

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР

КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

ЗА 2011 ГОД

Москва 2012

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2011 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Москва 2012

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2011 г. / Под ред. В.А. Курнаева. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 59 с.

Отчет кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ за 2011 год содержит краткое изложение основных результатов теоретических, расчетных, экспериментальных и технологических исследований и разработок, выполненных сотрудниками, аспирантами и студентами кафедры. Отчет содержит пять тематических разделов: теория и моделирование, разряды в газах, диагностика плазмы, взаимодействие плазмы и ее компонентов с веществом, экспериментальные установки и приборы. Приведены также сведения о составе кафедры, работах, опубликованных в журналах и доложенных на конференциях в 2011году, перечень защищенных на кафедре дипломных работ, диссертаций и исследовательских работ школьников, участвующих в научных работах на кафедре. В приложениях дается также краткая информация о проведенных с участием кафедры в 2011 научных конференциях и семинарах.

This annual report of the Plasma Physics Department (PPD) of National Research Nuclear University MEPHI for 2011 represents main results of theoretical, numerical, experimental and technological investigations obtained by faculty and scientific stuff as well as by students in 2011. The report consists of 5 topics: theory and modeling, gas discharges, diagnostics of plasma, plasma and ion interactions with matter and experimental devices and instruments. 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 the list of scholar's participating in scientific works of the department in 2011 are given. The short information on conferences held by Department in 2011 is also presented.

Редакционная коллеги	я	
Председатель	-	Курнаев В.А.
Зам. председателя	-	Писарев А.А.
Научный секретарь	-	Гаспарян Ю.М.

ISBN 978-5-7262-1705-5

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ	
Е.Д. МАРЕНКОВ, В.А. КУРНАЕВ, К. НОРДЛУНД Моделирование прохождения молекулярных ионов водорода через тонкие слои углерода	5
Д.К. КОГУТ, Н.Н. ТРИФОНОВ, В. КОТОВ Численное моделирование изменения состава поверхности первого зеркала при облучении потоками частиц, характерными для установки ИТЭР	6
В.М. ЖДАНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО Влияние резонансной перезарядки на полную и парциальные вязкости частично ионизированной водородной плазмы	7
И.Е. БОРОДКИНА, И.В. ЦВЕТКОВ, М. КОММ Применение кода SPICE для моделирования пристеночного слоя в термоядерном реакторе	8
В.А. УРУСОВ Восстановление масс-спектров для магнитного спектрометра с разверткой ускоряющим напряжением	9
В.А. УРУСОВ Влияние сглаживающего фильтра на восстановление энергетического спектра	10
2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ	
К.М. ГУТОРОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ, Ф.С. ПОДОЛЯКО, И.А. СОРОКИН, И.В. НАЙДЕНОВ Формирование высоковольтного импульса при срыве тока разряда	11
Д.В. МОЗГРИН, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. СТЕПАНОВА, М.А. ВАНЦЯН, Г.В. ПОПОВА, В.М. КОПЫЛОВ, С.П. БЕСЕДИН, В.В. ВОЛКОВ, К.А. ДЕМБО Исследование возможности создания композитных металл/полимерных материалов нового типа на импульсной плазменной установке	12
П.А. ХРОМОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ, А.В. КАЗИЕВ, Т.В. СТЕПАНОВА Сильноточный импульсный магнетронный разряд с изменяемой конфигурацией магнитного поля	13
А.В. ТУМАРКИН, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ, А.В. КАЗИЕВ, Т.В. СТЕПАНОВА Магнетронный разряд с расплавленным катодом	14
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, С.А. ЛЕПИХОВ Распределение плазменного потенциала в ловушке Магнетор	15
3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ	
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, С.А. ЛЕПИХОВ Система автоматизированной зондовой диагностики	16
Е.О. БАРОНОВА, О.А. БАШУТИН, Е.А. ВОВЧЕНКО, Э.И. ДОДУЛАД, В.Я. НИКУЛИН, И.Ф. РАЕВСКИЙ, А.С. САВЕЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ, П.В. СИЛИН, А.М. СТЕПАНЕНКО Оптимизация методов лазерной диагностики плазмы в разрядах типа z-пинч	17
Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ, Э.И. ДОДУЛАД, С.А. САРАНЦЕВ Спектроскопическое исследование плазмы низкоиндуктивной вакуумной искры	18
И.В. ВИЗГАЛОВ, Г.С. ВОРОНОВ, К.М. ГУТОРОВ, В.А. КУРНАЕВ, Ф.С. ПОДОЛЯКО, И.А. СОРОКИН Диагностика микротечей воды в камеру термоядерных установок на примере стелларатора Л-2М	19
В.Е. НИКОЛАЕВА, В.А. КУРНАЕВ, В.П. БУДАЕВ, С.А. ГРАШИН, А. ЛИТНОВСКИЙ, У. БРУЕР Исследование нейтралов перезарядки, падающих на стенку токамака Т-10	20

С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР, команда ЈЕТ Восстановление спектров нейтралов перезарядки вблизи внутренней средней плоскости токамака ЈЕТ	21
4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ	
А.А. МЕДНИКОВ, В.С. ЕФИМОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, О.В.ОГОРОДНИКОВА Влияние примесей азота в дейтериевой плазме на накопление дейтерия в вольфрам	22
В.С. ЕФИМОВ, А.А. МЕДНИКОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ Исследование тонкой структуры спектров термодесорбции дейтерия из вольфрама	23
С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР, команда ЈЕТ Изучение эрозии и осаждения на внутренней стенке, в диверторе и лимитере токамака ЈЕТ	24
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, А.В. ГРУНИН, А.Е. ЕВСИН, А.С. КАПЛЕВСКИЙ Захват водорода в цирконий и в цирконий с хромовым покрытием при различных условиях насыщения водородом	25
Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.В. МАМЕДОВ А.П. ПОПОВ Холодная эмиссия отрицательных ионов с пористого графита	26
М.С. ЗИБРОВ, А.А. ПИСАРЕВ, Д.Д. БЕРНТ, Ф. КОХ, М. МАЙЕР, Д.Н. РУЗИК Исследование тонких покрытий на алюминии в качестве защиты от коррозии в щелочных электролитах	27
М.С. ЗИБРОВ, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР, Е.А. МАРКИНА, Х. КЮРИШИТА Исследование захвата дейтерия в вольфрам, легированный карбидом титана	28
 А.А. АЙРАПЕТОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.Е. ЕВСИН Закономерности захвата водорода в углеграфитовый композит при облучении атомами с тепловыми скоростями 	29
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.В. ВЕРГАЗОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, Я.А. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН Захват водорода в нержавеющую сталь при облучении в дейтериевой плазме с примесью кислорода	30
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. КУЗЬМИН, П.А. ШИГИН, А.М. МИЩЕНКО Захват водорода в напыляемые в плазме углеродные слои	31

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ

Н.В. МАМЕДОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ, В.А. КУРНАЕВ, Д.В. КОЛОДКО, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ	
Встраиваемый малогабаритный источник плазмы для исследования in situ ее взаимодействия	
с поверхностью	32

приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Перечень трудов кафедры за 2011 год	
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Дипломные проекты, защищенные студентами кафедры в 2011 году с присвоением квалификации инженер-физик, защищенные диссертации,	
летняя практика школьников	40
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Список сотрудников и аспирантов кафедры	44
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Именной указатель авторов работ	45
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Программа 14 конференции-семинара «Взаимодействие плазмы с поверхностью», НИЯУ МИФИ, 4 – 5 февраля 2011 г.	46

1. ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ ТОНКИЕ СЛОИ УГЛЕРОДА

Е.Д. МАРЕНКОВ, В.А. КУРНАЕВ, К. НОРДЛУНД*

*Университет Хельсинки, Финляндия

В работе промоделировано проникновение молекулярных ионов водорода низких (2-12 кэВ/нуклон) энергий через ультратонкие углеродные пленки методом молекулярной динамики. Моделирование проводилось с помощью кода PARCAS на кластере CSC университета Хельсинки. Для описания взаимодействия C-H и H-H использовался потенциал Бренера. Потери энергии на электронное торможение вычислялись с помощью классической модели Линдхарда, с учетом флуктуаций электронных потерь энергии.

На первом этапе была смоделирована пленка с параметрами, близкими к экспериментальным: толщиной 42 Å, плотностью 1,9 г/см³ и отношением sp³/sp² порядка 0,01. Затем моделировалось проникновение H⁺ и H₂⁺ через полученную таким образом пленку. Пример такого расчета продемонстрирован на рис. 1, где показаны спектры потерь H⁺ и H₂⁺ для начальной энергии 4 кэВ/нуклон. Маркеры соответствуют экспериментальным значениям, сплошная линия – результат моделирования проникновения H⁺, пунктирная - H₂⁺. Видно, что, как и в эксперименте, наблюдается уширение пика H₂⁺ по сравнению с пиком H⁺ (т.е. наблюдается «молекулярный эффект»). При этом полуширина пиков и положение максимума согласуются с экспериментами.



Рис.1. Спектры потерь энергии частиц при прохождении через фольгу. Маркеры экспериментальные значения, линии результаты моделирования



Рис.2. Зависимость энергии фрагментов молекулярного иона от времени при прохождении через пленку. Начальная энергия – 4 кэВ/нуклон, ось иона ориентирована перпендикулярно к поверхности.

На рис. 2 показаны зависимости энергии фрагментов молекулярного иона от времени при прохождении через пленку для начальной энергии 4 кэВ/нуклон, ось иона ориентирована перпендикулярно к поверхности. После пересечения поверхности пленки (что соответствует 1 фс) ион распадается, что приводит к разнице в кинетических энергиях фрагментов порядка 100 эВ, в конечном итоге вызывая уширение пика на спектре потерь энергии. Причиной диссоциации иона является, по-видимому, процесс диссоциативной рекомбинации, приводящий к тому, что фрагменты получают (в системе центра масс) кинетическую энергию порядка нескольких эВ, что соответствует разбросу энергии порядка 100 эВ в лабораторной системе отсчета.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПОТОКАМИ ЧАСТИЦ, ХАРАКТЕРНЫМИ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР

Д.К. КОГУТ, Н.Н. ТРИФОНОВ, В. КОТОВ*

* - Forschungszentrum Juelich, Юлих (Германия)

Металлические зеркала широко используются для оптической диагностики плазмы в установке ИТЭР. Деградация поверхности зеркал за счет эрозии и осаждения примесей приводит к ухудшению их отражательных свойств.

Было проведено моделирование изменения состава поверхности молибденового зеркала при облучении потоком нейтралов перезарядки D, Не и частицами примеси Ве для цилиндрического защитного канала в экваториальном порту токамака ИТЭР.

Потоки частиц из плазмы, падающих на первую стенку, а также их угловые и энергетические распределения были рассчитаны при помощи кода B2-EIRENE. Этот код комбинирует двухмерное гидродинамическое описание плазмы с кинетической моделью Монте-Карло транспорта нейтральных частиц. Для моделирования облучения молибденового зеркала, расположенного в защитном канале (рис.1), используется код SCATTER, основанный на методе бинарных столкновений с добавлением алгоритма TRIDYN динамической модификации состава поверхности.

1.0



Примесь 1% Ве D = 0.1*10²³ м⁻² 0.8 •--- Be Относительная концентрация •••• Mo $D = 0.4*10^{23} \text{ m}^{-2}$ ----Be 0.6 D. He. ---- M o Be D = 1.0*10²³ M⁻² •---- Be 0.4 ----- M.o. 0.2 0.0 -100 -50 n 50 100 Х, нм

Puc.1. Схема расположения первого зеркала в защитном цилиндрическом канале

Рис.2. Профиль концентрации бериллия по глубине при облучении молибденового зеркала частицами D, He + 1% Be от потока нейтралов для различных доз

Во всех рассмотренных случаях осаждение примеси бериллия на поверхность молибденового зеркала превалирует над эрозией, несмотря на то, что при аналогичных условиях мишень из чистого бериллия распыляется. Этот эффект обусловлен наличием зоны перемешивания компонентов Ве и Мо, что отличает используемый код от более простых моделей. Атомы Ве имплантируются на глубину порядка 20 нм благодаря облучению высокоэнергетичными нейтралами (рис.2).

При заданной консервативной оценке потока Ве в 1% от потока дейтронов ресурс зеркала ограничен 140 типовыми разрядами ИТЭР. В случае предположения, что поток Ве в 10 раз меньше, результаты расчетов показывают уменьшение скорости роста примесной плёнки на поверхности зеркала в 7 раз. Таким образом, процесс осаждения примесей играет ключевую роль в оценке срока службы первых зеркал для оптической диагностики.

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ НА ПОЛНУЮ И ПАРЦИАЛЬНЫЕ ВЯЗКОСТИ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

В.М. ЖДАНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО

Результаты современных термоядерных экспериментов в пристеночной плазме прогнозируются при помощи различных компьютерных кодов, основанных на гидродинамических уравнениях для заряженных частиц и модели Монте-Карло для учёта нейтралов. В частности, в коде В2 используются уравнения Брагинского [1] описания полностью ионизованной плазмы либо уравнения лля лля многокомпонентной плазмы с примесями в приближении 21 N моментов метода Грэда [2]. В работах [3] для моделирования частично ионизованной пристеночной плазмы применялись уравнения Навье-Стокса. При этом выражения для коэффициентов переноса имели простой, приближенный вид. В частности, учет влияния резонансной перезарядки ионов на атомах на вязкость плазмы производился на основе известной элементарной формулы Васильевой.

В настоящей работе для расчета продольной и поперечной вязкостей замагниченной частично ионизованной водородной плазмы используются уравнения, полученные в приближении 21N моментов. Получены зависимости пяти коэффициентов вязкости $\eta_a^{(n)}$, $\eta_i^{(n)}$, $\eta^{(n)}$ (n = 0,...,4) от температуры газовой смеси, находящейся в состоянии ионизационного равновесия, и от степени ионизации при фиксированной температуре плазмы. Некоторые из результатов представлены на рис.1.



Рис.1. Зависимость продольного коэффициента парциальной вязкости ионов водородной плазмы от её температуры:.

- 1. формула Васильевой, без учета перезарядки
- 2. формула Васильевой, с учетом перезарядки
- 3. приближение 21N моментов, без учета перезарядки
- приближение 21N моментов, с учетом перезарядки

Учет резонансной перезарядки с использованием точных формул кинетической теории приводит к заметному увеличению продольного коэффициента вязкости ионов $\eta_i^{(0)}$ в области промежуточных степеней ионизации ($\alpha \sim 0.1...0.5$). Аналогичный эффект наблюдается при расчетах поперечных коэффициентов вязкости для ионов в магнитном поле. Для нейтрального компонента плазмы влияние резонансной перезарядки проявляется в заметном уменьшении коэффициентов $\eta_a^{(n)}$ (n = 0,1,2) и увеличении коэффициентов $\eta_a^{(n)}$ (n = 3,4).

- [1] С.И. Брагинский, Вопросы теории плазмы. М.: Госатомиздат, 1963, В. 1, с. 183.
- [2] В.М. Жданов, Процессы переноса в многокомпонентной плазме. М.: Физматлит, 2009.
- [3] D.A. Knoll, P.R. McHugh, S.I. Krasheninnikov, D.J. Sigmar, Contrib. Plasma Phys., 36, 328 (1996)

ПРИМЕНЕНИЕ КОДА SPICE ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ В ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

И.Е. БОРОДКИНА, И.В. ЦВЕТКОВ, М. КОММ*

* - Институт физики плазмы, Прага (Чехия)

Проведено моделирование с помощью кода SPICE движения заряженных частиц в пристеночном слое токамака при наличии наклонного магнитного поля. Данный код был разработан в Институте физики плазмы (Прага) для исследования поведения пристеночной плазмы у топографически неоднородной поверхности ОПЭ. Код является двумерным по пространству и трехмерным по скоростям и основан на численном методе "частиц в ячейке". В коде используется прямой метод решения уравнения Пуассона, что на порядок увеличивает скорость счета по сравнению с традиционными итерационными методами. В работе [1] с использованием кода SPICE рассчитывается детальное распределение полей и потоков ионов в щели с миллиметровыми размерами. Моделирование дает хорошее численное совпадение за исключением осаждения на дне щели, где получаются существенно заниженные значения величины осадка.

На рис.1 приведены полученные распределения потенциала электрического слоя в пристеночном слое, включающем Дебаевский слой и магнитный предслой для различных углов наклона магнитного поля. Электроны на входе в моделируемый слой имеют распределение Максвелла, ионы имеют смещенное максвелловское распределение. Угол магнитного поля α отсчитывается от нормали к поверхности. При увеличении угла наклона магнитного поля значение плавающего потенциала на стенке уменьшается (рис.1), это совпадает по величине со значениями плавающего потенциала из работы [2]. На рис.2 проведено сравнение распределений потенциала, полученных с помощью кода SPICE и из статьи [2] для $\alpha = 60^{\circ}$, 80°. Видно, что в распределениях есть две области, соответствующие Дебаевскому и магнитному предслою, и положение границы между этими слоями для данных расчетов и [2] практически совпадает, в то время как при на больших расстояниях от поверхности наблюдается различие.



Рис.1. Распределения потенциала электрического поля при различных углах наклона магнитного поля (rd – Дебая)



Рис.2. Сравнение распределений потенциала, полученных с помощью кода SPICE и из статьи Chodura [2] для α = 60°, 80°

- [1] R. Dejarnac, M. Komm, J. Stockel, R. Panek // J. Nucl. Mater. 31-34, (2008) 382.
- [2] R. Chodura, Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion, 1986, Plenum, New York, pp. 99-134.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАСС-СПЕКТРОВ ДЛЯ МАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА С РАЗВЕРТКОЙ УСКОРЯЮЩИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В.А.УРУСОВ

Для измерения состава плазмы применяются магнитные спектрометры с разверткой ускоряющим напряжением (рис.1). Поток ионов после предварительного ускорения попадает в магнитный спектрометр со стационарным магнитным полем. Образцом такого масс-спектрометра служит, например, масс-спектрометр, работающий в собственном магнитном поле установки, описанный в



Puc.1. Принципиальная схема статического магнитного масс-спектрометра с разверткой ускоряющим напряжением

работе [1]. При количественном анализе с помощью такого типа анализаторов возникает проблема с нормировкой пиков масс-спектров немонохровследствие матичности потока ионов. Это связано с тем, что способ определения интенсивности пика по его плоской вершине сильно ухудшает разрешение по массам, с другой стороны,

при высоком разрешении вклад в форму пика от аппаратной функции (которая часто бывает неизвестна) и от энергетического распределения сопоставим, и простое определение относительного вклада ионов разной массы по площади пика без дополнительной нормировки будет давать неверный результат.

Для описания спектрометра использовалось уравнение для магнитных спектрометров, полученное в работе [2]:

$$I_i(H,U) = I_{0i} \int_0^\infty \delta(E + q_i U, m_i) f(E, m_i) A\left(\frac{q_i H}{\sqrt{2m_i(E + q_i U)}}\right) dE.$$
(1)

Для относительной доли пиков имеем

$$\frac{I_{0i}}{I_{0n}} = \frac{m_i q_n \delta(\overline{E} + q_n U_{nmax}) \int_{0}^{\infty} I_i(H, U) dU}{m_n q_i \delta(\overline{E} + q_i U_{imax}) \int_{0}^{\infty} I_n(H, U) dU},$$
(2)

где \overline{E} - средняя кинетическая энергия ионов до ускорения, U_{max} - ускоряющее напряжение соответствующее максимуму пика.

Проверка работоспособности методики определения массового состава через площади пиков (2) может быть осуществлена следующим образом: сначала выходная щель делается достаточно широкой, чтобы наблюдались плоские вершины пиков, затем по двум методикам (по отношению значений пиков в максимуме и по отношению площадей под пиками) вычисляются относительные доли пиков, а полученные значения сравниваются. Затем, при условии, что полученные доли совпадают, щель делают узкой и производят измерения с высоким разрешением по массе.

- [1] I.V. Vizgalov at al.//Instrum. and Experim..1999. V.42. № 5. P.718
- [2] Курнаев В.А., Урусов В.А.//ЖТФ.1997.Т.67.№6.С.86-91

ВЛИЯНИЕ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

В.А.УРУСОВ

При регистрации сигнала на выходе электростатического спектрометра на полезный сигнал всегда накладывается шум, обусловленный колебаниями тока исходного пучка, статистическим характером регистрации и т.д., поэтому полученный сигнал часто дополнительно сглаживают при помощи фильтров, которые, в свою очередь, приводят к дополнительному искажению сигнала. Простейшим из фильтров является фильтр с постоянным спектральным окном.

Уравнение для фильтрованного сигнала:

$$I_1(\overline{U}) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(U)\varphi(U - \overline{U})dU , \qquad (1)$$

где I(E)-сигнал на выходе спектрометра, $\varphi(U-\overline{U})$ -сглаживающий фильтр,

Учитывая результаты, полученные в работе [1]

$$I_{1}\left(\overline{U}\right) = I_{0} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi\left(U - \overline{U}\right) \int_{0}^{+\infty} \delta(E) f(E) A\left(\frac{qU}{E}\right) dE dU , \qquad (2)$$

решение уравнения с точностью до слагаемых со второй производной можно представить в виде [2]:

$$f(qkU) \approx \frac{1}{qC_{10}I_0\delta(qk\overline{U})} \left(\frac{I_1(\overline{U})}{\overline{U}} - \frac{\overline{U}d^2I_1/d\overline{U}^2}{2} \left(1 - \frac{C_{10}^2}{C_{00}C_{20}} + \frac{\sigma^2}{\overline{U}^2} \right) \right),$$
(3)

где C_{ii} -коэффициенты, выражаемые через моменты от аппаратной функции, σ^2 дисперсия, создаваемая фильтром шума.



Рис.1. Восстановленный по разным методикам спектр ионов дейтерия, прошедших через фольгу: *углеродную* пунктирная линия сглаженный спектр, деленный на энергию; сплошная линия сглаженный спектр, восстановленный по формуле (3)

Литература:

- [1] Курнаев В.А., Урусов В.А.//ЖТФ.1997.Т.67.№6.С.86-91 [2] Курнаев В.А., Урусов В.А.//ЖТФ.1997.Т.67.№6.С.92-95

Последовательность шагов при таком алгоритме восстановления спектра следующая: сначала применяют фильтр для подавления флуктуаций И находят фильтрованный сигнал R соответствии с (1), затем используют решение (3)улучшения для энергетического разрешения.

При этом предполагается, что известна аппаратная функция спектрометра И. соответственно. вычислены ее моменты, кроме того вычислена функция $\varphi(U - U)$ и ее моменты.

2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ СРЫВЕ ТОКА РАЗРЯДА

К.М. ГУТОРОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ, <u>Ф.С. ПОДОЛЯКО</u>, <u>И.А. СОРОКИН, И.В. НАЙДЕНОВ</u>

Высоковольтный импульс развивается за счет перекачки энергии ИЗ индуктивности разрядной цепи в емкость приэлектродного слоя при скачкообразном снижении разрядного тока. Причина резкого изменения свойств цепи – переход тонкой пленки на поверхности электрода из диэлектрического в проводящее сопровождающееся состояние. снижением эффективного коэффициента вторичной электрон-электронной эмиссии в десятки раз (от ~100 до 1-2). Переход тонкой пленки в проводящее состояние происходит в результате перегрева ее электронной подсистемы из-за интенсивного облучения заряженными частицами, вследствие чего резко меняется вольт-амперная характеристика электрода И инициируется высоковольтный импульс. В данной работе сильноточный режим разряда достигается путем перевода электронной пушки из вакуумного в дуговой режим (режима со срывами можно также добиться в сильноточном автоколебательном режиме).



Рис. 1. Высоковольтный импульс напряжения при срыве разряда из стабильного режима

Практическую ценность имеет режим без развития колебаний на фронте и спаде импульса (колебания вредны, поскольку впустую расходуют энергию импульса), в котором были достигнуты импульсы напряжения вплоть до 75 кВ (при напряжении смещения электрода около -100 В). Восстановление диэлектрических свойств пленки при этом наблюдалось как рост крутизны фронта импульса, поскольку при высоких напряжениях (и соответственно высокой энергии бомбардирующих электрод ионов) пленка ограничивает выход вторичных электронов из металла, снижая тем самым ток утечки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛ/ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ТИПА НА ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ

Д.В. МОЗГРИН, Г.В. ХОДАЧЕНКО, Т.В. СТЕПАНОВА, М.А. ВАНЦЯН*, Г.В. ПОПОВА*, В.М. КОПЫЛОВ*, С.П. БЕСЕДИН**, В.В. ВОЛКОВ**, К.А. ДЕМБО**

* -РХТУ им. Д.И.Менделеева г. Москва

** - Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова РАН, г. Москва

Исследовалась возможность создания новых композитных металл/полимерных материалов с использованием ионных потоков, генерируемых плазмой сильноточного импульсного магнетронного разряда (СИМР) и стационарного магнетронного разряда. В качестве металла для нанесения использовалась медь, т.к. ионы меди имеют наибольшее сродство к атомам N₂, Р и Si, а также обладают сильной электропроводностью, необходимой для создания проводящих структур проводник/диэлектрик. В качестве исходного полимера выбирались образцы сшитого полидиметилсилоксана (ПДМС), содержащего в основной цепи «каркасный» фрагмент с полостью размером порядка 1,5 нм. Общий вид фрагмента показан на рис. 1.



Рис.1. Каркасный фрагмент сшитого полиметилсилоксана, где R – цепь полимера, X – CH3-группа



Рис.2. Фотографии поверхностной структуры образцов (40×40 мкм), обработанных СИМР

Для получения СИМР использовался планарный магнетрон с диаметром катода 120 мм. Величина магнитного поля на поверхности катода регулировалась в пределах 0,03-0,12 Тл. Расстояние от катода до подложки было 120 мм, температура поверхности образцов не превышала 40°С. Диагностика образцов проводилась с помощью рентгеновского дифрактометра АМУР–К и методом ACM на установке Ntegra – Aura.

В экспериментах с использованием стационарного магнетронного разряда были получены две фракции частиц с размерами 2,5 нм и 12 нм. При нанесении покрытия в СИМР в образцах образуется в основном две фракции металлочастиц, причем с увеличением числа импульсов разряда размеры частиц меньшей фракции уменьшаются от 13 нм до 3 нм, а большей фракции при этом увеличиваются от 3 нм до 100 нм. Изучение поверхности методом АСМ показало, что металл на поверхности представлял собой островковую структуру с размером островков 100 нм. Шероховатость покрытой порядка медью поверхности кремнийорганического полимера составляет от 25 до 100 нм, в то время как шероховатость исходной полимера составляет 3-4 нм. Поверхность слоя металла состоит из «чешуек» размера порядка 10-40 мкм (рис. 2).

Таким образом, показана возможность создания композитных наноструктурированных металл/полимерных материалов при воздействии плазмы СИМР. Показана также возможность управления размерами металлических наночастиц.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

<u>П. А. ХРОМОВ,</u> Г. В. ХОДАЧЕНКО, И. А. ЩЕЛКАНОВ, <u>А. В. КАЗИЕВ,</u> Т. В. СТЕПАНОВА

В рамках исследований, проводимых на экспериментальном стенде «ПИНЧ», разработана и создана магнитная система для управления ионным потоком в сильноточном импульсном магнетронном разряде (СИМР). Конструкция разработанной магнитной системы позволяет изменять степень разбалансировки магнетрона. Осуществлён физический пуск установки на базе разрядного устройства с изменённой магнитной системой.

Эксперименты проводились в два этапа: со стандартной магнитной системой разрядного устройства и выключенными дополнительными катушками, а затем с включённым дополнительным магнитным полем. Нанесение покрытия (Cu) на образцы производилось за 100 импульсов СИМР ($I \sim 45$ A, $P \sim 40$ кВт в импульсе). На рис. 1 схематично показаны картины силовых линий и позиции размещения образцов. Образец 1 соответствовал обычному расположению подложки при напылении.



Рис.1. Магнитное поле стандартной системы (слева) и новой конструкции (справа)

Результаты импульсной зондовой диагностики показали, что при наложении дополнительного магнитного поля *T*_e и *n* практически не изменяются.

На рис. 2 приведена зависимость средней импульсной скорости напыления от положения образца.



Рис.2. Скорость напыления: абсолютная (слева) и нормированная (справа)

Видно, что управление потоком ионов распылённого металла при помощи магнитного поля позволяет повысить эффективность использования материала катодной накладки. Это достигается путём увеличения скорости напыления покрытий в области подложки и снижения расхода материала за счёт уменьшения радиального потока ионов распылённого металла. Система может быть эффективно использована только для потоков с высокой степенью ионизации металла.

МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С РАСПЛАВЛЕННЫМ КАТОДОМ

<u>А.В. ТУМАРКИН</u>, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ, <u>А.В. КАЗИЕВ</u>, Т.В. СТЕПАНОВА

Разработано новое магнетронное устройство для получения и исследования мощных разрядов в режиме самораспыления с расплавленным катодом. Осуществлён физический пуск разработанного устройства и проведены первые эксперименты по исследованию разряда.

Получены устойчивые режимы горения магнетронного разряда с жидким катодом. Осуществлён выход на режимы, характеризующиеся высокой удельной мощностью разряда: $P_{\rm max} = 600$ BT/см². Экспериментально показано, что наиболее устойчивые режимы реализуются при изменении величины магнитного поля в диапазоне 200–400 Гс.

Изучение временной эволюции характеристик разряда позволяет выделить 4 этапа его развития (см. рис. 1): І — распыление твёрдой мишени; ІІ — переходная область; ІІІ — распыление жидкой мишени в среде рабочего газа; IV — распыление жидкой мишени в режиме самораспыления (когда подача рабочего газа отключена).



Рис.1. Зависимости напряжения (слева) и тока (справа) разряда от времени

Методом импульсной зондовой диагностики проведены измерения концентрации плазмы и температуры электронов стационарного магнетронного разряда в режиме самораспыления. Их значения составили, соответственно, $n \sim 10^{11}$ см⁻³, $T_e \sim 3$ эВ.

Проведены эксперименты по исследованию элементного и ионного состава плазмы магнетронного разряда в режиме самораспыления с помощью спектрометрической диагностики. Оценена температура нагретой мишени: $T_{\rm M} \sim 1400-1700$ К.

В экспериментах по определению скорости напыления покрытий (Cu) подложка устанавливалась на оси симметрии системы на расстоянии 26 см от поверхности мишени. Зажигался стационарный магнетронный разряд мощностью 2 кВт при давлении рабочего газа (Ar) $p = 8 \cdot 10^{-3}$ Торр. После выхода разряда в режим самораспыления подача рабочего газа прекращалась, и задавалась мощность разряда (2, 3 и 4 кВт). Результаты измерений скорости нанесения покрытий представлены на рис. 2.



Рис.2. Зависимость скорости нанесения покрытия (Си) от мощности разряда

Достигнута рекордная скорость нанесения покрытия из меди на танталовую подложку — 12 мкм/мин (на расстоянии 26 см от поверхности катода). Полученные покрытия рассматривались на оптическом микроскопе при стократном увеличении — капельная фаза не была обнаружена.

Для сравнения указано значение скорости нанесения покрытия при распылении твёрдой мишени (~ 0.1 мкм/мин, см. рис. 2).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В ЛОВУШКЕ МАГНЕТОР

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, С.А. ЛЕПИХОВ

В установке Магнетор реализована магнитная конфигурация, создаваемая двумя соосными токовыми катушками, находящимися в одной плоскости, токи в которых протекают в противоположных направлениях (рис. 1). При этом вокруг внутренней катушки формируется сепаратриса – поверхность, проходящая через нуль магнитного поля и разделяющая силовые магнитные линии разной топологии, внутри которой и происходит удержание плазмы. Заполнение ловушки происходит за счет генерации плазмы СВЧ волнами частотой 2,45 ГГц в результате электронциклотронного резонанса (ЭЦР) при остаточном давлении в камере ~10⁻⁵ Торр.

Проведенные ранее на установке исследования [1] позволили доказать локализацию плазмы внутри ловушки и получить с помощью двойного зонда распределение концентрации и температуры. Однако не были проведены распределения плавающего и плазменного измерения потенциала внутри магнитной ловушки, позволяющие увидеть картину распределения самосогласованных полей в плазме разряде, а также оценить их влияние на ионную температуру и раскачку колебаний в плазме.

В данной работе были проведены измерения параметров плазмы с помощью одиночного зонда. Эксперименты проводились на остаточном газе, при давлении 2·10⁻⁵ Торр. Магнитная конфигурация в процессе эксперимента была изменена за счет уменьшения тока в основной катушке таким образом, чтобы нули магнитного поля находились на расстоянии 160 мм от центра системы (в основной конфигурации - на расстоянии 270 мм от оси системы). С помощью осциллографа TPS2024B снималась усредненная за импульс магнитного поля вольт-амперная характеристика зонда.



На рисунке 2 представлено полученное распределение плазменного потенциала.

Рис.1. Магнитная конфигурация установки Магнетор

Рис.2. Распределение плазменного потенциала в ловушке

Как можно видеть, наибольшие значения плазменного потенциал наблюдается в областях у оси системы и у сепаратрисы. Это связано с тем, что электроны внутри большей области, ограниченной сепаратрисой, замагничены, т.е. уход электронов поперек поля затруднен, и покинуть ловушку они могут либо через область слабого поля (преимущественно вдоль оси системы), либо попадая на бандаж катушек (в конус угловых потерь).

Литература:

[1] Krashevskaya G.V., Kurnaev V.A., Tsventoukh M.M., 2007, Proc. 28th ICPIG, p.393.

3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, С.А. ЛЕПИХОВ

Разработана система автоматизированной зондовой диагностики, включающая в себя автоматизацию перемещения и позиционирования зонда. Актуальность создания подобного рода оборудования связана с отсутствием в России производителей таких систем и высокой ценой имеющегося зарубежного оборудования, что делает его труднодоступным для большинства научных организаций. Производство же зонда своими силами при наличии компетентных работников требует меньших затрат.

Система перемещения зонда представлена схематично на рис.1а и 1б.



Рис.1. Зонд с системой перемещения: а) общий вид, б) устройство системы перемещения зонда

Перемещение каретки *1* магнитного узла в продольном направлении осуществляется за счет преобразования вращательного движения винта *2*, приводимого в движение шаговым двигателем линейного перемещения *3*, в поступательное движение фланцевой гайки *4*. Фланцевая гайка *4* закреплена на металлической пластине *5*, жестко зафиксированной на каретке *1* и играющей роль ее толкателя. Сам же двигатель линейного перемещения *3* расположен на пластине *6*, зафиксированной на трубе вакуумного ввода. Вращение зонда реализовано посредством передачи вращения от вала двигателя *7* на каретку *1* магнитного узла через ременную передачу. Ременная передача организована посредством ведущего шкива *8*, зафиксированного на валу двигателя *7*, отвечающего за поворот зонда, и шкива *9*, являющегося неотъемлемой частью подвижной каретки. Двигатель, отвечающий за поворот зонда, расположен на держателе *10*, закрепленном на пластине *5*.

Для компенсации люфта системы в конструкцию магнитного узла были внесены небольшие изменения, что позволило добиться точности позиционирования зонда в продольном направлении ± 1 мм, а при повороте $\pm 0,5$ мм.

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДАХ ТИПА Z-ПИНЧ

Е.О. БАРОНОВА^{*}, О.А. БАШУТИН, Е.А. ВОВЧЕНКО, Э.И. ДОДУЛАД, В.Я. НИКУЛИН^{**}, <u>И.Ф. РАЕВСКИЙ</u>, А.С. САВЕЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ, П.В. СИЛИН^{**}, А.М. СТЕПАНЕНКО^{*}

* - НИЦ «Курчатовский институт» ** - Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Большой интерес к разрядам типа Z-пинч связан с возможностью концентрирования высокой плотности энергии в единичном объеме и получением плотных высокотемпературных областей плазмы с экстремальными параметрами. Высокий удельный энерговклад в этом случае, как известно, достигается за счет пинчевания плазмы. При этом сами пинчевые разряды, как правило, отличаются неоднозначной динамикой поведения и плохой временной воспроизводимостью протекающих процессов, что значительно затрудняет применение таких хорошо зарекомендовавших себя диагностических методов как теневая фотография и интерферометрия с лазерными источниками подсветки.

Сложная пространственно-неоднородная структура пинчевого разряда с большими градиентами электронной плотности и малое (менее 100 нс) время существования областей наиболее плотной плазмы ($n_e=10^{18} \div 10^{20}$ см⁻³) ограничивают выбор лазерных источников. Предпочтение следует отдавать коротковолновым лазерам (преимущественно ультрафиолетового диапазона), обеспечивающим высокое временное разрешение (единицы наносекунд) при высокой точности синхронизации. Хорошо зарекомендовали себя твердотельные YAG лазеры на второй и третьей гармониках. Однако наиболее перспективен TEA азотный лазер, позволяющий реализовывать схемы многокадрового зондирования с несколькими источниками подсветки с относительно небольшими затратами.

Важное место в диагностике разрядов типа Z-пинч занимает лазерная интерферометрия с визуализацией поля, позволяющая, в конечном счете, получать информацию о пространственном распределении в разрядном промежутке электронной плотности плазмы n_e. Дополнительные возможности для анализа интерферограмм открывает применение традиционной двулучевой интерферометрии с опорным пучком в сочетании со сдвиговой интерферометрией, обеспечивающей переменную чувствительность измерений. Этот принцип был реализован на установки ПФ-4 «Тюльпан» (ФИАН). На рис. 1 представлена схема подобного лазерного зондирования, включающая интерферометр Маха-Цендера (зеркала М1-М4) и интерферометра Бейтса (зеркала М7-М10) с поперечным сдвигом волнового фронта. Изменение величины и направления сдвига достигается за счет соответствующего поворота плоскопараллельных пластин, установленных между зеркалами интерферометра Бейтса.

Показано, что вид интерферограмм и результат их обработки зависят от величины направление сдвига (т.е. настроек И сдвигового интерферометра), которые определялись в эксперименте. Особенности применения интерферометра Бейтса для неоднородных исследования оптически объектов были учтены при разработке и оптимизации лазерной диагностической аппаратуры для микропинчевых установок МИФИ. В качестве оптимального источника излучения был выбран наносекундный (~5 нс) ультрафиолетовый $(\lambda = 337)$ HM) азотный лазер.



СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ НИЗКОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

Д.Л. КИРКО, А.С. САВЕЛОВ, Э.И. ДОДУЛАД, С.А. САРАНЦЕВ

При исследовании плазмы низкоиндуктивной вакуумной искры требуется определение параметров периферийной плазмы оболочки пинча. С этой целью на установках "Зона-2" и "Пион" с помощью спектрометра AvaSpec 2048 и монохроматора МУМ были проведены спектральные измерения в видимой и ультрафиолетовой областях для различных режимов данных установок.

Для установки "Зона-2" наиболее интенсивными линиями элементов, входящих в состав электродов, являются линии атомов железа: FeI 298 нм, 382 нм; ионов железа: FeII 270 нм, 274 нм, 284 нм, 348 нм, 361 нм, 523 нм; ионов кремния: Si II 305нм, 318 нм, 333 нм; атома углерода СІ 601 нм. Линиями элементов, возникающими в результате ионизации остаточного газа, являются атомарные линии азота: NI 415 нм, 493 нм, и ионы кислорода и азота: OII 253 нм, NII 464 нм. В спектре также содержатся водородные линии H_α 656 нм и H_γ 434 нм. Присутствие достаточно сильного непрерывного спектра позволило предположить, что для плазмы оболочки реализуется модель локального термического равновесия. Поэтому возможно использование метода относительных интенсивностей спектральных линий. С использованием линий Н_α и Η_γ были рассчитаны значения температуры плазмы для различных режимов разряда. Для разряда при зарядном напряжении $U_3=15$ кВ было получено значение температуры $T=3800\pm200$ К. Данное значение температуры более чем на порядок ниже величин, существующих в области пинча. Спектральные линии атомарного водорода Η_γ и Η_α имеют значительное уширение в диапазоне 2,0-10,0 нм. Контуры данных линий являются дисперсионными. В предположении существования микрополей в плазме по штарковскому уширению этих линий было рассчитано значение концентрации плазмы, которое составило $n_e = (2,4\pm0,3) \cdot 10^{16}$ см⁻³ (зарядное напряжение $U_3 = 15$ кВ). Данное значение концентрации меньше приблизительно два порядка значений, присутствующих в области пинча. Непрерывная составляющая спектра зарегистрирована во всем диапазоне регистрации спектрометра (200-1000 нм) и аппроксимирована планковским распределением с температурой T=3700 К.

На установке "Пион" излучение элементов, входящих в состав электродов, содержит следующие наиболее интенсивные линии: атомов железа FeI 358 нм, 373 нм, 382 нм, 721 нм, 909 нм; ионов железа Fe II 321 нм, 523 нм, 589 нм, 596 нм; атомов и ионов углерода: CI 493 нм, 505 нм, 538 нм, CII 427 нм, 517 нм; ионов кремния: SiII 305 нм, 550 нм. При ионизации остаточного газа появляются линии атомов и ионов азота и кислорода: NI 411 нм, NII 396 нм, 464 нм; OI 777 нм, OII 407 нм, 442 нм. Водородные линии H_{α} 656 нм, H_{β} 486 нм и H_{γ} 434 нм имеют значительную интенсивность. В излучении искры содержится сильный непрерывный спектр. По водородным линиям H_{α} , H_{β} и H_{γ} для зарядного напряжения $U_3=14$ кВ методом относительных интенсивностей спектральных линий было рассчитано значение температуры плазмы $T=3500\pm200$ К. При этом значение концентрации плазмы, найденное по штарковскому уширению водородных линий составило $n_e=(1,4\pm0,3)\cdot10^{16}$ см⁻³. Непрерывный спектр разряда аппроксимируется планковским распределением с температурой T=3400 К.

В результате продемонстрирована возможность использования на установках с низкоиндуктивной вакуумной искрой наиболее известных спектральных диагностик.

ДИАГНОСТИКА МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В КАМЕРЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ПРИМЕРЕ СТЕЛЛАРАТОРА Л-2М

И.В. ВИЗГАЛОВ, Г.С. ВОРОНОВ*, К.М. ГУТОРОВ, В.А. КУРНАЕВ, <u>Ф.С. ПОДОЛЯКО, И.А. СОРОКИН</u>

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Предварительные эксперименты по отработке методики диагностики микротечей воды в камеру термоядерных установок проведены в открытой плазменной ловушке ПР-2 «Пробкотрон». Течь воды моделировалась с помощью термохимического источника паров воды на основе разложения гидроокиси кальция Ca(OH)₂ в реакции:

$Ca(OH)_2 + 0,7 \ni B \rightarrow CaO + H_2O$

Данная модель течи может использоваться в сверхвысоковакуумных установках (давление паров при комнатной температуре не превышает 10⁻⁸ торр и может быть снижено в десятки раз с использованием охлаждения) и позволяет контролировать поступление паров воды в диапазоне 10¹²-10¹⁹ молекул/с с помощью нагрева рабочего вещества. Главные ее достоинства – легкость и точность регулирования потока воды и воспроизводимость установленной величины потока.



Рис.1. Общий вид инжектора паров воды на основе термохимического источника

Разработанная в НИЯУ МИФИ регулируемая течь на основе термохимического источника была установлена на стеллараторе Л-2М. Проведена калибровка источника. Поток паров воды, используемый в экспериментах составляет 10¹⁵ молекул/с.

Эксперименты по инжекции воды в плазму с параметрами, эквивалентными L-режиму ИТЭР. показали. активно что вода взаимодействует с боруглеродной пленкой, находящейся на стенках вакуумной камеры стелларатора после процедуры боронизации, и разрушает ее. При этом молекулы воды активно захватываются стенкой и не могут быть обнаружены в плазме, пока боруглеродная пленка в ближайших окрестностях течи не будет израсходована полностью В этих реакциях. Латентный период от открытия течи

до появления сигнала излучения гидроксила OH, превышающего уровень шумов, в экспериментальных условиях стелларатора Л-2М составляет около 2000 секунд.

Интенсивность излучения линий гидроксила (306-309 нм) нарастает по экспоненциальному закону в зависимости от номера импульса или времени после открытия течи. Поэтому повышение чувствительности аппаратуры в данном случае лишь незначительно (логарифмически) уменьшает эту задержку и не может существенно улучшить ситуацию.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ, ПОПАДАЮЩИХ НА СТЕНКУ ТОКАМАКА Т-10

<u>В.Е. НИКОЛАЕВА</u>, В.А. КУРНАЕВ, В.П. БУДАЕВ*, С.А. ГРАШИН*, А. ЛИТНОВСКИЙ**, У. БРУЕР**

* НИЦ "Курчатовский институт", Москва** Institute of Plasma Physics, Forschungszentrum Juelich, Germany

Для исследования углового распределения нейтралов перезарядки, попадающих на первую стенку токамака Т-10, был установлен собирающий зонд в виде облучаемой через малое отверстие кремниевой пластины. Зонд экспонировался в сечение *В* токамака на радиусе 34 см (рис.1) в течение 82 импульсов. Значения основных параметров Т-10 при этом составляли: магнитное поле 2,1 -2,4 Тл, ток плазмы 150 - 300 кА, плотность плазмы $0,5 \cdot 10^{13} - 3,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

В качестве собирающего зонда была использована пластинка из кремния КЭФ -4,5 - 100, 10×10 мм, толщиной 380±25 мкм, находящаяся на расстоянии 5 мм за диафрагмой \emptyset 1мм. Экспонированный образец был проанализирован методом вторично-ионной масс-спектрометрии в FZJ (Юлих). Анализ проводился пучком ионов Cs⁺ диаметром 100 мкм с энергией 0.5 кэВ и Bi₃⁺ с энергией 25 кэВ. Профили распределения внедренного дейтерия заметно различаются на различных участках образца (рис.3). Если количество частиц, внедренных под углом 45⁰ в точках В и Т меньше, чем по нормали к входной диафрагме, то количество нейтралов, внедренных в перпендикулярном направлении значительно больше. Наибольшая интенсивность сигнала внедренного дейтерия зафиксирована на правом *R* участке образца, что может быть интерпретировано как наличие угловой анизотропии попадающих на стенку нейтралов перезарядки.



Рис. 1. Зоны анализа облученного образца (а) и его положение в токамаке (б)

Рис. 2. Зависимость выхода дейтерия из образца от времени

Кроме того, на профилях распределения по глубине внедренных нейтралов для L, M и R точек четко прослеживается двухпиковая зависимость. Это можно было бы сопоставить с наличием двух компонент по энергии в потоке падающих частиц, либо с разными значениями их энергии в разных по времени периодах облучения. Для точек T и B такой зависимости не наблюдается. Для более полной интерпретация получаемых с помощью собирающего зонда данных по угловым и энергетическим распределениям нейтралов перезарядки необходимы дополнительные эксперименты с экспозицией зонда лишь при фиксированных параметрах плазмы токамака. Запас по чувствительности при данном методе анализа внедренных частиц допускает уменьшение на порядок времени экспозиции в T-10.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ВБЛИЗИ ВНУТРЕННЕЙ СРЕДНЕЙ ПЛОСКОСТИ ТОКАМАКА ЈЕТ

С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР*, команда ЈЕТ

* - Институт физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг (Германия)

В работе определялся спектр нейтралов перезарядки вблизи внутренней средней плоскости токамака JET (Великобритания). Восстановление спектра производилось на основе данных о распылении четырех материалов: С, Ве, Ni, W. Образцы из этих материалов были установлены в специальное устройство с заслонкой, открываемой во время рабочих разрядов магнитным полем и закрытой во время «чистящих» разрядов. Анализировались спектры для компаний 2001-2003 и 2004-2009 годов. Анализ образцов производился в институте физики плазмы (Гархинг, Германия) методом обратного резерфордовского рассеяния (ОРР). Образцы облучались в ходе измерений ОРР протонов с энергией 1.5 МэВ.

Для контроля работы заслонки образец идентичный углеродному был помещён вне заслонки. Его распыление было выше в 1.4 раза больше по сравнению с образцом под заслонкой, что подтверждает правильную работу заслонки.

Методика восстановления спектра нейтралов перезарядки базируется на том, что распыление веществ происходит эффективно в определенной области энергий распыляющих частиц. Для различных веществ области эффективного распыления отличаются. Предполагая, что спектр нейтралов перезарядки имеет определённый вид, в этой работе принятый $F(E) \sim e^{-E/t_2} + a_2 \cdot e^{-E/t_3}$, можно восстановить параметры t_1, a_2, t_2 . Подбор параметров производится методом последовательного приближения, в предположении известных зависимостей коэффициента распыления от энергии для всех используемых материалов. Предполагалось также, что распыление происходит только за счёт нейтралов дейтерия.



Puc.1. Спектры нейтралов перезарядки вблизи средней плоскости для токамаков ASDEX Upgrade (внешняя стенка) и JET (внутренняя стенка). Спектры приведены к одинаковому общему потоку нейтралов

Восстановленные спектры нейтралов перезарядки (рис. 1) имеют большую, по сравнению с данными для токамака ASDEX Upgrade, концентрацию нейтралов низких энергий, которая быстро спадает с ростом энергии, и, выше энергий порядка 300 эВ выходит на плато. Высокоэнергетическая область спектров, которая даёт информацию о высокоэнергетической области спектра, менее надёжна из-за не учитывавшегося в ходе расчётов влияния тяжёлых частиц на распыление вольфрама.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ АЗОТА В ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЕ НА Накопление дейтерия в вольфраме

<u>А.А. МЕДНИКОВ, В.С. ЕФИМОВ</u>, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, О.В. ОГОРОДНИКОВА*

* - Институт физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Инжекция нейтрального газа в область дивертора рассматривается как один из способов оптимизации распределения нагрузки на элементы конструкции в термоядерных установках. Наиболее успешные результаты на данный момент получены при инжекции азота. Данная работа посвящена изучению влияния примеси азота в дейтериевой плазме на накопление дейтерия в вольфраме.

Образцы вольфрама облучались в дейтериевой плазме с различным содержанием примесей азота (0÷5%) в установке PlaQ (IPP, Германия) с высокочастотным разрядом. Потенциал подложки в ходе облучения в различных экспериментах варьировался от 60 до 200 В, при этом на поверхность попадали преимущественно ионы D_3^+ и N_2^+ . Количество захваченного дейтерия определялось методом термодесорбции на сверхвысоковакуумной установке «ТДС-стенд» (НИЯУ МИФИ).

Эксперименты показали, что интегральное количество захваченного дейтерия при облучении в плазме с примесью азота заметно выше, чем в случае чистой дейтериевой плазмы (рис.1). Это может быть связано с затруднением десорбции дейтерия с облучаемой поверхности и, как следствие, увеличением потока диффузии дейтерия вглубь образца. Как и в случае чистой дейтериевой плазмы, при температуре 500 К наблюдается максимум накопления дейтерия. Основное количество азота выходит из вольфрама при температурах около 1100 К. Это значение хорошо совпадает с температурой разложения WN_x плёнок [1].



Рис.1. Температурная зависимость интегрального количества захваченного дейтерия при облучении в чистой D плазме и с 1% примесью азота, доза облучения составляла (2÷4)×10²⁵ D/м²

Рис.2. Сравнение проинтегрированного спектра термодесорбции азота (M/Z=7) и данных о разложении WN_x плёнок из статьи [1]

Литература:

[1] Y.G. Shen, Y.W. Mai, W.E. McBride, et al., Structural properties and nitrogen-loss characteristics in sputtered tungsten nitride films, Thin Solid Films, 372 (2000) 257-264.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРОВ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ВОЛЬФРАМА

В.С. ЕФИМОВ, А.А. МЕДНИКОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ

Эксперименты проводились на установке «Медион», которая позволяет проводить отжиг образцов, облучение и термодесорбционный анализ без переноса по атмосфере с остаточным давлением в камере измерений более 5×10⁻⁹ мбар. Было проведено несколько идентичных облучений вольфрамовой фольги толщиной 50 мкм ионами D_3^+ с энергией 10 кэВ дозой 10^{21} D/m^2 . Перед началом экспериментов образец был отожжён непосредственно в камере взаимодействий при температуре 1770 К в течение 60 минут. Перед каждым последующим облучением образец снова отжигался при температуре 1770 К в течение 20 минут. Тщательное соблюдение процедуры измерений (время отжига, время между облучением и ТДС, и т.д.) позволило добиться очень хорошей повторяемости спектров. Нагрев образца в ходе термодесорбции проводился в две стадии. Сначала образец нагревался линейно до определенной температуры $T_i = 300 + 50 \times i (i - 100)$ номер эксперимента). Затем образец охлаждался до комнатной температуры и проводился «второй» нагрев уже до температуры 1300 К, после чего проводился стандартный отжиг образца. Было проведено восемь таких экспериментов (рис.1), т.е. температура первого нагрева варьировалась от 350 до 700 К.



Рис.1ТДС спектры для разных температур первого нагрева

Рис.2. Разложение пика при 450 К путем вычитания «вторых» спектров

Анализ полученных данных проводился путем вычитания *i*-ых «вторых» спектров из (*i*+1)-ых «вторых» спектров. Пример такого вычитания приведен на рис.2. Процедура вычитания приводит к расщеплению широких пиков, наблюдаемых в ходе обычного нагрева, на несколько более узких пиков. Кроме того, при вычитании спектров иногда наблюдается несколько отдельных узких пиков. Такое поведение можно объяснить наличием множества ловушек с различной энергией связи, а также перераспределением захваченного дейтерия между ловушками в ходе нагрева.

ИЗУЧЕНИЕ ЭРОЗИИ И ОСАЖДЕНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ, В ДИВЕРТОРЕ И ЛИМИТЕРЕ ТОКАМАКА ЈЕТ

С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР*, команда ЈЕТ

* - Институт физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг (Германия)

Определялись зоны эрозии и осаждения на тайлах внутренней стенки, лимитера и дивертора токамака JET (Великобритания). Анализ производился в институте физики плазмы (Гархинг, Германия) методом обратного резерфордовского рассеяния (ОРР). В ходе ОРР анализа облучение проводилось протонами с энергией 4.5 МэВ для тайлов лимитера и дивертора и 1.5 МэВ для образцов с внутренней стенки. Тайлы дивертора были сделаны из СFC (carbon fiber composite) с многослойным W/Re покрытием: 6 мкм Re + 2 мкм W + 2 мкм Re + 4 мкм W (14 мкм в целом). Тайлы лимитера были сделаны из CFC с нанесёнными «маркерами»: «углеродным» – 0.1 мкм W + 8.8 мкм C, и «вольфрамовым» – 3.2 мкм W. На внутренней стенке были установлены образцы из углерода и бериллия.

Распределение степени распыления по внутренней стенке оказалось равномерным для углерода и бериллия. Количество распылённого углерода увеличивается к низу стенки на 39%, а распределение степени распыления бериллия однородно в пределах погрешности. Общее количество углерода, распылённого со всей внутренней стенки за период 2004-2009 годов, оцененное на основе этих данных составило 230 г.

Было обнаружено что на большей части тайлов дивертора сохранялось порядка $1.1 \cdot 10^{20}$ атомов/см² Re+W, которые неразличимы при помощи метода OPP. Это количество близко к начальной толщине покрытия, то есть распыление было незначительным. Однако, были обнаружены отдельные зоны интенсивного распыления, в которых толщина сохранившегося покрытия уменьшалась на величину до 20%: центральная область тайла LBT 14RW, одна из поверхностей тайла 20N G8A. На тайлах LBT 14RW и 20W G7B обнаружены зоны осаждения.

Для тайлов лимитера были обнаружены как зоны эрозии, так и зоны осаждения. Была составлена карта этих зон (рис. 1). Наиболее удалённые от плазмы крайние области практически не претерпевают распыления. Ближе к центру присутствуют области интенсивного осаждения, в которых на поверхности вольфрамового



маркера обнаруживается большое количество углерода и кислорода. Далее следуют зоны интенсивного распыления, в которых не сохранились ни вольфрамовый, ΗИ углеродный маркеры. В центре тайла имеется зона осаждения шириной порядка 2-3 см, смещённая в сторону одной из половин тайла

Рис.1. Карта областей осаждения и распыления для тайлов лимитера IWGL 3X11L и 3X11R

на расстояние порядка 1.5 см. На основе данных о количестве углерода в зонах осаждения, было оценено общее количество углерода, осадившегося на всём лимитере в период 2004-2009 годов. Оно оказалось равным 109 г.

ЗАХВАТ ВОДОРОДА В ЦИРКОНИЙ И В ЦИРКОНИЙ С ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕНИЯ ВОДОРОДОМ

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, <u>А.В. ГРУНИН,</u> <u>А.Е. ЕВСИН, А.С. КАПЛЕВСКИЙ</u>

Несмотря на длительную историю исследований взаимодействия водорода с металлами, до настоящего времени не выяснены важные аспекты захвата и удержания водорода в металлах при наличии на их поверхности барьерного слоя окислов и/или покрытия. В работе исследуются закономерности захвата водорода в цирконий и в цирконий с хромовым покрытием. Выбор циркония в качестве материала для исследования определён тем, что он используется для изготовления элементов активной зоны легководных реакторов, и выяснение особенностей его наводороживания имеет значительный практический интерес.

Образцы циркония (сплав Э110) и циркония с хромовым покрытием экспонировались в водяном паре (температура пара 400 °C), подвергались воздействию ионов водорода в электролите (раствор 5% H₃PO₄, j_i =23 мA/см²), облучались атомами дейтерия с тепловыми скоростями (j_a =0.16×10¹⁵ мA/см², T=330 °C), а также облучались ионами и атомами дейтериевой плазмы (E_i =500÷750 эB/ат, j_i =0.5 мA/см², T=380 °C). Изучался также захват водорода в процессе осаждения покрытия на цирконий в аргоновой плазме газового разряда с накальным катодом.

Количество атомов водорода в образцах измерялось методом термодесорбционной спектрометрии.

В результате экспериментов обнаружены следующие закономерности.

1) В самых различных условиях: при насыщении образцов циркония водородом в электролите, при их облучении атомами дейтерия в вакууме, при облучении ионами плазмы, зажигаемой в аргоне или в дейтерии, а также в процессе осаждения хромового покрытия в аргоновой плазме, – в узком приповерхностном, частично окисленном слое циркония возникают центры захвата изотопов водорода. Выход водорода из этих центров захвата при термодесорбции происходит при температурах 1050 К и 1170 К, которые намного ниже температур выхода водорода из объёма металла (~1300 К). При облучении циркония атомами и ионами дейтерия (водорода), водород в основном (более 90%), захватывается из молекул воды, сорбированных на поверхности.

2) При экспозиции образцов циркония с хромовым покрытием в водяном паре и в электролите, при их облучении атомными частицами и ионами, а также в процессе осаждения хромового покрытия на цирконий, водород в основном захватывается в цирконии.

3) Наличие атомов углерода в приповерхностном слое циркония активирует захват водорода в поверхностных центрах в процессе осаждения хромового покрытия.

4) При облучении образцов циркония с хромовым покрытием ионами дейтериевой плазмы захват дейтерия в 3-4 раза превышает захват при аналогичном облучении циркония без покрытия.

5) В процессе экспозиции образцов циркония и циркония с хромовым покрытием в перегретом паре происходит периодический выход из них водорода.

ХОЛОДНАЯ ЭМИССИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ С ПОРИСТОГО ГРАФИТА

Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.В. МАМЕДОВ, А.П. ПОПОВ



Рис.1. Схема экспериментальной установки 1образец графита МПГ-8 (катод), 2-сетчатый анод, 3-сепарирующий электромагнит, 4вторичный электронный умножительВЭУ-6М,5пролетный шибер, 6-турбомолекулярные насосы Pfeiffer TMU 071, 7- форвакуумные насосы Varian SH-100, 8- турбомолекулярный насос TMH 1500, 9выдвижная пластинка для токовых измерений



Рис.2. Масс-спектры отрицательных ионов при различных давлениях аргона, при постоянном токе между катодом и анодом

B настоящее время нет общепринятой теории, объясняющей эмиссию электронных токов с поверхностей с развитым рельефом при полях меньших, чем предсказывает теория автоэлектронной эмиссии. При достаточно больших электронных токах (~1-10 мкА/см²) становятся заметными токи отрицательных ИОНОВ. Эксперименты проводились на установке Большой Macc-Монохроматор МИФИ, которая использовалась в инверсном режиме Большой (рис. 1). радиус центральной траектории ионов на этой установке (50 см) позволяет разрешающей приемлемой при способности обеспечить максимальную чувствительность за счет использования большой $(1 cm^{2})$ площади эмиссии с исследуемой поверхности. В качестве катода был использован графит **ΜΠΓ-8**, поверхность которого была получена в результате разлома. Плоский анод с отверстием, покрытым сеткой с прозрачностью 80% находился на расстоянии 2 мм от поверхности

Эксперименты показали, что ток между катодом и анодом образован в основном электронами и не зависит от давления остаточного газа в диапазоне $5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Ток отрицательных ионов пропорционален току электронов и составляет ~ $5 \cdot 10^{-12}$ А при полном токе между катодом и анодом $3 \cdot 10^{-6}$ А. Также была установлено,

что ток отрицательных ионов пропорционален атомной массе остаточного газа и его давлению в вакуумном промежутке и (рис. 2).

Предложен механизм эмиссии отрицательных ионов, при котором последние образуются в результате вторичной ионной эмиссии за счет бомбардировки поверхности положительными ионами, образующимися в вакуумном промежутке при ионизации остаточного газа эмитируемыми с катода электронами. Исходя из предполагаемой модели, была произведена численная оценка тока отрицательных ионов, которая показала, что ток отрицательных ионов должен быть ~10⁻¹² A, что сходится с результатами экспериментов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ В ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ <u>М.С. ЗИБРОВ</u>, А.А. ПИСАРЕВ, <u>Д.Д. БЕРНТ</u>, Ф. КОХ*, М. МАЙЕР*, Д.Н. РУЗИК**

* - Институт физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг (Германия) ** - Университет Иллинойса, Урбана (США)

Работа посвящена исследованиям металлических и углеродных покрытий на алюминии, создаваемых для защиты токосъемников суперконденсаторов с щелочным электролитом. Графитоподобные углеродные пленки и металлические (медные, титановые и хромовые) пленки наносились в магнетронном разряде, а алмазоподобные углеводородные пленки - в высокочастотном разряде в среде



Рис.1. РЭМ изображение участка поверхности алмазоподобной пленки после длительных испытаний в

ствует об их механическом разрушении.

Предложен механизм разрушения покрытия (рис. 2). Предполагается, что пленки имеют дефекты, которые настолько малы, что они не видны в электронный микроскоп, но достаточно велики, чтобы обеспечить транспорт электролита к поверхности алюминия (стадия I). Ионы гидроксила взаимодействуют с алюминием, в результате чего выделяется водород, который накапливается на границе раздела в виде плоских пузырьков (стадия II). При увеличении давления в пузырьке до критического уровня тонкая пленка механически разрушается с образованием макроскопических отверстий и трещин, которые ускоряют травление алюминия (стадия III). Помимо разрушения покрытия, происходит отслаивание небольших его участков вокруг пузырька, что приводит к травлению алюминия не только вглубь, но и вдоль поверхности алюминиевой основы.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что создание тонких покрытий на алюминии для защиты от щелочного электролита III является проблематичным из-за высокой скорости коррозии алюминия и неизбежных дефектов структуры покрытий.

метана.

Все полученные покрытия обладали хорошей адгезией к подложке. Защитные свойства покрытий были исследованы в 30% водном растворе щелочи КОН. При контакте с раствором щелочи на поверхности образцов практически сразу наблюдалось газообразование. После

Дефект

промывки остатков р щелочи в некоторых местах было заметно разрушение пленки и алюминиевой основы (рис. 1). Анализ характерных особен- I ностей разрушения покрытий свидетель-



Раствор КОН

Рис.2. Стадии разрушения пленок

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМ, ЛЕГИРОВАННЫЙ КАРБИДОМ ТИТАНА

<u>М.С. ЗИБРОВ</u>, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР*, Е.А. МАРКИНА*, Х. КЮРИШИТА^{**}

* - Институт физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг (Германия)
 ** - Международный исследовательский центр ядерных материалов, Университет Тохоку (Япония)

Вольфрам является перспективным материалом для изготовления обращенных к плазме элементов термоядерных установок. Одним из его недостатков являются его плохие термомеханические свойства. В последнее время активно ведутся разработки новых материалов на основе вольфрама, обладающих улучшенными термомеханическими характеристиками. Одним из таких материалов является вольфрам, легированный карбидом титана [1]. Однако вопрос о захвате изотопов водорода в такие материалы не исследован.

В данной работе был исследован вольфрам с добавкой 1,1 % (по массе) карбида титана. Исследования на РЭМ показали, что размер зерен вольфрама в данном материале меняется в пределах от 1 до 5 мкм (рис. 1). Зерна карбида титана имеют размеры от сотен нанометров до единиц микрометров, причем они расположены не только на границах зерен вольфрама, но и внутри них, что свидетельствует о рекристаллизации материала.



Рис. 1. РЭМ изображение поверхности образца

Образцы из исследуемого материала облучались масс-сепарированным пучком ионов D_3^+ с энергией 600 эВ на сильноточном ионном источнике. Дозы облучения менялись в диапазоне от 10^{21} D/m² до 10^{24} D/m². Были проведены две серии экспериментов при разных температурах образца во время облучения: комнатной температуре и 200 °C.

Распределение захваченного дейтерия по глубине определялось методом ядерных реакций (реакция $D({}^{3}\text{He}, p){}^{4}\text{He}$) на ускорителе TANDEM. Общее количество захваченного дейтерия определялось методом термодесорбционной спектроскопии на установке TESS.

Общее количество дейтерия, захваченного в образцы W-TiC, сопоставимо с чистым вольфрамом [2], однако профили распределения дейтерия по глубине и формы ТДС спектров сильно отличаются.

- [1] G. Pintsuk, H. Kurishita, J. Linke, H. Arakawa, S. Matsuo, T. Sakamoto, S. Kobayashi, and K.
 - Nakai. Phys. Scr. T145 (2011), 014060.
- [2] O.V. Ogorodnikova, J. Roth, and M. Mayer, J. Appl. Phys. 103 (2008) 034902.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАХВАТА ВОДОРОДА В УГЛЕГРАФИТОВЫЙ КОМПОЗИТ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ АТОМАМИ С ТЕПЛОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

А.А.АЙРАПЕТОВ, Л.Б.БЕГРАМБЕКОВ, А.Е. ЕВСИН

В работе экспериментально показано, что при облучении атомами дейтерия с тепловыми скоростями В углеграфитовый композит захватываются как облучающие частицы дейтерия, так и атомы водорода из молекул воды, сорбированных на поверхности. На рис. 1 показаны спектры термодесорбции HD из образцов в зависимости от времени облучения (поток атомов - 1×10^{15} at./cm²c). Формы спектров показывают, что захват происходит в основном в ловушки в приповерхностном слое, созданные за счёт энергии неупругого взаимодействия налетающих атомов с поверхностью (максимум на ТДС-спектрах в районе 800 К) и на структурных дефектах (максимум – при 1200-1300 К) [1]. При больших дозах облучения происходит модификация области за приповерхностным слоем с формированием ловушек, характерных для случаев облучения ионами с энергией большей чем 200 эВ/атом (максимум при 900-950 К).

Определена зависимость количества захваченного дейтерия от дозы атомарного облучения (рис.2). Наблюдается насыщение захвата при дозе облучения $\approx 5 \times 10^{18} \text{ at/cm}^2$.

С использованием полученных результатов определен вклад атомарного облучения углеграфитового композита при экспонировании в плазме под отрицательным (облучение ионами, атомами) и положительным потенциалом (облучение электронами, отрицательными ионами, атомами) относительно плазмы [2]. Обнаружено, что роль атомарного облучения в захвате водорода при облучении в плазме мала (захват за счет атомарного облучения составляет ~20% от общего количества захваченного дейтерия в случае облучения электронами с энергией 10 эВ и ~10% в случае облучения ионами с энергией 50 эВ/атом).



Рис.1. ТДС-спектры водорода в составе Рис.2. молекул HD из образцов в зависимости от захваченного дейтерия в зависимости от дозы атомарного облучения

Зависимость количества дозы атомарного облучения

- [1] А. А. Айрапетов, Л. Б. Беграмбеков, С. В. Вергазов, и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010, № 7, с. 1-6
- [2] Airapetov A., Begrambekov L., Brosset C. et al., J. Nucl. Mater, 2009. V.390-391. P.589.

ЗАХВАТ ВОДОРОДА В НЕРЖАВЕЮЩУЮ СТАЛЬ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЕ С ПРИМЕСЬЮ КИСЛОРОДА

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.В. ВЕРГАЗОВ, <u>А.С. КАПЛЕВСКИЙ,</u> Я.А. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН

В работе представлены особенности и механизм захвата и удержания изотопов водорода в нержавеющей стали, облученной в дейтериевой плазме с примесью кислорода. Эксперименты проводились на установке МИКМА [1]. В использовались образцы нержавеющей стали (SS) марки экспериментах 12X18Н10Т и никеля (Ni). Давление остаточного газа (H₂O - 97%, H₂ - 3%) в плазменной камере не превышало 1.5×10^{-5} Па, давление рабочего газа (D₂+O₂) было (4-7)×10⁻¹ Па. Температура облучения образцов составляла 450-500 К.

Обнаружено, что облучение стенок плазменной камеры из нержавеющей стали атомами дейтерия (которые появляются в рабочем газе, когда накаливается вольфрамовый катод) и частицами плазмы инициирует генерацию молекул воды (H₂O, HDO и D₂O) на поверхности стенки из кислорода и дейтерия рабочего газа и водорода, поступающего в основном из объема нержавеющей стали. При облучении отожжённого образца атомами дейтерия в рабочем газе (D₂+2%O₂) около 75%, а при облучении в плазме около 40-50% атомов водорода и дейтерия захватывались в SS из молекул воды, сорбированных на поверхности образца, по "потенциальному" механизму, описанному в [2] (для случая захвата водорода в углеграфитовые материалы).





Рис.1. Количество захваченных атомов дейтерия в SS и Ni в зависимости от содержания кислорода в рабочем газе

Рис.2. Количество захваченных атомов дейтерия в SS и Ni в зависимости от энергии облучающих ионов

Зависимость захвата дейтерия в SS и Ni от концентрации кислорода в плазме и от энергии облучающих ионов представлена на рис. 1 и 2. При облучении ионами с низкой энергией захваченные частицы связывались преимущественно с атомами хрома в оксидном слое. Когда энергия ионов превышала 100 эВ/ат, захваченные частицы удерживались в основном за оксидным слоем и оказывались связанными с атомами железа. Захват дейтерия в Ni не зависел от концентрации кислорода в плазме и происходил по "кинетическому" механизму [2]. Характер зависимости захвата дейтерия от энергии ионов и концентрации кислорода в плазме определялся, главным образом, концентрацией кислорода в поверхностном окисленном слое SS (определяемой количеством примеси кислорода в рабочем газе) и соответствием между пробегом ионов и толщиной поверхностного слоя SS.

- [1] A.A. Airapetov, et al., J. Nucl. Mater. 415/1S (2011) S1042.
- [2] A.A. Airapetov, et al., J. Nucl. Mater. 390–391 (2009) 589

ЗАХВАТ ВОДОРОДА В НАПЫЛЯЕМЫЕ В ПЛАЗМЕ УГЛЕРОДНЫЕ СЛОИ

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. КУЗЬМИН, П.А. ШИГИН, А.М. МИЩЕНКО

В работе исследовался захват водорода в растущие углеродные слои, осаждаемые в плазме. Напыление углеродных слоев проводилось методом осаждения потока распыленных в плазме атомов углерода. В экспериментах к аргоновой плазме добавлялся водород с парциальным давлением от $6 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Торр и кислород с парциальным давлением $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Давление аргона поддерживалось на уровне $1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Скорость напыления составляла $\approx 0,1$ нм·с⁻¹. Осаждение производилось на подложки из нержавеющей стали. Температура подложек во время напыления составляла 450 К. Давление остаточных газов не превышало $2 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Оказалось, что зависимость захвата и кислорода от давления водорода разряде (рис. 1) имеет водорода В характер максимумом сложный с захвата при давлениях $10^{-5} - 10^{-4}$ Торр. Отметим, что эта зависимость схожа с зависимостью захвата дейтерия в CFC от давления кислорода в рабочем газе, полученной в [1]. Поэтому можно считать, что наблюдаемая зависимость, как и в случае, описанном в [1], есть, в основном, результат действия ДВVХ разнонаправленных процессов.

Первый из них – это увеличение захвата водорода и кислорода из сорбированных на поверхности молекул



Puc.1. Зависимость захвата водорода и кислорода от давления водорода в разряде

воды, которые выступают основным источником захвата, при увеличении концентрации водорода в рабочем газе. Это происходит благодаря возрастанию потока ионов водорода, активирующих захват по «потенциальному механизму» [2] водорода и кислорода из молекул воды, на поверхность графита. Продукты диссоциации воды (Н или ОН) захватывались на активных центрах сорбции поверхности (оборванные связи), приводя к синхронному росту захвата водорода и кислорода.

Второй – это уменьшение концентрации молекул воды на поверхности, и, соответственно, уменьшение захвата атомов водорода и кислорода по мере увеличения молекулярного потока водорода на поверхность и сорбции молекул водорода.

- [1] Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Вергазов С.В., Захаров А.М., Кузьмин А.А., Садовский Я.А., Шигин П.А., Захват и удержание кислорода и дейтерия в углеграфитовом композите при облучении в дейтериевой плазме с примесью кислорода // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 3. С. 25-29
- [2] A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, J.P. Gunn, C. Grisolia, A. Kuzmin, T. Loarer, M. Lipa, P. Monier-Garbet, P. Shigin, E. Tsitrone, A. Zakharov, Deuterium trapping in carbon-fiber composites exposed to D plasma // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390-391, , Pp. 589-592

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ

ВСТРАИВАЕМЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ IN SITU ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Н.В. МАМЕДОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ, В.А. КУРНАЕВ. Д.В. КОЛОДКО, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ

Для плазменного воздействия на поверхность при исследовании состава и толщины поверхностных пленок, осуществляемого с помощью спектроскопии ионного рассеяния на установке Большой масс-монохроматор МИФИ, разработан встраиваемый источник заряженных частиц. Главной особенностью источника на основе Пеннинговского разряда является возможность работы при низком давлении (~ 10⁻⁴ Торр) рабочего газа. Проведенная синхронизация работы данного источника с компьютерным управлением основного (диагностического) ионного пучка позволяет осуществить анализ образца в автоматическом программируемом режиме в процессе воздействия плазмы или сразу после. Тем самым контроль состояния поверхности происходит без выноса образца на атмосферу.





Рис.1. Вольт-амперные характеристики Рис.2. выходящей из источника Ar плазмы при работающего различных напряжениях разряда U_p и $P_{\kappa}=3\cdot 10^{-3}$ Торр, ток на мишень I=100мкА давлении в камере ~ $(5-7) \cdot 10^{-6}$ Торр

Фотография источника. при $U_n=2\kappa B$, $I_p=20_{MA}$,

Получены (см. рис. 1) вольт-амперные характеристики (ВАХ) зонда (мишени) при различных напряжениях разряда (U_p, I_p) и давлениях в камере взаимодействия (P_{κ}) , а также при подаче положительного смещения $(U_{c_{M}})$ на корпус источника относительно земли. Температура и концентрация плазмы в вытягивающем канале, соответствующие приведенным на рис.1 ВАХ, составляют $T_e = 5$ эВ и $n=10^8$ см⁻³. На рис. 2 приведена фотография работающего источника. Из оптических спектров извлекаемой из источника плазмы, полученных с помощью оптоволоконного спектрофотометра AvaSpec-2048, следует, что плазма состоит из однозарядных ионов аргона, и основной примесью являются остатки молекул воды и азота. Такой состав плазмы также качественно был подтвержден при измерении масс-спектра данного источника при инверсном включении диагностического ионного канала масс сепаратора установки БММ МИФИ. Примеси в извлекаемом из источника ионом пучке составляют не более 2% от общего числа ионов. При $U_p=3$ кВ $I_p=4$ мА плотность ионного тока на мишень ~ 20 мкA/см², а давление в камере взаимодействия не выше 8.10⁻⁶ Торр.

ПЕРЕЧЕНЬ ТРУДОВ СОТРУДНИКОВ КАФЕДРЫ ЗА 2011 ГОД

Международные журналы:

- V.A. Kurnaev, D.K. Kogut, N.N. Trifonov "Modeling of Erosion and Deposition in Pits and Dust Particles on Beryllium Tile Surface" // Journal of Nuclear Materials (2011), V. 415, I. 1, S. 1, P. S1119-S1122.
- E. D. Marenkov, S. I. Krasheninnikov, A. Yu. Pigarov, A. A. Pisarev, and I. V. Tsvetkov. On thermal instability caused by plasma-wall coupling. Phys. Plasmas 18, 092502 (2011); doi:10.1063/1.3626832.
- E.D. Marenkov, I.V. Tsvetkov, A.A. Pisarev, Yu. M. Gasparyan, A.A. Rusinov, Deuterium release from pores in tungsten created by 10 keV D3+ beam, Nucl. Instr. and Meth. B 269 (2011) 876– 880.
- Yu. Gasparyan, M. Mayer, A. Pisarev, A. Wiltner, C. Adelhelm, F. Koch, M. Rasinski, J. Roth, Deuterium permeation through carbon-coated tungsten during ion bombardment, Journal of Applied Physics 110, 33303 (2011).
- 5. Yu. Gasparyan, M. Rasinski, M. Mayer, A. Pisarev, J. Roth, Deuterium ion-driven permeation and bulk retention in tungsten, Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 540–544.
- A. Rusinov, N. Trifonov, Yu. Gasparyan, B. Khripunov, M. Mayer, J. Roth, A.Pisarev, Deuterium retention in graphite exposed to high flux plasma at high temperatures, J. Nucl. Mater., 417 (2011) 616–619.
- A. Pisarev, Yu. Gasparyan, A. Rusinov, N. Trifonov, V. Kurnaev, A. Spitsyn, B. Khripunov, T. Schwarz-Selinger, M. Rasinski, K. Sugiyama, Deuterium thermal desorption from carbon based materials: a comparison of plasma exposure, ion implantation, gas loading, and C-D codeposition, J. Nucl. Mater., 415 (2011) S785–S788.
- 8. A. Rusinov, Yu. Gasparyan, N. Trifonov, A. Pisarev, M. Mayer, M. Sakamoto, Investigation of defects in tungsten by probe fluence method, J. Nucl. Mater., 415 (2011) S645–S648.
- Y. Zayachuk, G. Bousselin, J. Schuurmans, Yu. Gasparyan, I. Uytdenhouwen, G. VanOost. Design of a planar probe diagnostic system for plasmatron VISIONI and its application for the study of deuterium retention in W-Ta alloys, Fusion Engineering and Design 86 (2011) 1153– 1156.
- O.V. Ogorodnikova, K. Sugiyama, A. Markin, Yu. Gasparyan, V. Efimov, A. Manhard, M. Balden, Effect of nitrogen seeding into deuterium plasma on deuterium retention in tungsten, Phys. Scr. T145 (2011) 014034.
- A. Airapetov, L. Begrambekov, S. Brimond, D. Douai, A. Kuzmin, Ya. Sadovsky, P. Shigin, S. Vergasov //Glow discharge cleaning of carbon fiber composite and stainless steel. Journal of Nuclear Materials 415 (2011) S1042–S1045.
- 12. L.B. Begrambekov, A.A. Gordeev, S.V. Vergasov, A.M. Zakharov. Desalination device for arid areas. Desalination and Water Treatment, Volume 31 (2011)387-390.
- 13. A.A. Stepanenko, R.D. Smirnov, V.M. Zhdanov, S.I. Krasheninnikov //On the thermal force acting on dust grain in fully ionized plasma, Phys. Plasmas 18, 033702 (2011).
- B.V. Kuteev, E.A. Azizov, A.S. Bykov, A.Yu. Dnestrovsky, V.N. Dokuka, G.G. Gladush, A.A. Golikov, P.R. Goncharov, M. Gryaznevich, M.I. Gurevich1, A.A. Ivanov, R.R. Khairutdinov, V.I. Khripunov1, D. Kingham, A.V. Klishchenko, V.A.Kurnaev, V.E. Lukash, S.Yu. Medvedev, P.V. Savrukhin, V.Yu. Sergeev, Yu.S. Shpansky, A. Sykes, G. Voss and A.V. Zhirkin //Steady state operation in compact tokamaks with copper coils// Nuclear Fusion 51 (2011) 073013

Отечественные журналы:

- Д.К. Когут, Н.Н. Трифонов, В. Котов //Численное моделирование изменения состава поверхности первого зеркала при облучении потоками частиц, характерными для установки ИТЭР" // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. - 2011. - вып. 4, с.60-64.
- 2. К.М. Гуторов, И.В. Визгалов, В.А. Курнаев // Генерация высоковольтных импульсов в автоколебательном разряде// Прикладная физика, 2011, №6, стр.87.
- И.Е. Березина, И.В. Цветков // Влияние наклонного магнитного поля на распределение частиц, падающих на поверхность обращенных к плазме элементов термоядерного реактора// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. - 2011. - вып. 4, с.80-89.

- 4. А.Н. Долгов, Н.В. Земченкова, Н.А. Клячин, Д.Е.Прохорович// Процессы формирования анизотропной функции распределения электронов по скоростям и рождения многозарядных ионов в плазме микропинчевого разряда, Физика плазмы, 2011, том 37, №1, с. 79–87.
- 5. А.Н. Долгов, Н.В. Земченкова, Н.В.. Клячин, Д.Е. Прохорович// Экспериментальные свидетельства убегания электронов в приосевой области Z-пинча в среде тяжелых элементов. Физика плазмы, 2011, том 37, No 3, с. 227–232.
- 6. Курнаев В.А. Итоги 19-ой международной конференции по взаимодействию плазмы в установках термоядерного синтеза// Физика плазмы, 2011, т37, №6 с.580-592.
- Алдияров Н.У., Гриднева Е.А., Коборов Н.Н., Курнаев В.А., Мит А.Г., Назаренко Л.М, Якушев Е.М. // Метод определения концентрации трития с использованием эффекта диссоциации пучков молекулярных ионов водорода на тонких углеродных фольгах //ЖТФ, 2011, т.81, 310, 60-57.
- 8. Мозгрин Д.В., Ходаченко Г.В., Степанова Т.В., Щелканов И.А., Ванцян М.А., Попова Г.В., Копылов В.М., Беседин С.П., Волков В.В., Дембо К.А. // Исследование возможности создания композитных металл/полимерных материалов нового типа на импульсной плазменной установке. // Вакуумная техника и технология. 2011. т.21. №3. С.185-188.
- 9. Берлин.Е.В., Григорьев В.Ю., Ходаченко Г.В., Степанова Т.В., Щелканов И.А. // Экспериментальное исследование характеристик плазмы индукционного ТСР разряда, создаваемой технологическим генератором газоразрядной плазмы. // Вакуумная техника и технология. 2011. т.21. №3. С.189-194.
- 10. А.В. Казиев, Г.В. Ходаченко, И.А. Щелканов // Исследование структуры сильноточного диффузного разряда// Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2, N 5. С. 449-454.

Международные конференции:

- E. D. Marenkov, S. I. Krasheninnikov, A. Yu. Pigarov, A. A. Pisarev, and I. V. Tsvetkov. On the thermal instability caused by plasma-wall coupling, Book of Abstracts of 13th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications and 1st International Conference on Fusion Energy Materials Science, 2011, P 119.
- 2. A.V. Golubeva, A.V. Spitsyn, N. Bobyr, M. Mayer, Yu. Gasparyan, D. Smirnov, V.M. Chernov, Hydrogen retention properties of V-4Cr-4Ti alloys, Ibid. P.126.
- 3. Yu. Gasparyan, S. Krat, M. Zibrov, M. Mayer, K. Sugiyama, A. Pisarev, Deuterium retention in co-deposited C-W-D films formed in magnetron deuterium plasma discharge, ibid, P.93.
- 4. L.B. Begrambekov, A.S. Kaplevskiy, Y.A. Sadovskiy, P.A. Shigin, A.M. Zakharov. Influence of deuterium ion and atomic exposure on dehydrogenation of C:H films // Ibid, P09A, p.71
- 5. L. Begrambekov, A. Kuzmin, A. Makarov, Ya. Sadovsky, P. Shigin. The Structure and Gas Trapping Properties of Plasma Deposited Carbon and Carbon-Tungsten Films // Ibid. P03A, p.59.
- N.S. Klimov, V.L. Podkovyrov, D.V. Kovalenko, A.M. Zhitlukhin, V.A. Barsuk, L.B. Begrambekov, P.A. Shigin, R.N. Giniyatulin, J.Linke, I.S. Landman, S.E. Pestchanyi, B.N. Bazylev, A. Loarte, B. Riccardi, V.S. Koidan. Tungsten and carbon based PFCs erosion and eroded material deposition under ITER-like ELM and disruption loads at the plasma gun facility QSPA-T // Ibid. O11, p.53.
- O.V. Ogorodnikova, K. Sugiyama, A. Markin, Yu. Gasparyan, V. Efimov, A. Manhard, M. Balden, Effect of nitrogen seeding into deuterium plasma on deuterium retention in tungsten, Ibid.P.158.
- 8. V.A.Kurnaev // Problems of plasma surface interactions in fusion devices, Italian-Russian meeting Plasma in astrophysics and in the laboratory. Ignitor challenge. 20-21 June 2011.
- E. D. Marenkov, S. I. Krasheninnikov, A. A. Pisarev, and I. V. Tsvetkov. On thermal instability caused by plasma-wall coupling. Book of reports of the 20th International conference Ion-Surface Interactions (ISI)-2011, Zvenigorod, Russia, 25-29 August 2011, Vol. 2, p. 275.
- 10. Y. M. Yurkevich, L. V. Misozhnikov, M. V. Atamanov, G. V. Khodachenko, A. A. Pisarev. Electron-beam and plasma technologies for production of nanoporous electrodes for electrolytic capacitors// Ibid, vol.2, p.153-155.
- В.С. Ефимов, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев, Исследование тонкой структуры спектров термодесорбции дейтерия из вольфрама, Труды XX международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2011)». Звенигород, 25-29 августа 2011, т.1, с.306-308.

- А.В. Голубева, А.В. Спицын, М. Майер, Ю.М. Гаспарян, Н.П. Бобырь, Д.И. Черкез, В.М. Чернов, М.В. Леонтьева-Смирнова, В.С. Ефимов, Взаимодействие дейтерия и плазмы с низкоактивируемыми конструкционными материалами, там же, т.2, с.289-291.
- Н.П. Бобырь, А.В. Спицын, А.В. Голубева, Ю.М. Гаспарян, Д.Ю. Смирнов, Поглощение водорода сплавом V-4CR-4Ti, там же, т.2, с.319-321.
- A. Pisarev, Yu. Gasparyan, A. Rusinov, N. Trifonov, Deuterium retention in carbon materials at plasma exposure, ibid, vol.2, p.282-284.
- 14. Yu. Gasparyan, S. Yarko, M. Mayer, A. Pisarev, Modeling of deuterium permeation through tungsten coated with a carbon film, ibid,vol.2, p.330-332.
- S.A. Krat, Yu. Gasparyan, M. Zibrov, A.A. Pisarev, M. Mayer, Deuterium retention in mixed C-W-D films deposited in magnetron discharge, ibid,vol.2, p.350-352.
- K. A. Moshkunov, I. V. Vizgalov, V. I. Burlaka, Yu. M. Gasparyan, A. A. Pisarev, Deuterium release from lithium irradiated by deuterium plasma, ibid,vol.2, p.373-376.
- 17. V.M. Zhdanov, A.A. Stepanenko. Application of Grad's method to analysis of transport phenomena in partially ionized divertor plasma, ibid, vol.2, p.336-337.
- К.М. Гуторов, И.В. Визгалов, В.А. Курнаев. Особенность вольтамперной характеристики электрода с тонкой диэлектрической пленкой вблизи плавающего потенциала // там же, т.2., с.333-335.
- Д.В. Иванов, В.А. Курнаев, Н.В. Мамедов, Д.Н. Синельников, Холодная эмиссия отрицательных ионов с пористого графита// там же, т.1, с.309.
- Д.В. Иванов, В.А. Курнаев, Н.В. Мамедов, Д.Н. Синельников, Применение спектроскопии рассеянных ионов для анализа тонких пленок при плазменном облучении // там же, т.1, с.313.
- 21. А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, С.В. Вергазов, А.Е. Евсин, А.С. Каплевский, Я.А. Садовский, П.А. Шигин. Закономерности и механизмы захвата водорода в углеграфитовый композит при облучении атомами с тепловыми скоростями // там же, т.1, с.36-41.
- 22. А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, А.Е. Евсин. Захват водорода в углеграфитовый композит при атомарном облучении // там же, т.2, с.278-281.
- 23. V. Kurnaev // Recent results on plasma surface interactions in fusion devices and proposals for KTM program// Abstract of International workshop «Innovation projecton creation of kazakhstani tokamak for material testing scientific research and international cooperation» September 5 to 7, 2011 Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan, 2011, p.
- I.E.Berezina, I.V.Tsvetkov // Influence of oblique magnetic field on distribution of charged particles impinging the first wall of a fusion reactor// Intern. workshop on plasma edge theory in fusion devices (PET-13) South Lake Tahoe, USA, 19-21 Sept. 2011.
- Rusinov A., Honda K., Sakamoto M., Zushi H., Tanabe T., Gasparyan Yu., Pisarev A., Simulation of deuterium trapping and thermal desorption from W exposed to low energy high flux plasma, JSPF Plasma Conference, November, 2011, Japan.
- A.V. Spitsyn, A.V. Golubeva, D.I. Cherkez, M. Mayer, Yu. Gasparyan, V.M. Chernov, V.S. Efimov, Deuterium Retention and Gas-Driven Permeation through the RAFMS RUSFER-EK-181, 15th International conference on fusion reactor materials, 16-22 October, 2011, 15-094.
- L.Begrambekov, A.Kuzmin, A.Makarov, Ya.Sadovsky, P.Shigin. Deposition of carbon and tungsten-carbon films in argon discharge with deuterium contaminant // Book of abstracts of 17-th international summer school on vacuum, electron and ion technologies, Bulgaria, Sunny Beach, September 19-23, 2011, P47-48.
- A.A. Stepanenko, R.D. Smirnov, V.M. Zhdanov, S.I. Krasheninnikov, "On the thermal force acting on dust grain in fully ionized plasma", тезисы для международной рабочей сессии NPP-2011.
- В.А.Курнаев. Современное состояние проблемы взаимодействия плазмы со стенками в токамаках // Тезисы XXXVIII Международной (Звенигородской) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород 14-18 февраля, 2011, с.23.
- В.А.Курнаев // Развитие лазерных и плазменных технологий в интересах Росатома в НИЯУ МИФИ, доклад на секции 11НТС Росатома 24 мая 2011.

- 31. К.М. Гуторов, И.В. Визгалов, В.А. Курнаев // Генерация высоковольтных импульсов в автоколебательном разряде // XXXVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород 14-18 февраля, 2011, с.332.
- 32. Г.В. Крашевская, М.М. Цвентух, С.А. Лепихов // «Анизотропия плазмы удерживаемой в сильно непараксиальных магнитных конфигурациях». Там же, С.101.
- 33. А.Н. Долгов, Н.В. Земченкова, Н.А. Клячин, Д.Е. Прохорович, Образование и транспортировка ионов в плазме разряда сильноточной вакуумной искры. Там же, с. 323.

Отечественные конференции:

- К.М. Гуторов, И.В. Визгалов, Ф.С. Подоляко, И.А. Сорокин // Диагностика микротечей в камеру термоядерных установок с использованием пучково-плазменного разряда // XIV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Звенигород, 2011, Сборник тезисов докладов, с. 123.
- А.В. Казиев, Г.В. Ходаченко, И.А. Щелканов, Исследование структуры сильноточного диффузного разряда // Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», 05-10 июня 2011, г.Звенигород, с. 104–105.
- О.А. Башутин, Е.Д. Вовченко, Э.И. Додулад, А.С. Савёлов, С.А. Саранцев. Исследование вклада материала электродов в плазму сильноточной вакуумной искры. XIV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП-14), Тезисы докладов, 5-10 июня 2011, г. Звенигород, Московской обл., с. 83-85.
- О.А. Башутин, Е.Д. Вовченко, Э.И. Додулад, А.С. Савёлов, С.А. Саранцев. Исследование вклада материала электродов в плазму сильноточной вакуумной искры. XIV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП-14), Тезисы докладов, 5-10 июня 2011, г. Звенигород, Московской обл., с. 83-85.
- 5. Е.О.Баронова, О.А.Башутин, Е.Д. Вовченко, Э.И.Додулад, В.Я.Никулин, И.Ф.Раевский, А.С.Савелов, С.А.Саранцев, П.В.Силин, А.М.Степаненко, Ю. А. Какутина, Л.А. Душина. Определение зарядового и компонентного состава периферийной плазмы пинчевых разрядов. XIV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП-14), Тезисы докладов, 5-10 июня 2011, г. Звенигород, Московской обл., с. 77-79.
- 6. Е.О.Баронова, О.А.Башутин, Е.Д. Вовченко, Э.И.Додулад, В.Я.Никулин, И.Ф.Раевский, А.С.Савелов, С.А.Саранцев, П.В.Силин, А.М.Степаненко, Ю. А. Какутина, Л.А. Душина. Исследование пространственной структуры пинчевого разряда с применением теневого фотографирования и интерферометров различного типа. XIV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП-14), Тезисы докладов, 5-10 июня 2011, г. Звенигород, Московской обл., с. 51-53.
- Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев. А.В. Грунин, С.В. Иванова, А.С. Каплевский, В.В. Квон. Влияние хромового покрытия на захват водорода в цирконий // Труды X международной конференции «Пленки и покрытия» (ПиП-2011), 31 мая-3 июня 2011, Санкт-Петербург, с.274-278.
- 8. Л.Б.Беграмбеков, А.А.Гордеев, А.А.Макаров, А.А.Кузьмин, П.А. Шигин. Формирование двухкомпонентных слоев, осаждаемых в газовом разряде //там же, с.353.
- Ю.М. Гаспарян, Закономерности проницаемости водорода через конструкционные материалы при ионном внедрении, Сборник докладов VII Международной школыконференции молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (IHISM'11), 24-28 октября 2011г., с.311-322.
- 10. А.А. Писарев, И.В. Цветков, Е.Д. Маренков, С.С. Ярко. Проницаемость водорода через металлы // там же, с.297-310.
- 11. Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев, А.В. Грунин, А.Е. Евсин, А.С. Каплевский. Захват водорода в цирконий при облучении атомами и ионами водорода // там же, с.359-360.
- Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев, А.В. Грунин, А.Е. Евсин, С.В. Иванова, В.В. Квон, А.С. Каплевский. Закономерности захвата и удержания водорода в цирконии с хромовым покрытием // там же, с. 323-340.
- К.М. Гуторов, И.В. Визгалов // Автоколебательный вторично-эмиссионный разряд // Материалы Международная конференция «Физика высокочастотных разрядов», Казань, 2011, с. 310-311.

Доклады, представленные на зимней научной сессии НИЯУ МИФИ 2011 года:

- 1. В.И. Бурлака, Ю.М. Гаспарян, М.С. Зибров, С.А. Крат, А.А. Писарев, М. Майер, Изучение соосажденных С-W-D пленок методом ядерных реакций и RBS.
- 2. В.С. Ефимов, Ю.М.Гаспарян, А.А.Писарев, Исследование формирования радиационных повреждений в вольфраме при облучении ионами дейтерия кэвных энергий.
- 3. С.В.Антоненко, Ю.М.Гаспарян, А.А.Писарев, В.А. Фролова, С.С. Чернова. Насыщение графитовой бумаги с нанотрубками водородом.
- 4. С.А.Баренгольц, Г.А. Месяц, М.М. Цвентух, Униполярные дуги на первой стенке термоядерных установок.
- 5. Э.И.Додулад, И.Ф.Раевский, С.А.Саранцев, А.М.Степаненко, Универсальный фокусирующий спектрометр для регистрации спектров плазмы.
- 6. Л.Г. Аскинази, В.Е. Николаева, Определение времен жизни заряженных частиц в L- и Hмодах и коэффициента рециклинга для токамака ТУМАН-3М.
- 7. А.А.Степаненко, С.И.Крашенинников, Р.Д.Смирнов, В.М.Жданов, О силах трения, действующих на пылевую частицу в полностью ионизованной плазме.
- Д.А.Ковалев, Б.А.Мягков, Д.Р.Хасая, Е.А.Шиканов, Разработка универсального генератора высоковольтных импульсов для излучателей рентгеновских квантов на основе взрывной эмиссии.
- Н.В. Власюк, И.В. Визгалов, Источники интенсивных пучков поляризованных протонов для ускорителей.
- 10. А.В.Казиев, Г.В.Ходаченко, И.А.Щелканов, Расчет областей зажигания разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях сложной конфигурации.
- 11. Е.Д.Маренков, С.И.Крашенинников, А.А.Писарев, И.В.Цветков, Термическая неустойчивость, вызванная взаимодействием плазмы со стенкой.
- 12. Л.Б. Беграмбеков, П.А.Шигин, Я.А.Садовский, А.С.Каплевский, Спектры термодесорбции водорода из циркония с хромовым напылением.
- 13. Л.Б.Беграмбеков, А.А.Гордеев, В.В.Квон, Защитное хромовое покрытие циркониевых поверхностей.
- 14. Д.В.Иванов В.А.Курнаев, Н.В.Мамедов, Д.Н.Синельников, Н.В.Татаринова, Массспектрометрия заряженных частиц при низкополевой эмиссии.
- 15. А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, С.А. Камнева, А.А. Кузьмин, Л.Н. Химченко, П.А. Шигин, Захват изотопов водорода в перенапыленные углеродные слои и углеродную пыль токамака T-10.
- Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев, А.А. Макаров, Формирование напылённых в плазме Cu-W слоёв.
- 17. Д.В. Иванов, В.А. Курнаев, Н.В. Мамедов, Д.Н. Синельников, Модернизированная установка для исследования взаимодействия ионов с поверхностью.
- 18. А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, А.Е. Евсин, Захват водорода в углеграфитовый композит СFC при электронном и атомном облучении.

Доклады, представленные на IX Курчатовской молодежной школе 22 – 25 ноября 2011 г.:

- 1. И.В. Визгалов, Г.С. Воронов, К.М. Гуторов, В.А. Курнаев, Ф.С. Подоляко, И.А. Сорокин. Диагностика микротечей воды в камеру термоядерных установок на примере стелларатора Л-2М.
- В.Е. Николаева, Д.К. Когут, В.А. Курнаев, П. Будаев, С.А. Грашин, R. Dejarnac, M. Вегtа. Наблюдения аномально высокого уровня турбулентности пристеночной плазмы в зоне с отрицательной кривизной магнитного поля: сравнительный анализ экспериментов на токамаках с круглым и D-образным сечениями.
- О.А. Бялковский, Э.И. Додулад, А.П. Кузнецов, И.Ф. Раевский, А.С. Савёлов, С.А. Саранцев, И.П. Шаповалов. Исследование плазмы микропинчевого разряда методами лазерной интерферометрии.
- Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев, А.В. Грунин, А.Е. Евсин, В.В. Квон А.С. Каплевский. Особенности насыщения циркония водородом в процессе облучения атомарными и ионными потоками.
- 5. Л.Б. Беграмбеков, А.А. Гордеев, А.В. Грунин, А.Е. Евсин, В.В. Квон, А.С. Каплевский. Влияние вакуумных условий на захват водорода в циркониевые изделия в процессе осаждения хромового покрытия.
- 6. Д.Д. Бернт, Ю.М. Гаспарян, М.С. Зибров, А.А. Писарев. Исследование защитных свойств углеродных покрытий на алюминии, наносимых в магнетронном разряде

- 7. Л.Б. Беграмбеков, А.С. Каплевский, Я.А. Садовский. Захват водорода в нержавеющую сталь при ее облучении в плазме.
- А.М. Мищенко, Л.Б. Беграмбеков, А.С. Каплевский, Б.А. Клюсс, А.А. Кузьмин. Углеродные и вольфрам углеродные слои, осаждаемые в плазме на нержавеющую сталь и вольфрам.
- 9. А.В. Шалпегин, А.В. Спицын, С.В. Янченков. Система измерения потоков дейтерия, инжектируемых в токамак Т-10.
- 10. Ю.М. Гаспарян, С.А. Крат, М. Майер, Б.А. Мусияченко, А.А. Писарев. Исследование накопления дейтерия в С-W-D пленках методом ядерных реакций.
- 11. В.М. Жданов, А.А. Степаненко. Уравнения переноса для многокомпонентной частично ионизованной пристеночной плазмы токамака.

Доклады, представленные на 17й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в МЭИ:

- 1. М.С.Зибров, С.А. Крат, В.И. Бурлака, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев. Термодесорбция С-W-D пленок, соосажденных в магнетронном разряде дейтериевой плазмы.
- 2. В.Е. Николаева, В.А. Курнаев. Моделирование взаимодействия дейтерий-тритиевой плазмы с пленкой лития, напыленного на вольфрам, в области дивертора установки ТИН.

Выставки:

- 1. Гуторов К.М, Визгалов И.В. Источник нейтронов на основе автоколебательного разряда, XIII выставка научно-технических работ «Наука и инновации НИЯУ МИФИ» в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ-2011.
- IV Международный Форум по нанотехнологиям RUSNANOTECH 2011, Прототип солнечной панели на гибкой основе для использования внутри помещения (INDOOR). Совместная разработка Лаборатории солнечных преобразователей ИБХФ РАН, ЗАО ОКБ "ТИТАН" и кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ.

Награды, премии, гранты

- 1. Гаспарян Ю.М., Грант Президента РФ на 2011-2012 гг.
- 2. Бородкина И.Е., Диплом за лучший доклад на школе-конференции «Взаимодействие водорода с конструкционными материалами».
- 3. Сорокин И.А., Диплом за лучший доклад IX Курчатовской молодежной научной школы
- 4. Гуторов К.М., Визгалов И.В., Диплом XIII выставки научно-технических работ «Наука и инновации НИЯУ МИФИ» в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ-2011.
- 5. Гаспарян Ю.М., Диплом за подготовку победителя конкурса школьных научных работ «ЮНИОР-2011».
- 6. Каплевский А.С., Диплом 3-ей степени за доклад на 2-ой всероссийской школе-семинаре «Функциональные наноматериалы для энергетики».
- 7. Айрапетов А.А., Диплом 1-ой степени за доклад на 2-ой всероссийской школе-семинаре «Функциональные наноматериалы для энергетики».
- 8. Николаева В.Е., Диплом за доклад на XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА".
- 9. Алхимова М.А., Стипендия Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Объекты интеллектуальной собственности:

- 1. Визгалов И. В. Гуторов К.М. Способ получения нейтронов в автоколебательном разряде, Ноу-хау, №8-2010 от 30.12.2010.
- 2. Визгалов И.В., Гуторов К.М. Способ получения плазмы высокой плотности в автоколебательном геликоном разряде, Ноу-хау, №9-2010 от 30.12.2010.
- 3. Когут Д.К., Трифонов Н.Н., Алгоритм модификации двухмерного/трёхмерного микрорельефа поверхности при ионном облучении, Программа для ЭВМ, № 2011619320 от 05.12.2011.

Учебные пособия

- 1. Гаранин С.Г. // Исследования по термоядерному синтезу на мощных термоядерных установках РФЯЦ-ВНИИЭФ, М.: НИЯУ МИФИ, 2011, 52с.
- Кирнева Н.А. // Сборник задач по курсу «Физические процессы в термоядерном реакторе» М.: НИЯУ МИФИ, 2011, 56с.
- 3. Морозов Д.Х. // Введение в теорию горячей плазмы, часть 1. Учебное пособие.- М.: НИЯУ МИФИ, 2011, 228 с.

Защищенные диссертации:

- 1. Земченкова Н.В. Процессы газообмена водородной плазмы с примесью кислорода с поверхностью нержавеющей стали, к.ф.м.н., специальность 01.04.08., М., НИЯУ МИФИ, сентябрь 2011.
- 2. Щелканов И.А. Сильноточный импульсный магнетронный разряд с автоускорением плазмы, к.ф.м.н., специальность 01.04.08., М., НИЯУ МИФИ, сентябрь 2011.
- 3. Русинов А.А. Захват и термодесорбция дейтерия в углеродных материалах при облучении плазмой, к.ф.м.н., специальность 01.04.08., М., НИЯУ МИФИ, ноябрь 2011.
- 4. Айрапетов А.А. Закономерности и механизмы захвата водорода в углеграфитовые материалы при облучении в плазме, к.ф.м.н., специальность 01.04.08., М., НИЯУ МИФИ, декабрь 2011.

Издания кафедры:

- 1. Годовой отчет по НИР за 2010 год (ISBN 978-5-7262-11489-4) Ред. В.А. Курнаев, М.: МИФИ 2011, 56с.
- Полвека с плазмой //Юбилейный сборник под ред. В.А.Курнаева, М.НИЯУ МИФИ, 2011, 248с.
- Труды авторов кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ// библиографический у3казатель.-М.НИЯУ МИФИ, 2011, 76с

Научно-организационные мероприятия, проведенные кафедрой в 2011г.:

- 1. Секция «Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез» на научной сессии МИФИ-2010, Москва, 3 февраля 2011 г.
- 2. XIX Конференция-семинар «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, 4-5 февраля 2011г.
- 3. XX Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» 25-29 августа 2011г., Звенигород (совместно с МГУ и МАИ).

ДИПЛОМНЫЕ ПРОЕКТЫ, ЗАЩИЩЕННЫЕ СТУДЕНТАМИ КАФЕДРЫ В 2011 ГОДУ С ПРИСВОЕНИЕМ КВАЛИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕР-ФИЗИК

N₂	Фамилия И.О. Руководитель Тема дипломного проекта			
		T12	2-21	
1	Березина Ирина Евгеньевна	Цветков И.В. НИЯУ МИФИ	Исследование влияния наклонного магнитного поля на распределение частиц, падающих на первую стенку термоядерного реактора	
2.	Гаврилин Роман Олегович	Голубев А.А. ИТЭФ	Диагностика плазменной мишени сильноточного разряда	
3.	 Ефимов Писарев А.А. Исследование формирования радиаци Виталий Сергеевич НИЯУ МИФИ повреждений в вольфраме при облучении и дейтерия кэвных энергий и влияния примесей на захват дейтерия в вольфрам 		Исследование формирования радиационных повреждений в вольфраме при облучении ионами дейтерия кэвных энергий и влияния примесей азота на захват дейтерия в вольфрам	
4.	4. Ильин Тилинин Г.Н. Подготовка к измерениям потоков атомов дв Владимир Юрьевич РНЦ КИ перезарядки на установке Т-10		Подготовка к измерениям потоков атомов двойной перезарядки на установке T-10	
5. Кулешин Стрелков В.С. Модернизация эндоскопической ог Эдуард Олегович РНЦ КИ системы, установленной на токаман Результаты экспериментов. экспериментов. экспериментов. экспериментов.		Модернизация эндоскопической оптической системы, установленной на токамаке T-10. Результаты экспериментов.		
6.	Раевский Илья Флегонтович	Раевский Савелов А.С. Разработка активной оптической системы Илья Флегонтович НИЯУ МИФИ основе лазера на парах меди для исследова плазменных образований		
7.	Сергеев Дмитрий Сергеевич	Скосырев Ю.В. РНЦ КИ	Метод измерения потоков атомов двойной перезарядки на установке T-10	
8.	Степаненко Александр Александрович	Жданов В.М. НИЯУ МИФИ	Уравнения переноса для многокомпонентной частично ионизованной пристеночной плазмы токамака	
9.	Суслин Святослав Викторович	Вихрев В.В. РНЦ КИ	Исследование углового распределения заряженных частиц в пинчевых установках на основе моделирования их траекторий	
10.	Хатипов Руслан Сергеевич	Литвинов Д.Н. ВНИИЭФ	Численное моделирование взаимодействия лазерного излучения сверхвысокой интенсивности с тонкими мишенями методом частиц в ячейке	
11.	Черкез Дмитрий Ильич	Голубева А.В. РНЦ КИ	Установка для измерения проницаемости материалов ТЯР. Результаты экспериментов.	
12.	Ярошевская Анна Дмитриевна	Коваленко Д.В. ТРИНИТИ	Влияние примеси аргона на преобразование энергии потока водородной плазмы в энергию излучения	
E12	E12-04			
1.	Власюк Никита Владимирович	Визгалов И.В. НИЯУ МИФИ	Методы повышения интенсивности источника протонов для поляризационных экспериментов на RHIC	
2.	Гайдай Александр Александрович	Петров С.Н. ВНИИЭФ	Регистрация рентгеновского излучения Kr из мишеней типа "газовый мешок", облучаемых на установке "Искра-5	
3.	Джангобегов Владимир Викторович	Олейник Г.М. ТРИНИТИ	Исследование стадии инициации проволок на установке «Ангара-5-1» с помощью датчика	

			напряжения, расположенного вблизи лайнера
4.	Казиев Андрей Викторович	Крашевская Г.В. НИЯУ МИФИ	Исследование структуры импульсного сильноточного диффузного разряда



В день защиты дипломов 22.02.2011. В первом ряду преподаватели (слева направо): А.А. Писарев, А.С.Савелов, В.А. Иванов, В.А.Курнаев, Э.А. Азизов (председатель ГЭК), Н.Г.Ковальский (председатель ГЭК), В.С. Стрелков, В.М. Жданов, Г.С.Воронов, Л.Б.Беграмбеков

Летняя практика школьников

N⁰	Фамилия И.О.	Лицей	Тема проекта	Руководитель	
	Весна				
1	Асхабов Умар Виситович	школа №978	Масс-спектроскопия отрицательных ионов при низкополевой эмиссии	Синельников Д.Н. Мамедов Н.В.	
2	Каверин Илья Александрович	школа №978	Моделирование прохождения ионов кэвных энергий через тонкие фольги	Синельников Д.Н. Мамедов Н.В.	
3	Дубин Роман Юрьевич	лицей №1547	Изучение зависимости захвата дейтерия в нержавеющую сталь при различных энергиях облучающих ионов дейтериевой плазмы	Садовский Я.А.	
4	Неретин Тимур Викторович	лицей №1547	Нанесение структурированных углеродных покрытий на алюминиевую фольгу	Зиборов М.С.	
5	Нигулас Анна Эдуардовна	лицей №1547	Моделирование транспорта распыленных частиц в магнетронном разряде	Маренков Е.Д.	
6	Пантелеева Наталья Николаевна	лицей №1547	Моделирование роста пленок под действием плазменного облучения	Маренков Е.Д.	
7	Рухая Михаил Вахтангович	лицей №1547	Получение углеродно- вольфрамовых пленок, исследование характеристик пленок в зависимости от соотношения напыляемых компонент	Кузьмин А.А.	
8	Рухая Ремико Вахтангович	лицей №1547	Напыление хромового покрытия на цирконий, модернизация электродной системы напылительной установки	Гордеев А.А.	
9	Федотова Анна Николаевна	лицей № 1511	Исследование роста кристаллитов оксида вольфрама в ходе химического осаждения из газовой среды	Гаспарян Ю.М.	
10	Аленина Анастасия Николаевна	гимн. № 1522			
11	Асеев Михаил Дмитриевич	сред.образов. школа № 1200	Исспелование автоколебательного		
12	Клюквин Артём Дмитриевич	Видновская сред.образов. школа № 6	разряда на установке ПР-2 Егоров		
13	Камышинский Роман Андреевич	гимн.№ 1522			
			Лето		
14	Секретев Петр Кириллович	Лицей № 1511	Определение параметров разрядного контура с помощью пояса Роговского в режиме трансформатора тока	Саранцев С.А.	
15	Косарев Дмитрий Владимирович	– Липей № 1511	Создание экспериментальной установки для вакуумного	Гаспарян Ю.М.	
16	Бодров Виктор Вадимович		напыления		
17	Курошев Антон Михайлович	Лицей № 1511	Создание генератора импульсов с регулируемой частотой для запуска высоковольтного генератора на основе тиратрона ТГИ1-1000/25	Саранцев С.А.	
18	Ким Андрей Дмитриевич	Лицей № 1511	Создание ШИМ регулятора тока для накала катода тиратрона ТГИ1-	Саранцев С.А.	

			1000/25		
19	Посмаков Николай Петрович	Лицей № 1511	Исследование спектров импульсного рентгеновского излучения	Додулад Э.И.	
20	Кельин Андрей Валентинович	Лицей № 1511	Плазменное нанесение многокомпонентных металлических слоев	Гордеев А.А.	
21	Пришвицын Александр Сергеевич	Пицей № 1511	Нанесение углеродных покрытий на	Гаспарян Ю М	
22	Лозбенев Николай Игоревич	лицеи № 1511	магнетронном разряде	i achapan io.wi.	
23	Бабич Илья Викторович	Лицей № 1511	Ознакомление с термодесорбционной спектрометрией на примере установки МИКМА	Каплевский А.С.	
24	Мельник Марина Владимировна	Лицей № 1511	Отработка методики создания многоканальных камер обскур для рентгеновского диапазона энергии квантов	Раевский И.Ф.	
			Осень		
25	Белов Павел Кириллович	Лицей № 1511	Удаление кислорода из нержавеющей стали при ее облучении в гелиевой плазме	Каплевский А.С.	
26	Емельяненко Андрей Сергеевич	Пицей № 1511	Рост кристаллов оксида вольфрама	Ефимор В С	
27	Косарев Дмитрий Владимирович	лицеи № 1511	материалов	Ефимов Б.С.	
28	Лозбенев Николай Игоревич	Лицей № 1511	Защитные покрытия на алюминии,	Зибров М С	
29	9 Пришвицын Александр Сергеевич		нанесенные в магнетронном разряде	эпоров м.с.	
30	Неретин Тимур Викторович	Лицей № 1547	Рост кристаллов оксида вольфрама на поверхности пористых материалов	Ефимов В.С.	
31	Котов Александр Владимирович	Лицей 1547	Исследование амплитудных частотных характеристик, возникающих в дуговом разряде	Даньшин В.	
32	Верещагин Михаил Евгеньевич	Лицей 1547	Установка "Лестница Якоба"	Даньшин В.	

Лозбенев Николай и Пришвицын Александр по результатам конкурса «Юниор-2012» получили право представлять Россию на конкурсе INTEL ISEF – май 2012 в США. Второе место на конкурсе «Юниор-2012» занял также Верещагин Михаил.

СПИСОК СОТРУДНИКОВ И АСПИРАНТОВ КАФЕДРЫ

Штатные преподаватели

Беграмбеков Л.Б.	проф.
Визгалов И.В.	доцент
Гаспарян Ю.М.	доцент
Гуторов К.М.	доцент
Дудкина Т.Д.	доцент
Жданов В.М.	проф.
Захаров А.М.	доцент
Кирко Д.Л.	доцент
Крашевская Г.В.	доцент
Курнаев В.А.	проф., зав. каф.
Писарев А.А.	проф.
Прохорович Д.Е.	доцент
Савелов А.С.	проф.
Салахутдинов Г.Х.	доцент
Шигин П.А.	доцент
Садовский Я.А.	ассистент

Научный сектор

Башутин О.А. Бердникова М.М. Борисюк Ю.В. Вайтонис В.В. Вергазов С.В. Вовченко Е.Д. Вовченко Д.Е. Гриднева Е.А. Иванов И.В. Калачев А.М. Коборов Н.Н. Королев Л.В. Перелыгин С.Ф. Политыко И.В Сотников В.М. Урусов В.А. Ходаченко Г.В. Степанова Т.В. Фетисов И.К.

H.C. инж. 1 кат. инж. 1 кат. м.н.с. H.C. с.н.с., к.ф.м.н. инж. 1 кат. н.с., к.ф.м.н. инж.вед. М.Н.С. инж. инж. 1 кат с.н.с,. к.ф.м.н. инж. с.н.с. к.ф.м.н. н.с. с.н.с., к.ф.м.н. инж. 1 кат. с.н.с, к.ф.м.н.

Совместители

Акишев Ю.С. проф. (ТРИНИТИ) Воронов Г.С. доцент (ИОФ РАН) Голубев А.А. проф. (ИТЭФ) Иванов В.А. доцент (ИОФ РАН) Ильгисонис В.И. проф. (ИФТ НИЦ КИ) Кирнева Н.А. доцент (ИФТ НИЦ КИ) Ковыльникова В.Н. инж. Кутеев Б.В. проф. (ИФТ НИЦ КИ) Мирнов С.В. проф. (ТРИНИТИ) Мозгрин Д.В. доцент (Минобрнауки) Морозов Д.Х. проф. (ИФТ НИЦ КИ) Наумов В.Г. проф. (ТРИНИТИ) Глова А.Ф. проф. (ТРИНИТИ) Стрелков В.С. проф. (ИФТ НИЦ КИ) Трубников Б.А. Черковец В.Е. Зимин А.М. Трифонов Н.Н. Цветков И.В.

проф.-конс. (ИФТ НИЦ КИ) проф. (ТРИНИТИ) инж. (МГТУ им.Баумана) доцент (Росатом) доцент (НИЯУ МИФИ)

Вспомогательный персонал

Барышев О.А. зав. уч. лаб. Гордеев А.А. инж. 1 кат. Золотовская С.В. инж. Сидорова О.Н. инж. Тимошкова О.С. ст. лаборант

Аспиранты

Быков И.О. Земченкова Н.А. Кузьмин А.А. Мамедов Н.В. Матвеев Д.И. Попова Е.А. Садовский Я. Щелканов И.А. Саранцев С.А. Додулад Э.И. Маркина Е.А. Маренков Е.Д. Бурлака В.И. Филимонов Е.В.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ РАБОТ

Айрапетов А.А.	29	Кюришита Х.	28
Баронова Е.О.	17	<u>Лепихов С.А.</u>	15, 16
Башутин О.А.	17	Литновский А.	20
Беграмбеков Л.Б.	25, 29, 30, 31	Майер М.	21, 24, 27, 28
<u>Бернт Д.Д.</u>	27	Мамедов Н.В.	26, 32
Беседин С.П.	12	Маренков Е.Д.	5
<u>Бородкина И.Е.</u>	8	Маркина Е.А.	28
Бруер У.	20	<u>Медников А.А.</u>	22, 23
Будаев В.П.	20	<u> Мищенко А.М.</u>	31
Ванцян М.А.	12	Мозгрин Д.В.	12
Вергазов С.В.	30	<u>Найденов И.В.</u>	11
Визгалов И.В.	11, 19, 32	<u>Николаева В.Е.</u>	20
Вовченко Е.А.	17	Никулин В.Я.	17
Волков В.В.	12	Нордлунд К.	5
Воронов Г.С.	19	Огородникова О.В.	22
Гаспарян Ю.М.	21, 22, 23, 24	Писарев А.А.	21, 22, 23, 24, 27, 28
Гордеев А.А.	25	Подоляко Ф.С.	11, 19
Грашин С.А.	20	<u>Попов А.П.</u>	26
<u>Грунин А.В.</u>	25	Попова Г.В.	12
Гуторов К.М.	11, 19	<u>Раевский И.Ф.</u>	17
Дембо К.А.	12	Рузик Д.Н.	27
Додулад Э.И.	17, 18	Савелов А.С.	17, 18
<u>Евсин А.Е.</u>	25, 29	Садовский Я.А.	30
Ефимов В.С.	22, 23	Саранцев С.А.	17, 18
Жданов В.М.	7	Силин П.В.	17
<u>Зибров М.С.</u>	27, 28	Синельников Д.Н.	26, 32
<u>Казиев А.В.</u>	13, 14	<u>Сорокин И.А.</u>	11, 19
<u>Каплевский А.С.</u>	25, 30	<u>Степаненко А.А.</u>	7
Кирко Д.Л.	18	Степаненко А.М.	17
Когут Д.К.	6	Степанова Т.В.	12, 13, 14
<u>Колодко Д.В.</u>	32	Трифонов Н.Н.	6
Комм М.	8	<u>Тумаркин А.В.</u>	14
Копылов В.М.	12	Урусов В.А.	9, 10
Котов В.	6	Ходаченко Г.В.	12, 13, 14
Кох Ф.	27	Хромов П.А.	13
<u>Крат С.А.</u>	21, 24	Цветков И.В.	8
Крашевская Г.В.	15, 16	Шигин П.А.	30, 31
Кузьмин А.А.	31	Щелканов И.А.	13, 14
Курнаев В.А.	5, 19, 20, 26, 32		
		•	

Подчеркнуты фамилии студентов

14 конференция-семинар «ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Пятница, 4 февраля

Начало в 10.00

Аудитория Актовый зал (главный корпус)

Председатель – профессор ПИСАРЕВ А.А.

	10.10-	КУРНАЕВ В.А.	
	10. 40	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»	
		Итоги 14 ITPA DIV SOL совещания в Сеуле в октябре 2010.	
	10.40-11.00	ХРИПУНОВ Б.И. ¹ , ГУРЕЕВ В.М. ¹ , ДАНЕЛЯН Л.С. ¹ , ЗАТЕКИН В.В. ² , КОЙДАН В.С.	
		¹ , КОРНИЕНКО С.Н. ¹ , КУЛИКАУСКАС В.С. ² , ЛАТУШКИН С.Т. ¹ , ПЕТРОВ В.Б. ¹ ,	
		РЯЗАНОВ А.И. ¹ , СЕМЕНОВ Е.В. ¹ , СТОЛЯРОВА В.Г. ¹ , УНЕЖЕВ Е.В. ¹	
		¹ РНЦ "Курчатовский институт"	
		² НИИЯФ МГУ им. М.В.Ломоносова	
		Вольфрам с высоким уровнем радиационных повреждений в стационарной	
		плазме – эрозия и накопление дейтерия.	
	11.00	ЛЮБЛИНСКИИ И.Е.', ВЕРТКОВ А.В.', ЕВТИХИН В.А.', ТАЖИБАЕВА И.Л. ² ,	
	11.20	МАЗЗИТЕЛИ Д., АГОСТИНИ П.	
		'ФГУП «Красная Звезда»,	
		⁴ Исследовательский центр ENEA, Фраскати, Италия	
		Исслеоовательский центр ЕNEA, Бразимона, Италия	
	11 00 11 10	модуль литиевого дивертора токамака ктм.	
	11.20-11.40	перерыв на кофе	
	11.40 -	БЕГРАМБЕКОВ Л.Б., БУЖИНСКИЙ О.И.	
	12.00	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»	
		О возможности создания тайлов, обеспечивающих устойчивую работу	
		дивертора ИТЕР.	
	12.00-12.20	ЗАЛАВУТДИНОВ Р.Х., ГОРОДЕЦКИИ А.Е., БУХОВЕЦ В.Л., ЗАХАРОВ А.П.	
		Учрежоение Россиискои академии наук Институт физическои химии и	
		электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН	
		эрозия а-с:п пленок, осажденных на w и мо, в кислородсодержащей	
	12 20 12 40		
	12.20-12.40	¹ РНП "Курцатовский институт"	
Гла Пурчалювский илопилуля Статистические характеристики леформации материалов, при пла		Статистические характеристики деформации материалов, при плазменных	
		воздействиях на мишени, моделирующие первую стенку ИТЭР	
	12.40	БЕГРАМБЕКОВ Л.Б. КАПЛЕВСКИЙ А.С., КУЗЬМИН А.А., МАКАРОВ А.А.,	
	13.00	САДОВСКИЙ. Я.А., ШИГИН П.А.	
		Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»	
		Закономерности формирования и захвата водорода в слои W-C,	
		осаждаемые в плазме.	
	13.00-14.00	Перерыв на обед	
	14.00-14.40	МАЙЕР М.	
Институт физики плазмы, Гархинг (Германия)		Институт физики плазмы, Гархинг (Германия)	
Hydrogen retention in tungsten: Laboratory experiments		Hydrogen retention in tungsten: Laboratory experiments	
	44 40 45 05	апо токатак experience (трансляция из Германии).	
	14.40-15.05	MAIBEEB Д.	
		Forschungzentrum Juelich (Lephanus)	
		wodening of plasma-snadowed and remote areas in TEXTOR with the 3D-GAPS	
		ГСОЦЕ, СТРАНСЛЯЦИЯ ИЗ ГЕРМАНИИ)	

15.05-	GIERSE N.
15.25	Forschungzentrum Juelich (Германия)
	Status of Laser Induced Ablation Spectroscopy (LIAS) at Forschungszentrum
	Jülich. (Трансляция из Германии)
15.25-15.45	Перерыв на кофе
15.45-16.05	ПОЗНЯК И.М., САФРОНОВ В.М., Н.И. АРХИПОВ, С.В. КАРЕЛОВ, Д.А.
	ТОПОРКОВ
	ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных
	исследований, Московская обл.
	Формирование и динамика примесей вольфрама в условиях, характерных
	для переходных плазменных процессов ИТЭР
16.05-16.25	МАРКИН А.В.
	Институт физической химии и электрохимии РАН, Москва
	Захват дейтерия и азота в вольфраме при его экспозиции в D+~1%N
	плазме.
16.25-16.45	ПЕСЧАНЫЙ С., ГАРКУША И., ЛАНДМАН И.
	ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных
	исследований, Московская обл.
	Моделирование остаточных термонапряжений в вольфраме после
	многократных тепловых нагрузок, аналогичных ELM.
16.45-17.05	МАРКИН А.И., СЫРОМЯТНИКОВ Н.И.
	ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных
	исследований, Московская обл.
	Защита стенки термоядерного реактора от внедрения и миграции трития.
17.05-17.25	ВОЛКОВ Н.В., КАЛИН Б.А.
	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
	Влияние распыления и ионного перемешивания на эрозию Ве и W под
47.05.47.50	пучком ионов с широким энергетическим спектром.
17.25-17.50	Дискуссия
17.50 -	Welcome together (103, корпус 33. кафедра физики плазмы, надо одеваться)
20.00	

Заседание №2

Суббота, 5 февраля

<u>начало в 10.00</u>

Аудитория 33-103

Председатель – профессор БЕГРАМБЕКОВ Л.Б.

10.00 – 10.15	Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, П.А. ШИГИН, Я.А. САДОВСКИЙ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Спектры термодесорбции водорода из циркония с хромовым напылением
10.15 – 10.30	Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, В.В. КВОН Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ» Защитное хромовое покрытие циркониевых поверхностей
10.30 – 10.45	В.И. БУРЛАКА, Ю.М. ГАСПАРЯН, М.С. ЗИБРОВ, С.А. КРАТ, А.А. ПИСАРЕВ, М. МАЙЕР ¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ¹ Институт Физики Плазмы им. Макса Планка, Гархинг, Германия Изучение соосаждённых С-W-D плёнок методом ядерных реакций и RBS
10.45 – 11.00	Д.В. ИВАНОВ В. А. КУРНАЕВ, Н.В. МАМЕДОВ Д. Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н. В. ТАТАРИНОВА Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Масс-спектрометрия заряженных частиц при низкополевой эмиссии

11.00	
11.00 -	
11.15	Л.Н.ХИМЧЕНКО, П.А.ШИГИН
	Российский научный центр « курчатовский институт», москва
	Захват изотопов водорода в напыленные углеродные слои и углеродную
11 15	
11.15 -	
11.50	Пациональный исслеоовательский яберный университет «мифи»
	при облучении ионами дейтерия кэвных энергий
11.30 -	КОФЕ-БРЭЙК
11.50	
11.50 -	МАРЕНКОВ Е.Д. ¹ КРАШЕНИННИКОВ, С.И. ² , ПИСАРЕВ А. А ¹ , ЦВЕТКОВ И.В. ¹
12.05	¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
	² University of California at San Diego, La Jolla, California 92093
	Термическая неустойчивость, вызванная взаимодействием плазмы со
	стенкой
12.05 –	Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, А.А. МАКАРОВ
12.20	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
	Формирование напылённых в плазме Cu-W слоёв
12.20 -	Д.В. ИВАНОВ. В.А. КУРНАЕВ. Н.В. МАМЕДОВ. Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ.
12.35	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
	Модернизированная установка для исследования взаимодействия ионов с
	поверхностью
	v
12.35 –	А.А. АИРАПЕТОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.Е. ЕВСИН
12.50	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
	Захват водорода в углеграфитовыи композит СFC при электронном и
	атомном оолучении
12.50 –	ПОЗНЯК И.М., САФРОНОВ В.М., Н.И. АРХИПОВ, С.В. КАРЕЛОВ, Д.А.
13.05	ТОПОРКОВ
	ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных
	исследований, Московская обл.
	Формирование и динамика примесей вольфрама в условиях, характерных
	для переходных плазменных процессов ИТЭР
13.05 –	НАГЕЛЬ М.Ю., МАРТЫНЕНКО Ю.В.
13.20	Российский научный центр « Курчатовский институт», Москва
	Моделирование роста осаждаемых плёнок
1	

Оригинал-макет подготовлен Степаненко А.А.

Подписано в печать 01.06.12	Формат 60×84 1/8	
Учизд. л. 7,0	Печ. л. 7,0	Тираж 100 экз.
Изд. № 002-2	Заказ 174	

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