchelkanov, D.S. Naumov, G.V. Krashevskaya, M.M. Tsventoukh, D.E. Vovchenko, G.V. Khodachenko, V.A. Kurnaev «The distributions of plasma parameters in the "Magnetor" device with hot cathode discharge». Принята к публикации в Journal of Physics: Conference Series.
- 12. L.B.Begrambekov, A.A.Gordeev, Ya.A.Sadovsky. Formation of Two-Component Two-Phase metal Films at Elevated Temperatures. Journal of Surface Investigation, 2008, Vol.2, №3, pp.419-422
- 13. D. Douai, D. Garnier, S. Brémond, C. Grisolia, J. Bucalossi, P. Shigin, L.Begrambekov. DC glow discharge conditioning of remote areas in fusion devices. Journal of Physics: Conference Series 100 (2008) 062034
- D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetski, V. V. Saenko, et.al. Stability and Variations of Plasma Parameters in the L-2M Stellarator during Excitation of the Induction Current in the Regime of ECR Plasma Heating Plasma Physics Reports, Vol. 34, No. 12, 2008, p. 979-991.

Международные конференции

- Bashutin O.A., Savjolov A.S., Vovchenko E.D. //Measurements of X-ray spatial distribution on a lowinductance vacuum spark discharge // Abstr. 18th IAEA TM on Research Using Small Fusion Devices, Alushta, 2008, p.31.
- Kurnaev V.A., Krashevskaya G.V., Tsventuckh M.M., Vovchenko D.E., Khodachenko G.V., Salahutdinov G.H. //Plasma confinement in the compact double-dipole magnetic trap// Abstr.14th Inter. Congress on Plasma Physics, Sept. 8-12 Fukuoka 2008, p79
- Kurnaev V.A., Vizgalov I.V., Gutorov //K.M.//Excitation of helicon modes due to dynatron instabilities of plasma-surface interaction // Abstr.14th Inter. Congress on Plasma Physics, Sept. 8-12 Fukuoka 2008, p194
- 4. Ivanov I.V., Mozgrin D.V., Petrov D.P., Snegirev A.M., Fetisov I.R., Shukshina T.V. Pulsed probe diagnostics of a high-current low pressure discharge in crossed E[H fields with Al cathode in oxygen containing mixture,//Abstract of 3-d intern.workshop on plasma physics 30June-5July 2008. P51
- Khodachenko G.Mozgrin D.Fetisov I. Impulse plasma magnetron technology,// Abstract11 thy Intern. Conf. on plasma Surface Engineering PSE2008? 15-19 Sept. 2008, Garmisch- Partenkichen (Germany) P122

- 6. Atamanov V., Khodachenko G, Mozgrin D. Krashevskaya G.//Creation and modification for nanostructurized surfaces of al foil in the plasma of stationary and impulse magnetron discharge, ibid,P.428
- M.M. Tsventoukh, Equilibrium and stability of the plasma confined by double-dipole device, Proc, 35th European Physical Society (EPS) conference on Plasma Physics, 9-13 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece, P-4.057.
- A. Pisarev, T. Tanabe, B. Emmoth, N. Trifonov, A. Rusinov, S. Stepanov, Yu. Gasparyan, A. Spitzyn, B. Khripunov // Deuterium accumulation in carbon materials at high fluence // 18th international conference on plasma surface interactions, Spain, Toledo, May 26-30, P2-72
- A.Airapetov, L.Begrambekov, C.Brosset et al. Deuterium trapping in Carbon Fiber Composites under high fluence. Book of Abstract of 18th Internal Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (PSI1). (Toledo, Spain, May 25 – 29, 2008.). P. 52
- L.B. Begrambekov. Sources and driving forces of hydrogen trapping in carbon materials and thin films under low-energy irradiation. 9th workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials. Salamanca 2-3 June, 2008.
- L.B. Begrambekov, A.S. Kuznetsov, P.A. Shigin . Hydrogen trapping in depositing carbon films. Book of Abstract of 18th Internal Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (PSI1). (Toledo, Spain, May 25 – 29, 2008). P. 78.
- 12. Yu.M.Gasparyan, et al.// Ion-driven deuterium permeation through tungsten at high temperatures // 18th International Conference on Plasma Surface Interactions
- 13. Yu.M.Gasparyan, et al.// The comparison of permeation and TDS experiments with polycrystalline tungsten // 9th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, Salamanca, Spain, 2-3 June 2008

Отечественные конференции

- Визгалов И.В., Клыков И.Л., Курнаев В.А., Песков В.В., Шустин Е.Г. Инжектор электронов для плазмохимического реактора на основе пучково-плазменного разряда. 35-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 11 – 15 февраля 2008 г. – М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2008 г. – 354 с.
- Саенко В.В, Сарксян К. А., Скворцова Н. Н. // Статистическая обработка флуктуационных потоков в периферийной области плазмы, там же с.91
- 3. Беграмбеков Л.Б, Будаев А.П., Бужинский О.И, Родионов Н.Н, Отрощенко В.Г.// Аналитический зондовый комплекс для исследования влияния примесей на эффективность ВЧ нагрева. Там же, с
- 4. Малахов Д.В., Саенко В.В., Скворцова Н. Н., Батанов Г. М, Петров А.Е., Пшеничников А.А, Сарксян К.А., Харчев Н. К. // Частотные спектры и вероятностные параметры флуктуаций плотности плазмы, измеренные доплеровским рефлектометром в ЭЦР-плазме с дополнительным индукционным током в стеллараторе Л-2М, там же, с.89
- 5. Цвентух М.М. // "Равновесие плазмы согласованное с конвективной устойчивостью", там же, С.96.
- 6. Цвентух М.М. // "Амбиполярный транспорт плазмы в области слабого поля вблизи сепаратрисы двухдипольной ловушки". Там же. С.98.
- 7. Цвентух М.М. // "Использование внутренних витков для стабилизации плазмы в замкнутой гофрированной системе". Там же. С.97.
- Башутин О.А., Бялковский., Кузнецов А.П., Равлина Е.А., Савёлов А.С. Интерферо-метрические исследования плотности плазмы в периферийной относительно оси микро-пинчевого разряда области // Тез.докладов 2-ой Всероссийской школы по лазерной физике и лазерным технологиям, г.Саров, 23-25 апреля 2008г.
- 9. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Экспериментальное наблюдение взаимосвязи процессов на электродах и в межэлектродном промежутке микропинчевого разряда // там же, с.
- 10. О.А. Башутин, Е.Д. Вовченко, А.С. Савёлов Исследование рентгеновского излучения низкоиндуктивной вакуумной искры // Материалы VI Российского семинара "Современные методы диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды" г.Москва, 22-24 октября 2008 г.с.
- 11. Кирко Д.Л., Савёлов А.С. //Оптимизация излучательных характеристик факела капиллярного разряда // там же, с.

- 12. Долгов А.Н., Земченкова Н. В. Наумов В. В. Прохорович Д.Е., Корпускулярная диагностика в качестве инструмента исследования процессов в быстром Z-пинче // там же с.
- Курнаев В.А. Основные итоги 14-го международного конгресса по физике плазмы 8-12 сент. 2008 Фукуока. Там же с 5.
- В.М.Жданов //Расширенная неравновесная термодинамика многокомпонентных сред: методы и применение // Тезисы докладов 12-й Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ, Москва, 7-10 октября 2008
- 14. А.А. Русинов, ю.м. гаспарян, н.н. трифонов, а.а. Писарев, с.о. Степанов // Стенд для проведения термодесорбционной спектроскопии // Научно-техническая конференция «Гелий и водород в реакторных материалах», Москва, январь 2008
- 15. Д.И.Матвеев, И.В.Цветков, «Многомасштабное моделирование взаимодействия плазмы с поверхностью», I Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях», Сб. тезисов докладов, Москва, 2008. с.315,
- 16. Л.Б.Беграмбеков, О.И.Бужинский, А.М.Захаров, А.А.Кузьмин Высокотеплопроводный графит РГТ с боркарбидным защитным покрытием в качестве материала первой стенки токамаков. Всероссийский семинар. «Физические и технические аспекты объемного источника термоядерных нейтронов для материаловедческих, технологических исследований, испытаний и трансмутации минорных актинидов(VNS)» Звенигород, 7-9 Октября,2008.
- 17. Kurnaev V.A. The features of education in plasma physics and nuclear fusion at Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI) Presentation on the Erasmus Mundus Summer Event, Madrid, July 2008
- 18. КурнаевВ.А..// Научная школа (НШ6465) в исследовательском ядерном университете (МИФИ). Доклад на конференции по вопросам развития научных школ и привлечения молодых ученых и специалистов. Ростов на Дону, 19 ноября 2008

Учебные пособия

- 1. Беграмбеков Л.Б.//Процессы в твёрдом теле под действием ионного и плазменного облучения» Учебное пособие. М. МИФИ, 2008. 196с
- 2. Вовченко Е.Д., Кузнецов А.П., Савелов А.С. //Лазерные методы диагностики плазмы. Учебное пособие. М, МИФИ. 2008, 204c
- 3. Готт Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л. Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы //Учебное пособие / Под ред.. В.А.Курнаева М.: МИФИ 2008, 144с
- 4. Жданов В.М. //Явления переноса в газах и плазме// Учебное пособие М.: МИФИ 2008, 340с
- 5. Кирнева Н.А.// Современные исследования на установках Токамак// Учебное пособие М, МИФИ, 2008,96c
- Курнаев В.А., Протасов Ю.С, Цветков И.В.// Введение в пучковую электронику// Учебное пособие / Под ред. В.А.Курнаева.- М.: МИФИ 2008, 452 с.
- 7. Курнаев В.А.// Плазма.ХХІ век// Популярное издание М.: МИФИ 2008, 88 с.
- 8. Писарев А.А.и др.// Проницаемость водорода через металлы// Учебное пособие М, МИФИ, 2008.,96с.
- 9. Методы генерации и диагностики плазмы //Учебное пособие, Ред. И.В. Визгалов.- М, МИФИ, 2008.,200c
- 10. Сборник задач по физической электронике и физике плазмы, Учебное пособие М, МИФИ, 2008.,96с.

Издания кафедры

- 1. Годовой отчет по НИР за 2007 год (ISBN 978-5-7262-0773-5) Ред.В.А.Курнаев М.МИФИ 2008, 36с.
- Материалы VI Российского семинара "Современные методы диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды" г.Москва, 22-24 октября 2008 г.М. МИФИ, 43с.
- +7 докладов были представлены на научной сессии МИФИ 2008 и опубликованы в ее трудах.
- + В годовом отчете кафедры по НИР за 2007 М, МИФИ, 2008 опубликовано 32 работы.

Научно-организационные мероприятия, проведенные кафедрой в 2008г.

- 1. Секция "Физика плазмы" в научной сессии МИФИ-2008, Москва, 24-25 января 2008 г.
- XI Межотраслевой семинар "Взаимодействие плазмы с поверхностью", Москва, 25 января 2008г. (выпущен CD – диск). (см. Приложение 1 - краткую информацию о итогах работы семинара)

- 5-ый Российский семинар по современным методам диагностики плазмы и их применения для анализа веществ и окружающей среды 22-24 октября 2008 года, МИФИ (см. Приложение 2 – краткую информацию об итогах работы семинара)
- 4. Торжественный вечер и семинар, посвященный 100-летию академика Л.А.Арцимовича 25 февраля 2009 г.

N⁰	Фамилия И.О.	Руководитель	Тема дипломного проекта	Распределение	
	T12-21				
1	Белогорцев Глеб Андреевич	Трифонов Н.Н. МИФИ	Моделирование изменения топографии поверхности за счет распыления и перепыления при ионном облучении	ООО «ИПК Медиа продакшн»	
2.	Быстров Кирилл Евгеньевич	Тилинин Г.И., РНЦ КИ	Разработка активной спектроскопической диагностики ионной температуры плазмы на токамаке T-10	Магистратура Эразмус Мундус	
3.	Голиков Андрей Альбертович	Мещеряков А.И. ИОФРАН	Измерение сопротивления излучения полоидальной антенны и спектра быстрой магнитозвуковой волны при ИЦР нагреве плазмы на стеллараторе "Ливень-2М"	ИОФРАН (аспирантура)	
4.	Губарев Илья Валерьевич	Кирнева Н.А. РНЦ КИ	Исследование динамики профиля плотности плазмы в токамаке T-10	РНЦ КИ (Курч. ин-т)	
5.	Ильин Алексей Николаевич	Афонин О.Н., ФИАН	Отработка спектроскопического ме- тода обнаружения микротечи воды на вакуумной установке "Течь"	ЗАО «Авалон импорт»	
6.	Колеров Сергей Борисович	Голубев А.А. ИТЭФ	Коллимация Ферми в экспериментах по протонной радиографии плазменных объектов	ФГУП РФ «ГНЦ ИТЭФ»	
7.	Кузнецов Евгений Игоревич	Крылов С.В., РНЦ	Модернизация болометрического комплекса токамака T-10	РНЦ КИ	
8.	Москачева Анна Александровна	Подковыров В.А ТРИНИТИ	Экспериментальное исследование влияния внешнего продольного магнитного поля на работу квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя	ФГУП «ГНЦ ТРИНИТИ»	
9.	Наумов Денис Сергеевич	Ходаченко Г.В., МИФИ	Измерение потоков плазмы на установке "Магнетор"	Госучреждение	
10.	Пахомова Екатерина Александровна	Климов Н.С., ТРИНИТИ	Исследование баланса энергии источника излучения на базе установки КСПУ	ФГУП РФ ГНЦ ТРИНИТИ	
11.	Песков Вадим Вячеславович	Курнаев В.А. МИФИ	Взаимодействие плазмы с поверхностью непроводящего образца в пучково-плазменном разряде в слабом магнитном поле	ФИРЭ РАН (аспирантура)	
12	Самохвалова Евгения Сергеевна	Визгалов И.В., МИФИ	Плазменный генератор на основе автоколебательного геликонного разряда	ФИПС (Фед. ин-т пром. собств.)	
13	Свешникова Элеонора Александровна	Мозгрин Д.В., МИФИ	Сильноточные формы разряда низкого давления с Al катодом в смеси инертных и реактивных газов	Минэкономразвития	
14	Сизова Валерия Павловна	Савелов А.С. МИФИ	Источник микропинчевой плазмы типа низкоиндуктивная вакуумная искра		
15.	Степанов Станислав Олегович	Писарев А.А. МИФИ	Исследование захвата и обратного газо- выделения ионно-имплантированного дейтерия из вольфрама методом ТДС	ЗАО «Авалон импорт»	

5. **ДИПЛОМНЫЕ ПРОЕКТЫ, ЗАЩИЩЕННЫЕ СТУДЕНТАМИ КАФЕДРЫ В 2008 ГОДУ С** ПРИСВОЕНИЕМ КВАЛИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕР-ФИЗИК

N⁰	Фамилия И.О.	Руководитель	Тема дипломного проекта	Распределение
16.	Шершнев Евгений	Молотков В.И.,	Экспериментальное исследование плаз-	ИВТАН РАН
	Александрович	ИВТАН	менно-пылевых структур при	
			воздействии импульсного магнитного	
			поля	
17.	Щелканов Иван	Ходаченко Г.В.,	Распределение параметров плазмы	Аспирантура
	Анатольевич	МИФИ	разряда в скрещенных электрическом и	МИФИ
			магнитном полях на установке	
			"Магнетор"	
18.	Якубов Рифат	Борщеговский	Использование представления плоской	РНЦ КИ
	Равилевич	A.A.,	волны в виде набора цилин-дрических	
		РНЦ КИ	волн для анализа экспериментов по	
			предионизации на 2 ^{ой} гармонике ЭЦР	
			на установке Т-10	
			E12-04	
1.	Кузнецов Алексей	Беграмбеков	Захват водорода напыляемыми	Аспирантура
	Сергеевич	Л.Б., МИФИ	углеродными слоями	(FOM, Нидерланды)
2.	Кузьмин Арсений	Беграмбеков	Анализ захвата и удержания изотопов	Аспирантура
	Александрович	Л.Б., МИФИ	водорода в тайлах токамака TORE	МИФИ
			SUPRA	
3.	Никандров	Спицын А.В.,	Газовая проводимость графитов	РНЦ КИ
	Александр	РНЦ КИ	используемых в термоядерных	
	Сергеевич		реакторах	
6.	Попова Елена	Саврухин П.В.,	Изучение быстропеременных	Аспирантура
	Владимировна	РНЦ КИ	возмущений плазмы во время срывов в	МИФИ
			токамаке Т-10	
7.	Садовский Ярослав	Беграмбеков	Захват и удержание кислорода в	Аспирантура
	Александрович	Л.Б.	графите и углеродных материалах в	МИФИ
	-	МИФИ	зависимости от условий внедрения	
8.	Смирнов Сергей	Курнаев В.А.,	Разработка и калибровка сферического	Аспирантура
	Владимирович	МИФИ	дефлектора	



В день защиты дипломов 28.02.2008.. в первом ряду (слева направо): А.С.Савелов, В.С.Стрелков, В.А.Храбров, Н.Г.Ковальский, Б.А.Трубников, С.Ф.Перелыгин, В.А.Иванов, В.А.Курнаев, Л.Б.Беграмбеков

СПИСОК СОТРУДНИКОВ И АСПИРАНТОВ КАФЕДРЫ

Акишев Ю.С.

Воронов Г.С.

Голубев А.А.

Иванов В.А.

Кирнева Н.А.

Кутеев Б.В.

Мирнов С.В.

Мозгрин Д.В.

Морозов Д.Х.

Стрелков В.С.

Трубников Б.А.

Храбров В.А.

Черковец В.Е.

Наумов В.Г.

Ильгисонис В.И.

Штатные преподаватели

проф.
доцент
проф.
доцент
ст. преп.
доцент
доцент ^{*)}
проф., зав. каф.
проф.
доцент
профессор
доцент
доцент
проф.
доцент

Совместители

проф. (ТРИНИТИ) доцент (ИОФ РАН) проф. (ИТЭФ) доцент (ИОФ РАН) доцент (ИЯС РНЦ) доцент (ИЯС РНЦ) Ковыльникова В.Н. ст. преподаватель проф. (ИЯС РНЦ) проф. (ТРИНИТИ) доцент (Минобрнауки) проф. (ИЯС РНЦ) проф. (ТРИНИТИ) проф. (ИЯС РНЦ) проф. (ИЯС РНЦ) проф. (ИЯС РНЦ) проф. (ТРИНИТИ)

Научный сектор

Бандурко В.В.	C.H.C.
Башутин О.А.	H.C.
Борисюк Ю.В.	инж. 1 кат.
Вайтонис В.В.	M.H.C.
Вергазов С.В.	H.C.
Визгалов И.В.	C.H.C.
Вовченко Е.Д.	C.H.C.
Гриднева Е.А.	H.C.
Иванов И.В.	вед. инж.
Калачев А.М.	инж.
Коборов Н.Н.	M.H.C.
Кондаков В.В.	C.H.C.
Королев Л.В.	H.C.
Перелыгин С.Ф.	C.H.C.
Политыко И.В	инж. 1 кат.
Смирнов В.М.	в.н.с,
Сотников В.М.	C.H.C.
Урусов В.А.	H.C.
Ходаченко Г.В.	C.H.C.
Шигин П.А.	инж. 2 кат.

Учебно-вспомогательный персонал

зав. уч. лаб.
инж. 1 кат.
ст. лаборант

Аспиранты Айрапетов А. Вовченко Д.Е. Гаспарян Ю.М. Гуторов К.М. Земченкова Н.А. Калинникова Е.И. Кузьмин А.А. Колтунов М.В. Матвеев Д.И. Мошкунов К.В. Попова Е.А. Садовский Я. Русинов А.А. Цвентух М.М. Шукшина Т.В. Щелканов И.А. Ярко С.С.

Докторанты Саенко В.В.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ РАБОТ

Альмут В. Айрапетов А.А. Барышев О.А. Башутин О.А. Беграмбеков Л.Б. Бойко С.А. Быков И.О. Визгалов И.В. Вовченко Е.Д. Гаспарян Ю.М. Голубева А.В. Гордиенко Д.В. Гуторов К.М. Гриднева Е.А. Долгов А.Н. Егоров И.Д. Жданов В.М. Земченкова Н.В.	31 28, 29 9 12, 20 28, 29 19 14 15 12 21, 22, 23, 24, 25, 27 27 9 15 34, 36 9 36 8 9	Салахутдинов Г.Х. <u>Светлов Е.А.</u> <u>Синельников Д.Н.</u> Смирнов В.М. <u>Соколов А.Ю.</u> Татаринова Н.В. Трифонов Н.Н. Урусов В.А. Химченко Л.Н Хрипунов Б.И Ходаченко Г.В. Цвентух М.М. Цветков И.В. Шигин П.А. Шигин П.А. Шукшина Т.В. Щустин Е.Г. Щелканов И.А.	19, 20 20 16 5 10, 11, 17 16 21, 22, 23, 30 18 28 22 10, 11, 17, 32 6, 7, 19 26 28, 29 31 10, 11, 17 33, 37 10, 11, 17, 32
Иванов И.В. Исаев Н.В. Камнева С,А, Кирко Д.Л. Клыков И.Л. Коборов Н.Н.	17 33 28, 35 13 37 34	Якоб В.	31
<u>Когут Ц.К.</u> Кондаков В.В. Крашевская Г.В. <u>Кузьмин А.А.</u> Курнаев В.А.	30, 35 5 10, 11, 19, 32 28, 29 14, 16, 18, 19, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40		
Линдиг С.И. Маер М. <u>Мамедов Н.А.</u> <u>Маренков Е.Д.</u> <u>Маркина Е.А.</u> Мозерин Д.В.	23 22, 23, 24, 25, 27 34 26 15 11		
<u>Мошкунов К.А.</u> <u>Наумов В.В.</u> Новиков Д.А. <u>Песков В.В.</u> Перелыгин С.Ф. <u>Петров, Д.Б.</u> Пинаева И А	31 9 14 33, 37 5, 21, 22, 23, 36 17 20		
Писарев А.А. Прохорович Д.Е. <u>Пьянков П.Д.</u> Расински М. Рот И. <u>Русинов А.А.</u> Савелов А.С. Савелов В.А.	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 32 9 21 24, 25 22, 23, 24, 25, 27 21, 22, 23, 31 12, 13 20		
<u>Садовский Я.С</u> .	29		

Подчеркнуты фамилии студентов

Программа

11 межотраслевого семинара по взаимодействию плазмы с поверхностью в установках УТС - МИФИ 25 января 2008 г. (корпус И, ауд. И207)

1. 10.10 - 10.30 **В.А.Курнаев (МИФИ)** «Итоги заседаний DIV SOL ITPA и программного комитета конференции PSI-2008»

2. 10.40 –11.00 **Химченко Л.Н.(РНЦ КИ)** Развитие Европейской программы по взаимодействию "плазма-стенка" по материалам 6 совещания Координационного комитета 29-31 Октября 2007г

3. 11.10-11.30 С.В.Мирнов (ТРИНИТИ) «Предложения по использованию лития в ИТЭРе»

кофе 11.40 –11.55

4. 11.55-12.15 **О.И.Бужинский, В.Г.Отрощенко, В.А.Барсук** «Генерация возобновляемых боркарбидных покрытий в рабочих разрядах Т-11М»

5. 12.20- 12.35 Л.Н.Химченко¹, В.М.Гуреев1, А.М.Житлухин², С.А.Камнева¹, Н.С.Климов², В.И.Крауз¹, Б.В.Кутеев¹, В.Л.Подковыров² + ЕFDA team. "Образование фрактальной нанопыли и модификация поверхности в экспериментах с большими потоками энергии" ¹⁾РНЦ КИ, ²⁾ТРИНИТИ

6. 12.40 –12.55 В.П. Будаев (РНЦ КИ) "Свойства потенциального поля над реальной негладкой поверхностью в токамаке"

перерыв на обед 13.05-14.00

7. 14.00 –14.20 **Л.Беграмбеков, А.Айрапетов, О.Фадеева, Р.Шигин, А.Захаров (МИФИ)** "Особенности захвата водорода в графитовые материалы и углеродные слои в зависимости от условий имплантации"

8.14.25 –14.45 В.Л. Буховец, А.Е. Городецкий, Р.Х. Залавутдинов, А.П. Захаров (ИФХ РАН) «Влияние добавки аммиака на осаждение а-С:Н пленок в тлеющем разряде"

9. 14.50 – 15.05 **А.В.Маркин (ИФХ РАН)** Влияние добавок азота и анализ переосажения углерода в щелях на установке PSI-2 (Берлин).

кофе 15.10 –15.25

10. 15.25 –15.45 **Н.С.Климов, В.Подковыров, А.М.Житлухин и др. (ТРИНИТИ)**+ **ЕFDA team** «Исследование на ускорителе КСПУ эрозии ОПЭ при нагрузках, соответствующих переходным режимам в ИТЭРе».

11. 15.50 -16.10 С.Л.Канашенко (ИФХ РАН) "Исследование структуры нержавеющей стали, содержащей радигенный гелий"

12. 16.15-16.35 **Н.В.Волков, Б.А.Калин, В.Л.Якушин (МИФИ)** «Интерметаллиды и градиентные материалы как альтернативные материалы термоядерных реакторов»

16.40-17.40 – дискуссия

Программа

VI Российского семинара «Современные методы диагностики плазмы и их примените для контроля веществ и окружающей среды» 22-24 октября 2008 актовый зал МИФИ

время	ПОКЛАЛ	СТР**)	
10.00	ДОКЛАД		
10.00			
10:20	В.А.Курнаев ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 14-ГО МЕЖДУНАРОДНОГО КОНГРЕССА ПО ФИЗИКЕ ПЛАЭМИ В ФУКУОКЕ 8-12 СЕНТИЕРИ. (ССРОЗОВО)	114	
	ПЛАЗМЫ В ФУКУОКЕ 8-12 СЕНТЯБРЯ (ІСРР2008)		
10.50	М.В. Иванцивскии, А.В. Бурдаков, Л.Н. Вячеславов, В.В. Поступаев,	7	
10:50	50 С.С. Попов, А.Ф. Ровенских, А.Д. Хильченко СИСТЕМА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3		
11:10	Ю.В.Готт, М.М.Степаненко НИЗКОВОЛЬТНАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА	5	
11:30	КОФЕ		
11:50	С. Тугаринов, Е. Делабье, Р. Джасперс, Н. Науменко, М. фон Хеллерман АКТИВНЫЕ КОРПУСКУЛЯРНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УСТАНОВКЕ «TEXTOR» В ПОДДЕРЖКУ ПРОГРАММЫ СОЗДАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИТЭР	4	
	В.А. Красильников, Ю.А. Кащук, В.Н. Амосов,		
12:10	Д.А. Скопинцев ЦИФРОВОЙ АЛМАЗНЫЙ СПЕКТРОМЕТР БЫСТРЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ	15	
	А.А. Петров, В.Г. Петров, А. Ю. Малышев, Е.П. Горбунов,		
12:30	Ю.В. Скосырев ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РЕФРАКТОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СРЕДНЕЙ ПО ХОРДЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ Т-10	18	
	А.Л.Соломахин, П.А.Багрянский, Р.В.Воскобойников, А.А.Лизунов,		
12:50	А.Н.Квашнин, Ю.В.Коваленко, А.Д.Хильченко. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ	130	
13:10	ПЕРЕРЫВ		
14:10	С.Г.Гаранин МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ РФЯЦ ВНИИЭФ		
14:40	Д.Н.Литвин КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ НА МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ВНИИЭФ		
15:00	Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ПЛАЗМЫ В ОКРЕСТНОСТИ ТОКОВОГО СЛОЯ	17	
15:20	Д.А. Скопинцев, Ю.А. Кащук Сцинтилляционный цифровой спектрометр термоядерных	22	
15 40	пентронов		
15:40	KUQE		
16:00	Л.Б.Беграмбеков, В.В. Крутиков МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ ТОКАМАКАТ11-М	98	
16:20	С.А.Бойко, Г.В.Крашевская, Г.Х.Салахутдинов, М.М.Цвентух ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ «МАГНЕТОР»	32	
16:40	Д.Б. Абраменко, О.Н.Афонин	63	

СРЕДА 22 ОКТЯБРЯ 2008 г.

	ОБНАРУЖИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ «СКРЫТЫХ» МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ	
17:00	В.О.Герман, А.П. Ершов, П.В.Козлов, Г.А.Любимов, П.В.Копыл, О.С.Сурконт ЗОНДОВАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СВОБОДНОГОРЯЩЕЙ ДУГИ В АТМОСФЕРЕ	54

ЧЕТВЕРГ 23 ОКТЯБРЯ 2008 Г.

ВРЕМЯ	ДОКЛАД	CTP.
10:00	И.Б.Семенов, Н.Л.Марусов ПРИМЕНЕНИЕ ГРИД-ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	
10:35	В.Г. Петров ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ПО ДАННЫМ ДВУХЧАСТОТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ РЕФРАКТОМЕТРИИ ПЛАЗМЫ	20
11:05	С.В. Гасилов, А.Я. Фаенов, Т.А. Пикуз, И.Ю. Скобелев О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОРОТКОЖИВУЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ	35
11:25	Е.О.Баронова, М.М.Степаненко, А.М.Степаненко ОДНОКРИСТАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР – ПРИНЦИП РАБОТЫ И ТЕСТИРОВАНИЕ	38
11:45	КОФЕ	
12:05	С.С. Ананьев, С.А. Данько РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕННОГО ХОДА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ИОНОВ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА УСТАНОВКЕ С-300	42
12:25	О.А. Башутин, О.А. Бялковский, А.П. Кузнецов, А.Е. Равлина, А.С. Савёлов ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА ОБЛАСТИ	122
12:45	Л. А. Дроздов, Л. М. Василяк, С. В. Костюченко ИЕТОДИКА УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСА РТУТНЫХ ЛАМП НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ	60
13:05	Е.А.Вещев, Т.Озаки, П.Р.Гончаров, Ш.Судо*) ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ С ПОМОЩЬЮ МНОГОХОРДОВОГО (40 ЛУЧЕЙ) АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛОВ	26
13:25	ПЕРЕРЫВ	
14:25	Г.С.Воронов НОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ КРАЕВОГО ТРАНСПОРТНОГО БАРЬЕРА ПО ИЗМЕ-РЕНИЯМ РАДИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИИ Н _а	10
14:55	Л.М. Василяк, Е.В. Жадина, Д.Н. Поляков ВЛИЯНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ	57
15:15	В.К. Гончаров, П.И. Веренич, К.В. Козадаев, М.В. Пузырев ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ МЕТАЛЛОВ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ	74
15:35	В.П. Фокеев ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА НА МАХОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ	68
15:55	КОФЕ	

	В.М. Градов, А.М. Зимин, С.Е. Кривицкий, А.В. Шумов			
16:15	СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ	71		
	МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА			
	Ю.А. Лебедев, В.А. Шахатов			
16:35	ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ПОУРОВНЕВАЯ СТОЛКНОВИТЕЛЬНО –	51		
	ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОИ ДИАГНОСТИКИ	01		
НЕРАВНОВЕСНОЙ АЗОТНОЙ И ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ				
	Ю.Б. Котов, Т.А. Семенова, В.Ф. Федоров			
16.55	О МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКЕ	100		
10:55	ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОЙ ИСТОЧНИКОМ	100		
	ү-ИЗЛУЧЕНИЯ			
	Д.В. Ситанов, В.И. Светцов, М.Ю. Ивентичев			
17:15	ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ГИБЕЛИ АТОМОВ В ПЛАЗМЕ	77		
	ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ НА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С	//		
	ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МЕТОДИКИ			

ПЯТНИЦА 24 ОКТЯБРЯ 2008 Г.

ВРЕМЯ	ДОКЛАД	CTP.
10:00	М.А. Пушкин, П.В. Борисюк, В.И. Троян, В.Н. Тронин, В.Д.Борман ВОЗМОЖНОСТИ СВВ КОМПЛЕКСА MULTIPROBE MXPS RM VT AFM-25 ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ И НАНОСТРУКТУР МЕТОДАМИ СЗМ И РФЭС	119
10:30	С.А. Камнева ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АТОМНО-СИЛОВОЙ И ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ПЛАЗМЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ	109
10:50	О.И.Бужинский, Р.О.Бужинский, К.И.Земсков, А.А.Исаев, В.В.Савранский ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ УСИЛИТЕЛЯ ЯРКО-СТИ НА ПАРАХ МЕДИ, ЧЕРЕЗ ПЛАЗМУ ДУГОВОГО РАЗРЯДА	66
11:10	В.В. Песков, Н.В. Исаев, В.А. Курнаев, Е.Г. Шустин ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С НЕПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ ПРИ СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	84
11:30	КОФЕ	
11:50	И.Ш.Абдуллин, В.С.Желтухин, И.Р.Сагбиев, М.Ф.Шаехов ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИОНОВ И ИОННОГО ТОКА НА ПОВЕРХНОСТЬ ОБРАЗЦА В ВЧ РАЗРЯДЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ	79
12:10	О.Л.Вайсберг, Г.В.Койнаш ПАНОРАМНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ	106
12:30	В.А. Курнаев, В.А. Урусов Сравнительный анализ режимов работы спектрометров с предварительным замедлением	127
12:50	СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	

программа стендовых докладов

ДОКЛАД	CTP.
О.А. Башутин, Е.Д. Вовченко, А.С. Савёлов	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	45
НИЗКОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ	
И.А. Бориев	
СВОЙСТВА ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ	95
СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ:	

СВЯЗЬ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ ИМПУЛЬСА ПЕРЕНОСА СО ВРЕМЕНЕНМ	
СВОБОДНОГО ПРОВЕГА ЭЛЕКТРОНОВ И КОРРЕКТНЫИ РАСЧЕТ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗ ИЗМЕРЯЕМОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ТОКА	
СБ Заякина	
СПЕКТРАЛЬНАЯ ЛИАГНОСТИКА ЛУГОВОГО ЛВУХСТРУЙНОГО	
ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО	111
АНАЛИЗА	
Д.Л.Кирко, А.С.Савёлов	
ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАКЕЛА	87
КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА	
А.И. Скибенко, Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, Ю.В. Ларин	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТНЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	92
ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОИ В СМЕСИ ТЯЖЕЛЫХ ГАЗОВ И ПАРОВ	/2
МЕТАЛЛОВ, МЕТОДАМИ СВЧ ДИАГНОСТИКИ	
Ю.А. Лебедев, Т.Б. Мавлюдов, В.А. Шахатов	00
ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОИ ПЛАЗМЫ	89
ЭЛЕКТРОДНОГО СВЧ-РАЗРЯДА	
Паперныи В.Л., Черных А.А.	
	124
VCKOPEHHLIY MOHOR	
Е.П. Прокопьсь, Б.П. Графутин, А.Ф. Захаров, Т.Л. Развичкова. С.П. Тимошенков. Ю.В. Фунтиков	
ВОЗМОЖНОСТИ ПОЗИТРОННОЙ ЛИАГНОСТИКИ ЛЛЯ ИССЛЕЛОВАНИЯ	103
ПЫЛЕВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ	
А.Н. Лолгов. Н.В. Земченкова, В.В. Наумов.	
Д.Е. Прохорович	40
КОРПУСКУЛЯРНАЯ ДИАГНОСТИКА В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТА	48
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В БЫСТРОМ Z-ПИНЧЕ	
О.А. Башутин, Е.Д.Вовченко, Э.И. Додулад, А.С. Савёлов, Г.Х.	
Салахутдинов, С.А.Саранцев, Е.В. Светлов	132
О ПРИМЕНЕНИИ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ	132
ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ Z-ПИНЧА В МИФИ	
Д.Е.Вовченко, Г.В.Крашевская, Д.С.Наумов, И.А.Щелканов	
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В БИДИПОЛЬНОИ	28
МАГНИТНОИ ЛОВУШКЕ «МАГНЕТОР»	
Д. И.Словецкий	
ВОЗБУЖДЕННЫЕ АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ В ДИАГНОСТИКЕ АЗОТНОЙ	
Marneene A Turrueneuwi Ch Schulz I Meuet	
м. матвсева, А. Литновский, Сп. эспиг, L. Магос, Л. Романов *)	
А. ГОМАНИК Ј ИССЛЕЛОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЧИСТКИ ЛИАГНОСТИЧЕСКИХ	
ЗЕРКАЛ ІТЕК С ПОМОШЬЮ ЭПР РАЗРЯЛА	
14.00 ЗАКРЫТИЕ	

*) Доклады представлены и обсуждены в онлайновом режиме с помощью системы SKYPE.

**) Номера страниц в сборнике трудов семинара.

Краткое резюме семинара

Целью проведения VI Российского Семинара "Современные методы диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды", в шестой раз проведенного в МИФИ кафедрой физики плазмы, являлся обмен информацией по всем аспектам диагностики как высокотемпературной, так и низкотемпературной плазмы, а также обсуждение и анализ различных методов диагностики и возможности их применения в современных производственных технологиях, экологии, медицине и других областях знаний. Данная конференция с самого начала была задумана как школа-семинар, в рамках которого предполагалось предоставление возможности молодым специалистам из различных научных центров и вузов, занимающихся диагностикой плазмы, прослушать лекции ведущих специалистов в этой области и представить собственные разработки и достижения.

Первый семинар был проведен в июне 1998 г., и с тех пор он проводится в МИФИ каждые два года. В работе семинара приняли участие специалисты в области диагностики плазмы из различных ВУЗов и НИИ Москвы, Санкт-Петербурга, Н-Новгорода, Ярославля, Томска, Сарова, Петрозаводска, Новосибирска, Белоруссии, Казахстана и других городов России и стран СНГ всего около 50 человек. Более подробную информацию об этих семинарах можно будет получить на сайте www.plasma.mephi.ru, там же можно ознакомиться с тезисами докладов предыдущих семинаров. Традиционно оргвзнос за участие в работе семинара не взимается. К началу работы семинара были выпущены расширенные тезисы докладов, а по обзорным приглашенным докладам издается серия «Учебная книга по диагностике плазмы».

О результатах Международного конгресса по физике и применениям плазмы в г.Фокуоке, посвященном 50-ти летию исследований по управляемому ядерному синтезу рассказал проф. МИФИ В.А.Курнаев, обзору самых мощных в России лазеров для ИТС в институте лазерно-физических исследований Российского федерального ядерного центра (ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ) в г. Сарове была посвящена лекция член.-корр. РАН С.Г.Гаранина. О применении грид-технологий в современных системах сбора и обработки информации рассказал И.Б. Семенов из Института ядерного синтеза РНЦ Курчатовский институт. Г.С.Воронов из института общей физики им. А.М.Прохорова почел лекцию о новой диагностике профиля плотности плазмы вблизи краевого транспортного барьера по измерениям радиального профиля интенсивности линии H_{α} . Михаил Пушкин (МИФИ) рассказал о возможностях вновь приобретенного МИФИ сверхвысоковакуумного комплекса MULTIPROBE MXPS RM VT AFM-25 для диагностики поверхности и наноструктур методами СЗМ И РФЭС.

Всего было представлен 51 доклад, из которых основную долю (38) составляли устные доклады. Около трети докладчиков, выступивших с устными докладами, были молодые люди в возрасте до 35 лет.

Впервые на данном семинаре были заслушаны с применением системы SKYPE доклады наших зарубежных участников (Евгения Вещева из Токи-сайт – института ядерного синтеза Японии (NIFS) и Марии Матвеевой их Юлиха (Германия). По отзывам участников первый опыт был удачным, так как ничто не мешало обсудить подробности и получить развернутые ответы в диалоговом режиме.

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2008 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Подписано в печать 26.06.09	Формат 60×84 1/8	
Учизд. л. 7,0	Печ. л. 7,0	Тираж 100 экз.
Изд. № 015-3	Заказ 390	

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., 31