(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР
КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ
ЗА 2010 ГОД

Москва 2011

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР
КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2010 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Москва 2011

УДК 533.9

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2010 г. / *Под ред. В.А. Курнаева.* М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 60 с.

Отчет кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ за 2010 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. В шестом разделе приводятся краткий обзор итогов конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью в установках термоядерного синтеза. Приведены также сведения о составе кафедры, работах, опубликованных в журналах и доложенных на конференциях в 2010 году, перечень защищенных на кафедре дипломных работ и диссертаций, и исследовательских работ школьников, участвующих в научных работах на кафедре. В приложениях дается также краткая информация о проведенных с участием кафедры в 2010 научных конференциях и семинарах.

This annual report of the Plasma Physics Department (PPD) of National Research Nuclear University MEPHI for 2010 represents main results of theoretical, numerical, experimental and technological investigations obtained by faculty and scientific stuff as well as by students in 2010. 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 sixth part contains a review of main results of the 19th conference on plasma surface interaction in fusion devices. 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 2010 are given. The short information on conferences held by Department in 2010 is also presented.

Редакционная коллегия

Председатель	-	*Курнаев В.А.*
Зам. председателя	-	*Писарев А.А.*
Научный секретарь	-	*Гаспарян Ю.М.*
	-	

ISBN 978-5-7262-1489-4

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.А. СТЕПАНЕНКО, Р.Д. СМИРНОВ, В.М. ЖДАНОВ, С.И. КРАШЕНИННИКОВ
О термосиле, действующей на пылевую частицу в полностью ионизованной плазме 5
Е.Д. МАРЕНКОВ, С.И. КРАШЕНИННИКОВ, А.Ю. ПИГАРОВ, А.А. ПИСАРЕВ, И.В. ЦВЕТКОВ
О термической неустойчивости, вызванной взаимодействием плазмы со стенкой 6
В.Е. НИКОЛАЕВА, Л.Г. АСКИНАЗИ
Баланс заряженных частиц в токамаке ТУМАН-3М 7
Д.К. КОГУТ, Н.Н. ТРИФОНОВ, В.А. КУРНАЕВ
Моделирование распыления и осаждения на макрочастицах и в ямках на поверхности бериллиевого тайла 8

2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

К.М. ГУТОРОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ
Особенность ВАХ электрода с тонкой диэлектрической пленкой вблизи плавающего потенциала 9
Н.В. ЗЕМЧЕНКОВА
Образование и транспортировка ионов в плазме разряда вакуумной искры 10
А.В. КАЗИЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ
Исследование структуры импульсного диффузного разряда низкого давления 11
И.А. ЩЕЛКАНОВ, А.В. КАЗИЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО
Создание покрытий с низкой шероховатостью в импульсном магнетронном разряде большой мощности 12
Ю.М. ЮРКЕВИЧ, Л.В. МИСОЖНИКОВ, М.В. АТАМАНОВ, А.А. ПИСАРЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО
Электронно-лучевая плазменная технология двухстороннего нанесения пористых покрытий на непрерывно движущуюся металлическую ленту 13
Н.В. ВЛАСЮК, И.В. ВИЗГАЛОВ
Источники интенсивных пучков поляризованных протонов для ускорителей 14

3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

Н.В. ЗЕМЧЕНКОВА
Развитие методов корпускулярной диагностики на примере разряда вакуумной искры 15
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, В.А. КУРНАЕВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, М.М. ЦВЕНТУХ
Исследование высокоэнергетичных электронов плазмы СВЧ разряда в конфигурации би-дипольной магнитной ловушки «МАГНЕТОР» по анализу рентгеновского излучения 16
О.Н.АФОНИН, И.В.ВИЗГАЛОВ, Г.С.ВОРОНОВ, В.А.КУРНАЕВ, В.Н.ОЧКИН, В.А.УРУСОВ
Проверка возможности спектроскопического обнаружения течей воды в ИТЭР на установках Л-2м, ПР-2 и «Течь» 17
О.А.БАШУТИН, Е.Д.ВОВЧЕНКО, Э.И.ДОДУЛАД, А.С.САВЁЛОВ, С.А.САРАНЦЕВ
Исследование вклада материала электродов в плазму сильноточной вакуумной искры 18
О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, Э.И. ДОДУЛАД, А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ
Оптимизация начальных условий формирования разряда малоиндуктивной вакуумной искры на установке ЗОНА-2 19
Е.О. БАРОНОВА, О.А. БАШУТИН, Е.А. ВОВЧЕНКО, Э.И. ДОДУЛАД, И.Ф. РАЕВСКИЙ, А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ, А.М. СТЕПАНЕНКО
Определение зарядового и компонентного состава периферийной плазмы пинчевых разрядов 20

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ

С.А. КРАТ, М.С. ЗИБРОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ
Захват и удержание дейтерия в смешанных C-W-D плёнках соосаждённых в магнетронном разряде в дейтерии 21

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. КУЗЬМИН, А.А. МАКАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН
Структура и сорбционные свойства углеродных и металл-углеродных слоёв, напылённых в плазме 22
Л.Б БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, Я.А. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН, А.М. ЗАХАРОВ
Влияние ионного и атомарного облучения на дегидрогенизацию С:Н пленок 23
В.С. ЕФИМОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ
Образование радиационных дефектов в вольфраме при облучении ионами дейтерия кэвных энергий 24
А.А. АЙРАПЕТОВ, Л.Б.БЕГРАМБЕКОВ, А.Е.ЕВСИН
Захват водорода в углеграфитовый композит при атомарном облучении 25
Ю.М. ГАСПАРЯН, С.С. ЯРКО, А.А. РУСИНОВ, А.А. ПИСАРЕВ
Модель проникновения дейтерия через металл, покрытый углеродной пленкой 26
Д.В. ИВАНОВ, В.А. КУРНАЕВ, И.С. ЛЕВИЦКАЯ, Н.В. МАМЕДОВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ
Холодная эмиссия отрицательных ионов с пористого графита 27
В.А. КУРНАЕВ, А.И. МАРКИН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н. СЫРОМЯТНИКОВ
Визуализация центров эмиссии заряженных частиц при холодной низкополевой эмиссии 28

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ

Ф.С. ПОДОЛЯКО, И.А. СОРОКИН, И.В. ВИЗГАЛОВ, К.М. ГУТОРОВ
Разработка и испытания термохимического источника паров воды для моделирования течи системы охлаждения 29
Д.В. ИВАНОВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.В. МАМЕДОВ, К.А. МИЛИКЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ
Применение спектроскопии рассеянных ионов для анализа состава мишеней и толщины тонких пленок при плазменном облучении 30
И.Д. ЕГОРОВ
Универсальный высоковольтный понижающий регулятор напряжения 31

6. ОБЗОРЫ / СООБЩЕНИЯ

В.А. КУРНАЕВ
Основные результаты 19-ой международной конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью в установках термоядерного синтеза 32
Б.А. ТРУБНИКОВ, О.Б. ТРУБНИКОВА
Два необычных плазменных примера приложения теории групп в природе 36

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Перечень трудов кафедры за 2010 год 40
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Дипломные проекты, защищенные студентами кафедры в 2010 году с присвоением квалификации инженер-физик, защищенные диссертации, летняя практика школьников 45
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Список сотрудников и аспирантов кафедры 48
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Именной указатель авторов работ 49
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Программа 13 конференции-семинара «Взаимодействие плазмы с поверхностью», НИЯУ МИФИ, 28 – 29 января 2010 г. 50
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Программа VII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», НИЯУ МИФИ, 30 ноября – 2 декабря 2010 г. 53

1. ТЕОРИЯ ПЛАЗМЫ

О ТЕРМОСИЛЕ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ПЫЛЕВУЮ ЧАСТИЦУ В ПОЛНОСТЬЮ ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

А.А. СТЕПАНЕНКО, Р.Д. СМИРНОВ[1], В.М. ЖДАНОВ, С.И. КРАШЕНИННИКОВ[1]

[1] *Калифорнийский университет в Сан-Диего, 92093, Калифорния, США*

Динамика пылевых частиц играет важную роль в различных плазменных средах, начиная от лабораторной плазмы и заканчивая астрофизической [1]. Среди различных сил, действующих на пылевую частицу в плазме, наиболее распространенной является сила трения, возникающая за счет столкновений заряженных частиц с пылью и обусловленная асимметрией функции распределения этих частиц. Наличие градиентов температуры в плазме приводит к тому, что помимо обычной силы трения, вызванной относительным движением частиц, возникает также термосила, действующая на пылевую частицу.

В экспериментах с лабораторной пылевой плазмой [1-2], где температура плазмы относительно мала и степень ионизации низка, обычно рассматривается термосила, вызванная взаимодействием пыли только с нейтральными частицами [3]. Однако недавно вопросы пылевой плазмы привлекли значительное внимание со стороны термоядерного сообщества [4,5]. Отчасти это было мотивировано угрозой, которую может представлять пыль в термоядерном реакторе вследствие радиационной и химической активности и накопления трития. В горячей и довольно плотной термоядерной плазме плотность нейтрального газа мала и в плазме существуют достаточно большие градиенты температуры. При этом вклад от взаимодействия с пылью плазменных компонент (ионов и электронов) в термосилу становится основным.

Выражения для ион-ионной термосилы хорошо известны. Однако, в отличие от ионов (которые можно рассматривать как материальные точки), пыль обладает конечными размерами и, таким образом, может поглощать частицы, сталкивающиеся с ней.

В настоящей работе в приближении 21N моментов метода Грэда [6] были получены выражения для термосилы и электронной силы трения, действующих на пылевую частицу, имеющую отрицательный или небольшой положительный заряд. Учитываются процессы поглощения и рассеяния заряженных частиц на пыли. Показано, что, в зависимости от размера пылевой частицы, могут преобладать разные компоненты термосилы. В случае, когда размер пылевой частицы намного меньше радиуса Дебая и пылевую частицу можно рассматривать как точечный заряд – преобладает компонента силы, связанная с рассеянием. В противном случае главную роль играют столкновения, вызванные поглощением. Было продемонстрировано, что сила трения, вызванная диамагнитным потоком плазмы, и холловская компонента термосилы, связанная с рассеянием ионов, могут быть сравнимы. Анализ силы трения и термосилы, действующих на пылевую частицу в термоядерных установках, показал, что при дозвуковых течениях плазмы в пристеночном слое преобладает параллельная компонента термосилы.

Литература

1. P.K. Shukla, A.A. Mamun, Introduction to Dusty Plasma Physics (Institute of Physics, Bristol, 2002).
2. V.E. Fortov, A.V. Ivlev, S.A. Khrapak, A.G. Khrapak, G.E. Morfill, Phys. Rep. 421, 1 (2005).
3. L. Talbot, R.K. Cheng, R.W. Schefer, D.R. Willis, J. Fluid Mech, 101, 737 (1980).
4. J. Winter, Plasma Phys. Controlled Fusion 46, B583 (2004).
5. S.I. Krasheninnikov, A.Yu. Pigarov, R.D. Smirnov, M. Rosenberg et al, The LHD Experimental Group, Plasma Phys., Controlled Fusion 50, 124054 (2008).
6. В.М. Жданов, Процессы переноса в многокомпонентной плазме, М.: ФИЗМАТЛИТ – 2009.

О ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ, ВЫЗВАННОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЫ СО СТЕНКОЙ

Е.Д. МАРЕНКОВ, С.И. КРАШЕНИННИКОВ[1], А.Ю. ПИГАРОВ[1], А.А. ПИСАРЕВ, И.В. ЦВЕТКОВ

[1] *Калифорнийский университет в Сан-Диего, 92093, Калифорния, США*

Накопление и проницаемость водорода через первую стенку термоядерных реакторов имеет огромное значение для токомаков. Взаимодействие плазмы с поверхностью приводит к существенным изменением в поведении разряда [1]. Высокие потоки энергии / тепла могут привести к повреждению первой стенки и освобождению захваченного в ней водорода.

Качественный анализ, выполненный в рамках предложенной в [2] 0D модели, показал возможность возникновения термических неустойчивостей из-за взаимодействия плазмы со стенкой. Причиной неустойчивости служит положительная обратная связь, возникающая из-за того, что увеличение температуры стенки приводит к увеличению выхода водорода из нее, что, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации водорода в плазме, росту излучения и потерь на перезарядку, вызывающих рост потока тепла из плазмы на стенку и увеличение ее температуры.

В этой работе представлен дальнейший анализ возникновения термической неустойчивости и сформулированы условия ее формирования. Баланс частиц и энергии в плазме описывается уравнениями, предложенными в [2]:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n}{\tau_p} + J\frac{A}{V} \tag{1}$$

$$\frac{dP}{dt} = H - \frac{P}{\tau_E} - n^2 R \tag{2}$$

где $\tau_{(...)}$ – эффективные времена, J – обратный поток водорода со стенки в плазму, A и V – поверхность и объем камеры, H – эффективная мозность нагрева.

Транспорт водорода и тепла в стенке описывается в соответствии с одномерной моделью. Анализ экспериментальных данных для десорбции водорода из графита и углеродных композитов показывает, что в большинстве случаев выход может быть достаточно точно описан в рамках модели десорбции первого порядка. Диффузия водорода считается очень быстрой. Если полное количество водорода в стенке есть C (ат./см^2), то

$$\frac{dC}{dt} = -C\frac{1}{\tau_t}\exp\left(-\frac{E_t}{T_0}\right) + S\left(1-h\right), \tag{3}$$

где S – поток водорода из плазмы на стенку, $h = C / C_{\max}$ – отношение захваченного водорода к максимально возможной концентрации, E_t – энергия захвата в дефекты, τ_t – характерное время, и T_0 – температура обращенной к плазме стороны стенки.

Профиль температуры описывается классическим уравнением теплопроводности. Это уравнение, совместно с уравнениями (1) – (3) представляют собой замкнутую систему уравнений, определяющих параметры стенки и плазмы. Эти уравнения нелинейные и в общем случае могут быть решены только численно. Вместе с тем, для исследования возможностей возникновения неустойчивостей в такой системе, можно получить дисперсионное уравнение, которое имеет вид:

$$\left(\gamma + \frac{1-\bar{h}}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_t}\exp\left(-\frac{E_t}{\bar{T}_0}\right) + \frac{\bar{S}}{C_m}\right)\left(\gamma + \frac{1}{\tau_E}\right) = \frac{\gamma\varepsilon\left(1-\bar{h}\right)}{\tau_p}\frac{\tanh z}{z},$$

где введены следующие безразмерные параметры: $z = \sqrt{\gamma L^2 / \alpha}$, $\varepsilon = 2\frac{E_t}{\bar{T}_0}\frac{\Delta\bar{T}}{\bar{T}_0}\xi_r$, $\xi_r = \bar{n}^2 R / H$ – отношение потерь на излучение к мощности нагрева, $\Delta\bar{T}$ – разница температур на внутренней и внешней сторонах стенки.

Литература

1. G. Federici, C.H. Skinner, J.N. Brooks, et al., Nuclear Fusion 41, 12R (2001)
2. S.I. Krasheninnikov, T.K. Soboleva, Physics of Plasmas 13, 094503 (2006)

БАЛАНС ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

В.Е. НИКОЛАЕВА, Л.Г. АСКИНАЗИ[1]

[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

В данной работе рассматривался баланс заряженных частиц в токамаке ТУМАН-3М. Для анализа баланса частиц применялось уравнение материального баланса, представленное в виде:

$$dN/dT = -N/\tau_p + S_v + S_w + S_{NBI} + S_{imp}\ , \qquad (1)$$

где $N = \langle n_e \rangle \cdot V$ – число частиц; $\langle n_e \rangle$ – средняя плотность плазмы; V – объем плазмы; τ_p – время удержания заряженных частиц, характеризующее потери частиц из плазмы; S_v – источник частиц, возникающий в результате ионизации атомов газа, поступающего в установку через клапан газонапуска; $S_w = R \cdot N/\tau_p$ – источник частиц, возникающий в результате ионизации атомов рабочего газа, десорбированных со стенок вакуумной камеры и диафрагмы, и пропорциональный потоку частиц и энергии, падающему из плазмы на стенку и диафрагму; R – коэффициент рециклинга; S_{NBI} – источник частиц, возникающий в результате ионизации атомов нейтральной инжекции; S_{imp} – источник частиц, связанный с ионизацией атомов примеси, десорбированных со стенки и диафрагмы.

Было проведено сравнение вкладов разных источников частиц в этом уравнении. В рамках данной работы, источником частиц, десорбированных с диафрагмы, можно пренебречь по сравнению с источником от стенки. В эксперименте с NBI нагревом, источник частиц, возникающий в результате ионизации атомов нейтральной инжекции, мал по сравнению со скоростью изменения плотности dn_e/dt, вызванной улучшением удержания при L-H переходе. Вклад от источника частиц, связанного с ионизацией атомов примеси, десорбированных со стенки и диафрагмы, в чистой плазме $(z_{eff} \sim 1)$ мал и не учитывается в уравнении материального баланса (1). Датчик измерения интенсивности свечения линии D_α в непосредственной близости к патрубку, через который производится газонапуск, отсутствует, но вклад источника частиц, возникающего в результате ионизации атомов газа, поступающего в установку через клапан газонапуска можно оценить аналитически при наличии L-H перехода:

$$S_v = (dn_e/dt) \cdot V/(1 - k), \qquad (2)$$

k – равно отношению интенсивностей источника заряженных частиц до и после L-H перехода.

В качестве меры источника заряженных частиц, поступающих со стенок камеры, использовался датчик интенсивности свечения линии D_α. Как известно [1], интенсивность линий D_α с высокой точностью пропорциональна скорости ионизации нейтралов при электронной температуре выше 10эВ. В рамках данной модели, время удержания электронов может быть вычислено на основании уравнения материального баланса (1) с использованием измерений свечений линии D_α. Данный метод определения времени удержания электронов плазмы нуждается в калибровке – определении численного коэффициента, связывающего интегральную интенсивность свечения линии D_α с количеством электронов, поступающих в плазму за счет ионизации атомов водорода. Калибровка датчика производилась по ионизационному пику.

В результате, в разряде с омическим L-H переходом, были определены времена удержания частиц в L- и H-модах соответственно:

$\tau_L = 3{,}2$ мс

$\tau_H = 5{,}4$ мс.

Поток частиц и энергии, попадающий на стенку токамака из плазмы, выбивает из нее адсорбированный рабочий газ (а также и примеси), который ионизуется и образует, таким образом, источник заряженных частиц S_w. Коэффициент пропорциональности R между потоком частиц из плазмы на стенку и источником частиц S_w называют коэффициентом рециклинга. С использованием калибровочного коэффициента датчика D_α, а также измеренных величин N и τ_p, был определен коэффициент рециклинга $R = 0{,}4$.

Оценка источника частиц, возникающего в результате ионизации атомов газа, поступающего в установку через систему газонапуска, составила $S_v = 1{,}3 \cdot 10^{21}$ c^{-1}.

Литература

1. L.C.Johnson, E.Hinnov, J. of Quant. Spectrosc. And Radiat. Transfer. 1973. Vol.13, pp.333-358
2. A. Pisarev // Journal of Membrane Science. 335 (2009) 51.
3. Daynes // H. Proc.Roy.Soc. 1920. 97. Ñ. 286-307.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ И ОСАЖДЕНИЯ НА МАКРОЧАСТИЦАХ И В ЯМКАХ НА ПОВЕРХНОСТИ БЕРИЛЛИЕВОГО ТАЙЛА

Д.К. КОГУТ, Н.Н. ТРИФОНОВ, В.А. КУРНАЕВ

Накопление трития в материалах первой стенки – одна из важнейших проблем безопасности ITER. Также, долговременное использование бериллиевых тайлов приводит к существенной модификации их поверхности. В частности, высокие тепловые нагрузки из-за ELMов могут привести к растрескиванию поверхности и осаждению капель бериллия и вольфрама на поверхности тайлов. Такие трещины и макрочастицы наблюдаются в установках и при тестах с высокой тепловой нагрузкой. Во время интенсивного нагрева может произойти испарение бериллия с последующим увеличением локального осаждения Be на стенке. В свою очередь, соосаждение бериллия сопровождается захватом изотопов водорода в приповерхностных слоях и, следовательно, накоплением трития. Развитие кода, позволяющего учитывать модификацию неоднородной поверхности тайла первой стенки при распылении нейтралами перезарядки и одновременном осаждении примесей, представляет большой интерес.

Код SCATTER [1] позволяет моделировать изменение 2D и 3D микрорельефа при ионном облучении с учётом процессов перепыления и осаждения примесей. Источник облучения представляет собой смесь частиц (D 50% + T 50%) с энергетическим распределением и потоком, предполагаемым для первой стенки ITER [1]. Максимальный флюенс 10^{25} м$^{-2}$ соответствует 10^{8} модельным траекториям падающих частиц. Расчёты проводятся для бериллия, как для кандидатного материала для первой стенки. Чтобы моделировать осаждённую макрочастицу (Be или W) или ямку на поверхности бериллиевого тайла, используется модель полукруга в случае 2D и полусферы в случае 3D. Примесные атомы Be осаждаются равномерно по поверхности с вероятностью прилипания равной единице. Скорость осаждения примеси Be соответствует определённой доле от потока нейтралов перезарядки.

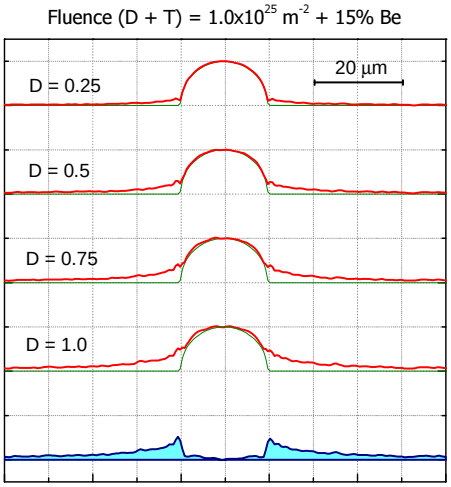


Рис. 1

В случае примесного потока 10% Be и 15% Be (рис. 1) для различных моделей поверхности присутствуют зоны осаждения и переосаждения Be. В зоне у подножия пылевой частицы и внутри ямки накапливается осаждённый бериллий. Это накопление прекращается после облучения дозой порядка 10^{25} ат/м^{2} когда профиль поверхности сглаживается. В случае потока примеси 15% Be (рис. 1) наблюдается динамическое равновесие, поскольку потоки распыления и осаждения очень близки. Но в присутствии шероховатостей на поверхности осаждение превалирует над распылением.

Эффективная скорость осаждения (динамическое равновесие между процессами осаждения, переосаждения и распыления) в случае примесного потока бериллия 10-15% от потока нейтралов для обоих типов поверхности составляет порядка 10^{15} ат/(см^{2}·с). Захват трития оценивается в соответствии с формулой (1) из [3]. Скорость осаждения рассчитывается как приращение объёма на поверхности бериллия на каждом шаге трансформации рельефа. Средняя величина захвата трития в процессе соосаждения Be составляет около 0.05-0.1 T/Be. Считается, что температура поверхности не изменяется и равна 500K. Захват трития в вольфрамовой пыли значительно меньше, чем в осаждённом бериллии. График зависимости накопления T от дозы облучения представлен на рис.2. Видно, что увеличение потока примесей Be с 10% до 15% от потока нейтралов для всех рассматриваемых моделей поверхности приводит к увеличению накопления трития более чем на порядок. Это свидетельствует о наличии динамического равновесия между процессами осаждения и распыления Be.

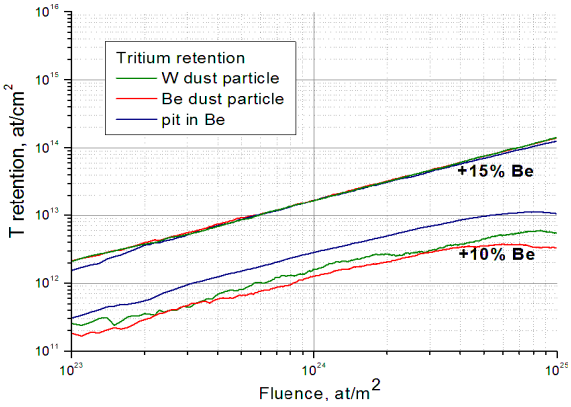


Рис. 2

Литература

1. Курнаев В.А., Трифонов Н.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2002. Вып. 3. С. 76.
2. R.Behrisch, G.Federici, A.Kukushkin, D.Reiter // J.Nucl.Mater. 313-316 (2003) 388.
3. G. De Temmerman and R.P. Doerner // Nucl. Fusion 49 (2009) 042002.

2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

ОСОБЕННОСТЬ ВАХ ЭЛЕКТРОДА С ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ ВБЛИЗИ ПЛАВАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА

К.М. ГУТОРОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ

Вольтамперная характеристика (ВАХ) погруженного в плазму электрода представляет большой интерес, поскольку позволяет определять поведение контакта плазма-поверхность. Процессы на контактирующей с плазмой поверхности могут быть определяющими для горения разряда. В качестве примера приведена ВАХ электрода с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности, погруженного в неравновесную плазму пучково-плазменного разряда с надтепловой электронной компонентой. *N*-образная форма характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления позволяет генерировать автоколебания в разряде. Ключевым элементом разрядной цепи является переход металл-диэлектрик-плазма, режим работы которого зависит от потенциала смещения электрода.

В области плавающего потенциала происходит смена направления тока через контакт и перезарядка пленки. Сложность измерений в этой области связана с изменением режима нагрузки источника смещения при смене направления протекания тока в цепи, что потребовало изготовления импульсной системы подачи смещения на электрод, формирующей развертку по напряжению для снятия ВАХ вблизи плавающего потенциала. При детальном изучении формы *N*-образной ВАХ была обнаружена особенность вблизи плавающего потенциала, выраженная как плато с близким к нулю током между участками резкого изменения тока (рис. 1).

Такая особенность возникает из-за наличия тонкой диэлектрической пленки на поверхности электрода (без пленки плато отсутствует). Плато с низким током соответствует процессу перезарядки пленки при изменении направления протекания тока в цепи электрода. Ширина плато позволяет определить величину падения потенциала в пленке. Непосредственное измерение этого параметра в эксперименте невозможно из-за сверхмалой толщины пленки и искажения результата при вносе дополнительных проводников в приэлектродную область. Падение потенциала позволяет судить о напряженности поля в пленке и режиме ее проводимости. Для пленки толщиной 10 нм и падения напряжения 40 В напряженность поля составит $4\cdot10^9$ В/м, что достаточно для полевой эмиссии электронов сквозь пленку в плазму.

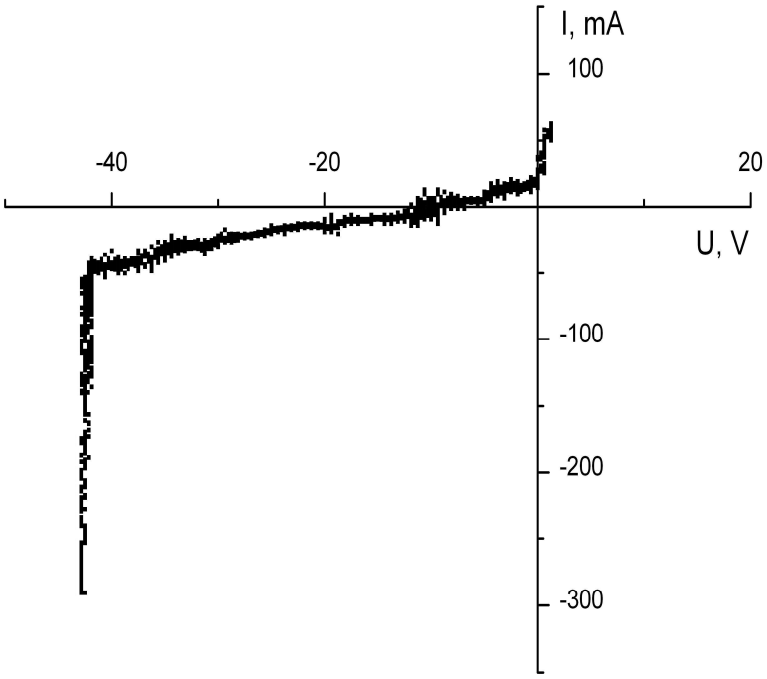


Рис. 1. Особенность ВАХ вблизи плавающего потенциала.

Еще одной особенностью представленной ВАХ является сильная крутизна участка слева от плавающего потенциала и резкое изменение сопротивления контакта при переходе от плато. Сопротивление падает от 600 Ом до 8 Ом. Переход происходит скачкообразно, значит, пленка образует единую рабочую поверхность, а не разбита на самостоятельные участки. Крутизна участка также подтверждает полевой механизм эмиссии электронов, при этом эффективный коэффициент вторичной электрон-электронной эмиссии достигает значаний ~100, что значительно превышает коэффициент вторичной эмиссии для материала электрода.

Крутой участок ВАХ может эффективно использоваться для работы в спокойном режиме, поскольку при нахождении рабочей точки в этой области разряд стабилизируется и шумы подавляются. Проведенный в работе анализ показывает, что детальное изучение ВАХ является действенным методом диагностики состояния поверхности обращенных к плазме электродов.

ОБРАЗОВАНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА ИОНОВ В ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

Н.В. ЗЕМЧЕНКОВА

Традиционно сильноточный разряд вакуумной искры рассматривается в качестве лабораторного источника вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения, а также в качестве объекта для моделирования процессов в плазме тяжёлых элементов крупномасштабных устройств типа Z-пинч с токами на уровне десятков *МА*. При этом считается, что сильноточный разряд вакуумной искры не является эффективным источником ионов, а для продвижения на пути создания приемлемого для решения различных прикладных задач источника ионов более перспективны так называемые слаботочные (достигаемый ток в разряде менее 10 кА) импульсные электрические разряды. Однако для создания горячей плазмы высокой плотности, в которой возможно рождение ионов высокой кратности, весьма привлекателен механизм радиационного сжатия, реализуемый в сильноточных импульсных разрядах.

Неоспоримым преимуществом сильноточного разряда вакуумной искры по сравнению с такими сильноточными электроразрядными устройствами как плазменный фокус в среде тяжелых элементов, Z-пинч с импульсным напуском газа и взрывающиеся проволочки является относительная простота конструктивного решения и эксплуатации.

Этими обстоятельствами продиктована необходимость исследования возможности реализации процесса радиационного сжатия плазмы в разряде вакуумной искры совместно с созданием условий для эффективной транспортировки ионов за пределы разрядной области.

Стоит отметить, что получение информации о механизмах формирования и разрушения плазмы как в межэлектродном промежутке, так и за его пределами, и экспериментальных результатов о параметрах корпускулярных потоков из области разряда является актуальной задачей не только на пути создания источника ионов, но и для других практических приложений плазмы разряда сильноточной вакуумной искры.

Цель работы – исследование пространственной структуры плазмы разряда и параметров ионной эмиссии, изучение влияния различных факторов на динамику разряда и корпускулярные потоки, формирующиеся в разряде.

В работе проведены исследования пространственного положения излучающих в рентгеновском диапазоне спектра с энергией квантов ≥3 кэВ областей разряда с помощью воздушной камеры-обскуры. Зарегистрировано местоположение области формирования плотной горячей плазмы, так называемой плазменной точки, на расстоянии 2 – 3 мм от поверхности внутреннего электрода на оси разряда при наблюдении в радиальном направлении. Поток электронов, ускоренных в области развития плазменной точки, вызывает свечение в рентгеновском диапазоне спектра поверхности внешнего электрода и плазмы, расположенной в пространстве между плазменной точкой и поверхностью электрода. С целью уточнения пространственной структуры источников рентгеновского излучения и локализации области формирования плазменной точки были получены изображения разряда в осевом направлении при меньшем числе экспозиций. Наблюдаемое в этом случае испускание рентгеновского излучения преимущественно из приосевой области разряда показывает, что плазменная точка является более ярким источником коротковолнового излучения по сравнению с приэлектродной плазмой.

Для получения наглядной информации о динамике разряда использовалась техника теневой фотографии с импульсным лазером в качестве осветителя. На полученных теневых фотографиях в процессе возрастания тока наблюдается выброс плотного вещества с поверхности внутреннего электрода преимущественно вдоль оси разрядного промежутка. За передним фронтом указанного потока вещества, то есть ближе к внутреннему электроду, происходит формирование перетяжки в момент времени близкий к моменту достижения максимума тока. На тенеграммах зафиксировано сжатие плазменного канала до радиуса ~ 100÷200 мкм.

Параметры корпускулярной эмиссии изучались с помощью времяпролетной методики. Зафиксированы устойчивые группы частиц, появление которых связано с процессами развития перетяжки токового канала.

Таким образом, проведенные исследования показали, что образование перетяжки и, соответственно, горячей плазмы высокой плотности, в которой становится возможным рождение ионов высокой кратности, происходит в продуктах эрозии внутреннего электрода. Эрозия внешнего электрода дает вклад, главным образом, в образование периферийной холодной плазмы, препятствующей выходу за пределы разряда высокоэнергетичных ионов высокой кратности. Потоки вытекающей из области развития перетяжки плазмы играют роль поршня, вовлекающего в процесс движения за пределы разряда частицы из пространства, занимаемого холодной периферийной плазмой. С ростом достигаемой в разряде силы тока происходит возрастание потока вещества с электродов, снижается степень его ионизации, уменьшается эффективность процесса пинчевания для разогрева плазмы.

Стоит отметить, что полученные результаты позволили наметить пути практической реализации сильноточного разряда вакуумной искры в качестве источника многозарядных ионов.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИМПУЛЬСНОГО ДИФФУЗНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

А.В. КАЗИЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ

В работе приведены результаты исследования структуры сильноточного диффузного разряда низкого давления (СДР). Сильноточный диффузный разряд – импульсный квазистационарный разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях; обнаружен в 1986 году на кафедре физики плазмы МИФИ. Его ключевыми особенностями являются отсутствие контракции, высокая пространственная однородность параметров плазмы и высокое значение плотности, отсутствие материала катода в плазме [1, 2]. СДР обладает следующими основными характеристиками: напряжение горения Uразр около 100 В, ток разряда Iразр – от 10 А до 2000 А, плотность тока на катоде j ~ 1–90 А/см^2, длительность квазистационарной формы свыше 1 мс [1].

Работы проводились на экспериментальном стенде «ПИНЧ» кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ. Для получения импульсного сильноточного диффузного разряда использовалось устройство с профилированными электродами [2]. Оно представляет собой систему из двух полых аксиально-симметричных электродов диаметром 120 мм, разнесенных на расстояние 10 мм и помещенных в магнитное поле многослойных катушек, включенных навстречу (конфигурация магнитного поля типа антипробкотрон или касп). Катод выполнен из алюминия, анод – из меди. Эксперименты проводились для смеси Ar и CO_2 с давлением P = (4–8)·10^{-3} Торр.

Для получения картины процесса зажигания рассчитана геометрия области, в которой происходит формирование плазмы. Найдена зона наиболее интенсивного взаимодействия плазмы с поверхностью катода. Для экспериментального определения величины катодного падения потенциала, которая была предварительно рассчитана из зондовых измерений, разработан и изготовлен электростатический сеточный энергоанализатор – с его помощью проводились измерения энергетического спектра ионов в катодном слое.

Результаты импульсной зондовой диагностики показали, что электронная температура, плотность и потенциал плазмы практически не меняются в области существования плазменного образования. Падение разрядного напряжения происходит в приэлектродных слоях. Анодное падение напряжения является положительным и составляет в среднем (0,3–0,4)Uразр, а катодное, соответственно, (0,6–0,7)Uразр. Это значение является оценкой энергии налетающих ионов для расчетов геометрических параметров конструкции сеточного энергоанализатора и схемы электрического питания его элементов.

Результаты экспериментов, проведенных с помощью специально изготовленного сеточного энергоанализатора, показали, что основной пик энергии ионов приходится на 30–40 эВ, что составляет ~ (0,5–0,6)eUразр. Этот результат подтверждает данные о распределении потенциала в катодном слое, полученные при обработке зондовых характеристик. Результат примечателен тем, что объясняет отсутствие заметного катодного распыления в процессе СДР (энергии ионов достаточно малы).

Рассмотрен вопрос о влиянии величины энергии, вкладываемой в импульс, на характер энергетического распределения ионов, приходящих на катод. На рис. 1 приведены энергетические спектры ионов для различных значений напряжения зарядки искусственной длинной линии, используемой для подачи импульса.

Оказалось, что принципиальных изменений функции распределения не происходит. Спектры меняются лишь количественно; положение максимума и ширина остаются практически одинаковыми, т. е. можно утверждать, что качественных изменений в структуре катодного слоя не происходит.

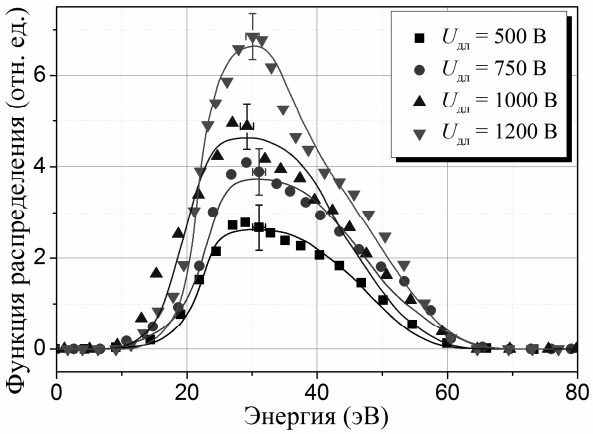


Рис.1. Энергетические распределения ионов при различном энерговкладе

Литература

1. Д.В. Мозгрин, И.К. Фетисов, Г.В. Ходаченко, Физика плазмы, 21 (1995) 422
2. I.K. Fetisov, A.A. Filippov, G.V. Khodachenko, D.V. Mozgrin, A.A. Pisarev, Vacuum, 53 (1999) 133

СОЗДАНИЕ ПОКРЫТИЙ С НИЗКОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

И.А. ЩЕЛКАНОВ, А.В. КАЗИЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО

Нанесение тонких пленок чистых металлов либо их нитридов/оксидов для создания покрытий с высокими прочностными характеристиками, повышенной износостойкостью и проводимостью, особыми фотокаталитическими свойствами, а также нанесение покрытий на особо хрупкие/нетермостойкие материалы широко изучается и применяется в некоторых отраслях промышленности. Отдельный интерес представляют методы нанесения покрытий, позволяющие формировать покрытия с рекордно низкой шероховатостью — величина неровностей на поверхности пленок не более нескольких нанометров. Это особенно востребовано при исследовании углеродных пленок малой толщины, например, графена.

Сильноточный импульсный магнетронный разряд большой мощности (СИМР) впервые полученный на кафедре физики плазмы МИФИ [1], может быть использован для нанесения особо гладких покрытий. Характерной чертой данного разряда является высокая степень ионизации распыленного материала катода [2]. Эта особенность позволяет эффективно управлять энергией ионов металла приходящих на подложку. Малое количество рабочего газа в плазме разряда [3] позволяет избежать его накопления в толще наносимого покрытия, что сказывается на его шероховатости. Кроме того сам процесс нанесения обеспечивает чистку поверхности подложки от загрязнений в процессе нанесения.

Нанесение покрытий в СИМР производилось на экспериментальном стенде ПИНЧ (МИФИ). Разрядное устройство представляет собой планарный магнетрон с катодом диаметром 90 мм. Конструкция магнитной системы позволяет регулировать величину магнитного поля у поверхности катода в пределах 300–1000 Гс. Для получения сильноточного магнетронного разряда в системе создавался предварительный разряд с напряжением 260–400 В, током I = 90–100 мА, плотностью плазмы n = 109–1010 см−3 и температурой электронов Te ≤ 20 эВ. Затем к разрядному промежутку прикладывался импульс напряжения от искусственной длинной линии с максимальным общим энергозапасом 6,3 кДж, переводящий стационарный магнетронный разряд в сильноточную форму, характеризующуюся током до 60 А, напряжением до 1000 В, длительностью импульса свыше 20 мс.

Решалась задача нанесения тонких металлических покрытий с характерным размером неровностей рельефа 10 нм на основу из кремния и кварца. Осаждение металлических покрытий осуществлялось при режимах работы импульсного разряда, имеющих высокую стабильность, — при работе количество срывов в дугу не превышало 10% от общего числа импульсов. Для обеспечения равномерности нанесения покрытия по площади образца подложка находилась на расстоянии 90 мм от поверхности мишени.

На образцы полированного кремния площадью ~ 4 см2 (100), имеющие характерную высоту выступающих частей рельефа около 2 нм, была нанесена пленка Al толщиной 200 нм, отрицательное смещение на подложку составляло от 0 до 400 В для разных образцов.

На образцы из полированного кварца площадью 1 см2, имеющие характерную высоту выступающих частей рельефа 7 нм, была нанесена пленка Ni толщиной 250 нм, отрицательно смещение на подложке варьировалось от 0 до 900 В.

Измерения профиля поверхности производились на установке СЗМ СОЛВЕР Р47-PRO фирмы «NT-MDT Приборостроение для нанотехнологий».

На пленках металла характерные размеры неровностей на образцах с алюминием составили от 5 до 10 нм для различных условий нанесения. Наблюдалось увеличение высоты выступающих элементов рельефа поверхности по сравнению с подложкой.

Поверхность пленки никеля отличалась более низкой шероховатостью чем подложка с характерным средним размером элементов рельефа 2 нм, однако покрытие имело сквозные дефекты, а также было замечено наличие макронеровностей, по-видимому, обусловленных либо капельной фазой, попадающей на подложку при дуговом режиме, либо наличием частиц пыли, прилипших к поверхности до начала нанесения. В работе рассматриваются возможные механизмы формирования пленок и их влияния на рельеф поверхности.

Авторы выражают благодарность в проведении измерений профиля поверхности Темирязевой М. П. (автономное учреждение городского округа Фрязино Московской области «Дирекция Наукограда»).

Литература

1. I. K. Fetisov, A. A. Filippov, G. V. Khodachenko, D. V. Mozgrin, A. A. Pisarev // Vacuum. 1999. V. 53. P. 133–136 [DOI: 10.1016/S0042-207X(98)00408-4]

2. J. Bohlmark, J. Alami, C. Christou, A. P. Ehiasarian, U. Helmerson // J. Vac. Sci. Technol. A. 2005. V. 23(1). P. 18–22 [DOI: 10.1116/1.1818135]

3. S. Kadlec // Plasma Processes and Polymers. 2007. V. 4(S1). P. S419–S423 [DOI: 10.1002/ppap.200731101]

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДВУХСТОРОННЕГО НАНЕСЕНИЯ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ НА НЕПРЕРЫВНО ДВИЖУЩУЮСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ЛЕНТУ

Ю.М. ЮРКЕВИЧ[1], Л.В. МИСОЖНИКОВ[1], М.В. АТАМАНОВ[2], А.А. ПИСАРЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО

[1]*ЗАО «ОКБ «Титан», Москва*
[2]*ЗАО «Инакотек», Москва*

Создание тонкопленочных покрытий с высокой пористостью является актуальной задачей в области разработки накопителей и преобразователей энергии, таких как аккумуляторы, топливные элементы, электролитические и суперконденсаторы. Эффективные преобразователи солнечной энергии с высоким КПД требуют создания высокопористых оксидных покрытий поверхностей коллекторов-преобразователей энергии излучения. В настоящее время широко изучается проблема накопления и хранения водорода в ячейках с объёмно-пористыми структурами с высокой удельной поверхностью. Особый интерес представляет задача создания пористых жаропрочных керамических покрытий для корпусов летательных аппаратов. Чрезвычайно актуальной в последнее время является задача разработки специальных покрытий для защиты от воздействия СВЧ-излучений как биологических объектов, так и объектов электроники.

В ЗАО «ОКБ «Титан» разработана уникальная технология нанесения пористых покрытий одновременно с двух сторон на непрерывно движущуюся алюминиевую ленту толщиной 10–30 мкм методом электронно-лучевого испарения. Толщина наносимого покрытия, например из титана, составляет величины от 0,1 до 2 мкм и зависит от режима работы установки – мощности электронно-лучевых испарителей, их количества и скорости движения ленты, которая составляет 2–20 м/мин. Установка электронно-лучевого испарения позволяет нанести двухстороннее покрытие толщиной 0,4 мкм на рулонную Al фольгу толщиной 20 мкм, шириной 0,5 м, и длиной 2000 м за 6 часов непрерывной работы установки. При этом температура фольги при нанесении покрытия составляет величину 350–400°С. Угол наклона фольги к высокотемпературному потоку пара определяет профиль столбчатой структуры наносимого покрытия. В свою очередь, структура покрытия и форма столбиков определяет пористость и удельную величину площади поверхности.

Основной технологической задачей, которая была решена в ОКБ «Титан», является разработка электродов для электролитических конденсаторов нового поколения. Достигнутые результаты с ёмкостью катодной фольги свыше 2000 мкФ/см2 с высокой стабильностью и низким удельным сопротивлением ≤ 5 мОм в изготовленной конденсаторной ячейке не имеют аналогов в мире и стимулируют ведущие страны по производству конденсаторов к научно-техническому сотрудничеству и внедрению полученных изделий в производство.

Ёмкость электролитического конденсатора определяется свойствами диэлектрического покрытия на аноде. Анодная фольга до сих пор производится методом электрохимического травления с последующим формованием. Удельная ёмкость обычно не превышает 100 мкФ/см2. Увеличение ёмкости за счет развития поверхности электрохимическими методами невозможно даже при использовании специально разработанной алюминиевой фольги с кубической структурой и толщиной до 100 мкм, травление которой даёт глубокую столбчатую структуру.

Была поставлена задача получить анодную фольгу путём окисления в плазме пористой структуры титана, напыленного электронно-лучевым методом. Образцы пористой катодной фольги с толщиной покрытия до 1 мкм помещались в кислородосодержащую плазму стационарного, импульсно-частотного, и импульсного магнетронных разрядов. Путем подбора режимов разряда были получены высокопористые структуры TiO2 с удельной емкостью свыше 500 мкФ/см2. Проведенные испытания образцов в разных электролитах показали их чрезвычайную стойкость к дальнейшему окислению, а также возможность использования их как в качестве анода, так и в качестве катода неполярного электролитического конденсатора [1].

Получение анодной фольги большой ёмкости потребовало увеличение ёмкости катода в случае полярного конденсатора. Была проведена серия экспериментов по плазменному облучению катодной фольги емкостью 1500–2000 мкФ/см2. Рабочий газ в плазменных установках представлял собой смесь азота с аргоном.

В результате облучения была получена катодная фольга с удельной ёмкостью выше 3000 мкФ/см2, структура которой состояла из TiN-δ, обладала высокой проводимостью и коррозионной стойкостью [2].

Литература

1. Л.В. Мисожников, И.Н. Юркевич, В.Ф. Кошелевский и др. Способ получения анодной фольги. Патент РФ, RU 2391442 C1, 10.06.2010.
2. Г.В. Ходаченко, А.А. Писарев, Г.В. Крашевская, И.А. Щелканов, И.Е. Орлов, А.Ю. Соколов, А.В. Казиев, М.В. Атаманов, А.А. Юрченко, К.А. Купцов // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 2. С. 277–283.

ИСТОЧНИКИ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Н.В.ВЛАСЮК, И.В.ВИЗГАЛОВ

Эксперименты с поляризованными по спину заряженными частицами проводятся на ускорителях с 50-х годов. В первых экспериментах использовалось двойное рассеяние изначально неполяризованных частиц. Такой подход позволял получать потоки поляризованных частиц, бомбардирующих мишень, чрезвычайно низкой интенсивности, что затрудняло проведение измерений характеристик спин зависимых ядерных реакций и элементарных взаимодействий. Более 50-ти лет развивается техника источников поляризованных протонов и других легких ядер, основанная на тонких атомных, плазменных и пучковых процессах. В результате появилась возможность инжектировать в ускорительные системы изначально поляризованные по спину ядра и увеличить интенсивность их взаимодействий с мишенью на многие порядки. На современном этапе развития физики фундаментальных взаимодействий большое значение приобретают эксперименты со столкновениями поляризованных по спину протонов релятивистских энергий. Программы проведения поляризационных исследований спиновых характеристик взаимодействия и спиновой структуры адронной материи имеют многие ускорительные лаборатории. Все действующие и разрабатываемые источники интенсивных пучков поляризованных протонов и легких ядер в своей основе имеют газоразрядные плазменные ионизационные и зарядообменные системы В настоящее время наиболее высокие интенсивности и энергии для поляризованных протонов достигнуты на коллайдере RHIC Брукхевенской Национальной Лаборатории.

Между БНЛ и МИФИ имеется договор о сотрудничестве в поляризационных экспериментах, в частности, в разработке методов повышения интенсивности пучков. В настоящее время на RHIC в качестве инжектора поляризованных протонов используется источник OPPIS (optically pumped polarized ion source), разработанный А.Н.Зеленским. Как и в других типах источников ядерно поляризованных ионов в нем происходит передача спиновой поляризации от электрона на внешней оболочке атома ядру по механизму сверхтонкого резонанса. Источник работает в сильном магнитном поле, что потребовало использования сверхпроводящего соленоида. Первичный пучок протонов с энергией 3 кэВ формируется с помощью плазменного ЭЦР источника. Исходная электронная поляризация возникает при взаимодействии валентных электронов паров рубидия с поляризованным лазерным излучением. Протонный пучок из ЭЦР источника в поляризованной Rb мишени перезаряжается в пучок электронно-поляризованных атомов. Далее в специальном устройстве с большим градиентом магнитного поля происходит резонансная передача электронной поляризации протону, после чего атомный пучок уже на паровой натриевой мишени перезаряжается при сохранении протонной поляризации в отрицательные ионы водорода, которые и поступают в систему инжекции первой линейной ступени ускорителя с общим током на уровне одного мА. Перечисленные элементарные процессы проходят со значительной потерей интенсивности, в результате чего загрузка ускорителя по сравнению с неполяризованными пучками снижается, и эффективность всего ускорительного комплекса падает. В настоящее время стоит задача поднять интенсивность поляризованных пучков до уровня неполяризованных.

Поскольку существующая Rb поляризованная мишень позволяет перезарядить на порядок более интенсивный пучок протонов, модернизацию всего инжекторного комплекса следует начинать с источника и формирующей системы исходного протонного пучка. Отработка методов повышения интенсивности первичного пучка проводится на специальном экспериментальном стенде. Дипломник Никита Власюк в 2010 году был приглашен в БНЛ для ознакомления с OPPIS и участия в первых работах по реализации идеи А.Н.Зеленского, которая состоит в замене ЭЦР источника с ограниченной плотностью ионного пучка на инжектор нейтральных атомов. Он должен геометрически фокусировать очень интенсивный пучок быстрых атомов на приосевую область сильного магнитного поля OPPIS для формирования интенсивного протонного пучка. Инжектор разработан и изготовлен в Новосибирском ИЯФ. Такая схема потребует серьезной перестройки OPPIS, поскольку потребуется существенное наращивание длины пучкового тракта, введения дополнительных средств вакуумной откачки, создания гелиевой мишени для ионизации быстрых атомов и системы торможения интенсивного протонного пучка до оптимального для перезарядки на рубидиевой мишени значения энергии в 3 кэВ. Первые эксперименты на стенде (пока без поляризации) показали общую работоспособность схемы и необходимость очень точной настройки ионнооптической системы инжектора.

На кафедре разрабатывается и альтернативная схема с использованием автоколебательного геликонного разряда, эффективно работающего в сильном магнитном поле и не имеющего ограничения по плотности генерируемой эмиссионной плазмы, связанного со скинированием при введении внешних ВЧ полей. Более того, как показано в предварительных экспериментах, плазменный канал стягивается к оси разрядной системы, а флуктуации электрического поля в приповерхностном слое эмиссионного электрода могут быть существенно уменьшены, что выгодно для снижения начального фазового объема эмитируемого протонного пучка. При этом предлагаемый источник полностью вписывается в существующие вакуумную и магнитную системы OPPIS.

3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ПРИМЕРЕ РАЗРЯДА ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

Н.В. ЗЕМЧЕНКОВА

Методы корпускулярной диагностики в списке методов, применяемых для исследования параметров плазмы пинчующихся разрядов в среде тяжёлых элементов, занимают весьма скромное место. Явное предпочтение отдаётся методам диагностики плазмы разряда, базирующимся на лазерном зондировании (тенеграфия, интерферометрия) и спектроскопии собственного излучения плазмы. С точки зрения повышения достоверности в интерпретации получаемых результатов измерений и их информативности представляют интерес параллельные измерения параметров плазмы разряда, а также расширение диапазона используемых корпускулярных диагностик.

Предметом исследования в данной работе является разряд вакуумной искры, плазмообразующим элементом в котором служит материал эродирующих электродов (железо).

Следует отметить, что разряд вакуумной искры является удобным плазменным объектом для применения времяпролетной методики и зондовой диагностики [1, 2]. Однако, предложенный в цитируемых работах способ определения концентрации ионов в потоках из области ионного насыщения регистрируемых вольтамперных характеристик является не совсем корректным, поскольку среднеквадратичная тепловая скорость ионов сравнима по величине с их направленной скоростью. Учет только направленной скорости ионов при оценке их концентрации влечет за собой завышение истинной величины этого параметра.

Предложена упрощенная модель расчета концентрации ионов в плазме, движущейся относительно детектирующего устройства, учитывающая как направленную скорость ионов в составе плазменных потоков, так и тепловую скорость ионов в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой. Рассчитанные в рамках предложенной упрощенной модели значения ионной концентрации в среднем на 20 – 30% меньше полученных ранее [1, 2].

Адекватность предложенной модели подтверждена результатами расчетов параметров движущейся относительно зонда плазмы [3].

Ввиду отсутствия в лаборатории прибора для регистрации распределения эмитируемых из разряда вакуумной искры частиц по зарядовым состояниям, предложен метод определения среднего заряда на одну эмитируемую частицу. Суть его заключается в совместном использовании баллистического маятника и плоского коллектора при отрицательном потенциале смещения.

Следует отметить, что применение баллистического маятника для определения параметров плазменных потоков из разряда вакуумной искры было осуществлено ранее в работе [4]. Однако в указанной работе расчет динамики баллистического маятника проводился по модели математического маятника, что, безусловно, является весьма приближенным методом. Более корректный расчет динамики отклонения баллистического маятника при воздействии на него корпускулярных потоков возможен с использованием уравнений движения твердого тела или законов сохранения момента импульса системы баллистический маятник – корпускулярные потоки и закона сохранения полной механической энергии баллистического маятника после передачи ему импульса потока.

В данной работе на основании законов сохранения момента импульса и полной механической энергии получено выражение, связывающее между собой число налетающих частиц и величину максимального смещения маятника, т.е. расстояние между точками пересечения плоскостью маятника фиксированной горизонтальной прямой в состоянии равновесия и в состоянии максимального отклонения подвеса от вертикали. Оказалось, что в отличие от результатов работы [4] регистрируемое число налетающих частиц меньше в среднем на 30%.

С целью автоматизации и ускорения процесса обработки данных разработан программный код, позволяющий из регистрируемых в эксперименте сигналов непосредственно получать требуемые аналитические распределения и зависимости.

Литература

1. А.Е. Гурей, А.Н. Долгов, Д.Е. Прохорович, А.С. Савёлов, А.А. Тихомиров. Физика плазмы, 2004, том 30, №1, с. 41 – 46.
2. А.Н. Долгов, Д.Е. Прохорович. Прикладная физика, 2008, №3, с. 52 – 58.
3. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме, М., Атомиздат, 1969, – 243 с.
4. К.Е. Быстров, Д.И. Марцовенко, Н.Н. Пильгаев, Д.Е. Прохорович. Сборник тезисов докладов XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 12-16 февраля 2007 г., с. 159.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ СВЧ РАЗРЯДА В КОНФИГУРАЦИИ БИ-ДИПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ «МАГНЕТОР» ПО АНАЛИЗУ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, В.А. КУРНАЕВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, М.М. ЦВЕНТУХ[1]

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, Москва, Россия*

На установке «Магнетор» [1] реализована магнитная конфигурация, создаваемая двумя соосными токовыми катушками, находящимися в одной плоскости, токи в которых протекают в различных направлениях. При этом вокруг внутренней катушки формируется сепаратриса, внутри которой происходит удержание плазмы. Данная установка относится к классу установок, в которых принципиально возможно достижение больших β без потери устойчивости плазмы являются установки с простой дипольной магнитной конфигурацией, действующие на основе критерия конвективно-устойчивого профиля давления полученного Б.Б. Кадомцевым [2]. Результаты ранее проведенных работ по измерению в установке распределения плазменного давления без учета быстрой электронной компоненты и их сравнение с теоретическими расчетами данными показали, что плазма имеет устойчивый профиль давления за счет более пологого экспериментального профиля [1]. Наличие же быстрой электронной компоненты было показано регистрацией рентгеновского излучения ≥ 3 кэВ слабой интенсивности [1].

Для определения положения и формы источника излучения была проведена серия экспериментов с камерой обскурой, а также косвенно оценена энергия быстрых электронов. Камера обскуры представляла собой экран из алюминиевой пластины толщиной 2 мм с проделанным в ней отверстием диаметром 3 мм. Рентгеновская фотопленка, имеющая форму квадрата со стороной 50 мм и помещенная в фильтр из черной бумаги, крепилась на расстоянии 20 мм от экранирующей пластины. Камера-обскуры располагалась на оси системы параллельно плоскости токовых колец (рис. 1), расстояние от пленки до поверхности внутренней катушки магнитного поля составляло 280 мм, чтобы вся плоскость катушек фиксировалась на пленке. Эксперимент проводился в течении 50 с, меньшее время горения разряда не позволяло зарегистрировать излучение из-за малой интенсивности излучения, проходящего через отверстие 3мм камеры обскуры. В качестве рабочего газа использовался воздух при давлении $2\cdot10^{-5}$ Тор, при котором достигается максимальная плотность плазмы [3].

На представленной на рис. 2 обскурограммы видно, что источником излучения является некая кольцевая область. Засветка пленки по кольцу равномерная, показывающая, что взаимодействие быстрых электронов с радиальными опорами внутреннего кольца несущественно.

Для определения спектра излучения плазмы был использован метод «серых» фильтров [3]. В качестве детекторов в экспериментах использовались прокалиброванные рентгеновские фотопленки (РФ) и термолюминесцентные детекторы (ТЛД) из LiF. В качестве фильтров поглощения использовалась алюминиевая фольга (Al) различной толщины (10 ÷ 500 мкм). Детекторы располагались в боковом патрубке, перпендикулярном плоскости тонких колец, в вакуумной камере на расстоянии 30 см от образованной плазмы. Облучение детекторов происходило при тех же условиях, что и для камеры обскуры.

На рис. 3 показан восстановленный спектр рентгеновского излучения. Восстановление спектра проводилось методом эффективных энергий по измеренной кривой ослабления. Полученный спектр монотонный и достигает значения энергий рентгеновских квантов 25 кэВ.

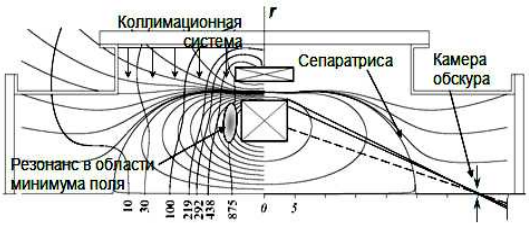


Рис.1. Расположение диагностических устройств и возможного источника

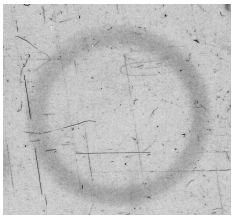


Рис.2. Обскурограмма

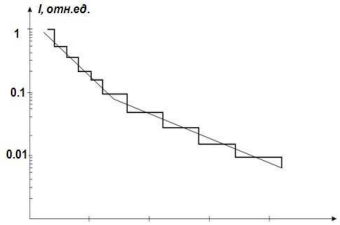


Рис.3. Энергетический спектр быстрых электронов

Следует подчеркнуть, что пересечение частью силовых линий края внутренней катушки не препятствует ЭЦР-ускорению электронов до энергий более 25 кэВ.

Литература

1. G. V. Krashevskaya, V. A. Kurnaev, and M. M. Tsventoukh, Proc. of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic, P. 3931.
2. Кадомцев Б.Б. // Физика Плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. М.: изд-во АН СССР, 1958. Т. 4. С.353
3. Т. Стрэттон //Рентгеновская спектроскопия / Под ред. Хаддлстоуна Р.,Леонарда С.М.: Мир, 1967, с. 297.

ПРОВЕРКА ВОЗМОЖОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕЧЕЙ ВОДЫ В ИТЭР НА УСТАНОВКАХ Л-2М, ПР-2 и «ТЕЧЬ»

О.Н.АФОНИН[1], И.В.ВИЗГАЛОВ, Г.С.ВОРОНОВ[2], В.А.КУРНАЕВ, В.Н.ОЧКИН[1], В.А.УРУСОВ

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, Москва,*
[2] *ИОФ РАН им. А.М.Щербакова, ул.Вавилова 38, Москва,*

В рамках выполнения, выполняемого в НИЯУ МИФИ, ИОФ РАН, ФИАН им. Лебедева и НИЦ Курчатовскимй институт комплексного проекта по разработке спектроскопического метода обнаружения течей в ИТЭР в ИОФ РАН на стеллараторе Л-2М были проверены различные режимы: чистящий тлеющий разряд (GDC), омический разряд (OH) и разряд с ECR нагревом. В тлеющем разряде в He при давлении P ~ 0.5-1 Па, и I ~ 1-2 А измеренные плотности n_e и температуры T_e оказались близкими к GDC в ИТЭР. При хордовой яркости ~ $1 \cdot 10^9$ фотон./с/стер/см^2, в диапазоне спектра, где должно наблюдаться свечения OH никаких посторонних излучений не обнаружено. В омическим режиме (при токе плазмы Ip = 20kA, и мощности P_{OH} = 60-80кВт, n_e = $1\text{-}3 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$) градиент T_e равен 5 кэВ / м. Этот режим L-2M может быть использован для обнаружения утечек воды в начальной фазе L-режиме в ИТЭР (до перехода на H-режим).

ЭЦР разряд с высокой мощностью гиротрона (450kW) получен H-режим, с транспортным барьером на границе и значениями градиентов n_e, и T_e близкими к таковым в H-режиме ИТЭРа. В общем, эксперименты, проведенные в различных режимах Л-2М, продемонстрировали соответствие условиям спектроскопического воды обнаружения утечек воды в ИТЭР.

Экспериментальные исследования излучения из атомов ксенона при взаимодействии с плазмой в Л-2М в OH и ECRH режимах показали, что Xe может также быть использован как добавка в воде для обнаружения утечки воды. Когда атомов ксенона попадают в горячую плазму, они быстро ионизируется. Спектр излучения ионов Xe II содержит ряд ярких линий, которые лежат в области спектра удобной для измерений. В экспериментах на Л-2М были обнаружены четыре линии мультиплета 6s 2S - 2P 6p. 3 из них лежат в области 529 - 542 нм, которая является свободной как от излучения водорода, так и примесных линий. Интенсивность этих линий, измеренные экспериментально в L-2M на Xe соответствует натеканию ~ 2×10^{-5} Па м^3/с, оказывается достаточным для использования для детектирования спектральных инструмента с использованием ПЗС-матрицы., Если использовать этот ПЗС детектор с усилителем света, то возможно дальнейшее улучшение отношения сигнал / шум.

Наиболее перспективно использование самой яркой линии Xe II 541,9 нм, так как она лежит в спектральной области, свободной от примесных линий, а также далеко от диапазона длин волн около 530 нм, которая используется другими диагностиками.

Чувствительность спектроскопических обнаружения гидроксилов OH был испытана в установке «Течь» в в ФИАН в условиях тлеющего разряда с полым катодом. В разряде при плотности плазмы $n_e = 10^{15\text{-}17}$м$^{-3}$ концентрация H_2O вблизи места натекания воды составила утечка 10^{19} мол/м^3.. Это соответствует скорости 10^{-5} Па•м^3/с натекания воды. Чувствительность детектирования Xe составила 10^{15} Xe/м^3. Такой уровень чувствительности соответствует 0,01%-ной концентрации Xe в воде.

Плазменно-пучковая установка ПР-2 НИЯУ МИФИ был испытан в различных режимах разряда, в том числе в геликонном режиме, что позволяет проводить испытания и калибровку спектроскопического метода обнаружения течей воды в широком диапазоне параметров. При плазмы с электронной плотностью 10^{14}-10^{19} м$^{-3}$ градиенты плотности могут достигать 10^{21}м-^{4}. Показано, что предварительные испытания экспериментальной утечки воды устройства может осуществляться на ПР-2 спектроскопических измерений воды фрагментов и добавить газов может быть сделано в высокой плотности плазмы, имеющих отношение к ИТЭР SOL.

Грубые оценки растворимость Xe в воде при соответствующих ИТЭР условиях показали, что предел 10^{-3} может быть достигнут, что почти на два порядка выше концентрация, необходимой для спектроскопического метода обнаружения утечек. Но эти оценки носят предварительный характер и основаны на скудной и совершенно недостаточно данных. Растворимость ксенона в воде при высоких температурах и давлениях, соответствующих условиям ИТЭР требует отдельных исследований.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛАДА МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ В ПЛАЗМУ СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

О.А.БАШУТИН, Е.Д.ВОВЧЕНКО, Э.И.ДОДУЛАД, А.С.САВЁЛОВ, С.А.САРАНЦЕВ

Так называемые «горячие точки» вакуумного искрового разряда являются интенсивными источниками характеристического рентгеновского излучения. Большинство исследователей указывает на формирование наиболее интенсивно излучающих плазменных точек преимущественно в парах материала конического анода, который, как правило, является внутренним электродом. Вместе с тем имеются свидетельства о пинчевании вакуумного искрового разряда около внутреннего электрода и при его отрицательной полярности. Поэтому представляет интерес более подробное исследование вклада материалов обоих электродов в плазму разряда и их влияние на процесс пинчевания на одной и той же установке при различном материале, конфигурации и полярности электродов.

Исследования проводились на микропинчевой установке Зона-2. Внутренний электрод выполнялся в виде заостренного стержня диаметром 3 мм. Внешний электрод представлял собой плоский цилиндр диаметром 20 мм с 3 мм отверстием в центре. Для выделения вклада материала электродов в плазму разряда один из электродов выполнялся из меди, а другой из железа. В ходе исследований помимо изменения полярности электродов, производилась также перекрестная замена материала электродов.

Вклад продуктов эрозии электродов оценивался по Kα излучению материала электродов. Для регистрации линий Kα были использованы два фокусирующих спектрографа с пространственным разрешением ФСПР-1Д/2Д, собранные по схеме Иоганна. Для обеспечения уверенной регистрации спектров на пленке измерения производились в сериях по 50 разрядов. В каждой из серий одновременно регистрировались спектры Kα эмиссии меди и железа.

При использовании острийного катода и плоского анода наблюдается эмиссия Kα линий материалов обоих электродов. Линии Kα материала анода излучаются из области протяженностью ~ 3 мм вдоль оси разряда (при разрядном промежутке ~5.5 мм), с максимумом излучения вблизи поверхности анода. При этом наиболее интенсивное Kα излучение материала острийного катода идет из области размером 2,6 - 3 мм вдоль оси разряда, расположенной в середине разрядного промежутка и непосредственно не примыкающей к поверхности обоих электродов.

В случае использования центрального острийного анода и плоского катода Kα излучение материала катода практически отсутствует и наблюдается лишь Kα излучение материала анода. Область излучения линий Kα материала острийного анода начинается у торца анода, где интенсивность эмиссии максимальна и простирается на 2/3 разрядного промежутка. Локализация источников эмиссии К-спектра совпадает с областями формирования «горячих» точек на обскурограммах разряда.

Проведенные исследования показывают, что состав плазмы сильноточного вакуумного искрового разряда формируется из продуктов эрозии обоих электродов.

Микропинчевание с образованием «горячих точек» преимущественно происходит в продуктах эрозии острийного электрода, обеспечивающего более высокую начальную концентрацию плазмы. При этом наибольшая эффективность образования ионов высших кратностей ионизации достигается при положительной полярности острийного электрода. При использовании острийного электрода в качестве катода эффективность пинчевания разряда и образования ионов высших кратностей ионизации, при прочих равных условиях, снижается.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЯДА МАЛОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ НА УСТАНОВКЕ ЗОНА-2

О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, Э.И. ДОДУЛАД, А.С. САВЕЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ

В данной работе исследованы особенности применения триггера для инициирования вакуумного искрового разряда. Рассматривается влияние места расположения триггера и его энергетики на интенсивность, энергетический диапазон, пространственную и временную стабильность источников рентгеновского излучения, формирующихся при пинчевании плазмы в малоиндуктивной вакуумной искре.

Исследования проводились на микропинчевой установке Зона–2. Катод представлял собой плоский стальной цилиндр (Ø20 мм) со сквозным отверстием (Ø3 мм) вдоль его оси. Анод выполнен в виде заостренного стального стержня (Ø3 мм). Расстояние между электродами ~ 5 мм. При ёмкости накопительного конденсатора равной 20 мкФ и рабочем напряжении ~10 кВ ток разряда достигал максимальной величины ~100 кА. Период разрядного тока ~ 8,5 мкс.

Триггер располагался перпендикулярно оси разряда либо у поверхности катода, либо в середине межэлектродного промежутка (между катодом и анодом). Для питания триггера применялся генератор импульсных токов (ГИТ) с высоковольтным коммутатором на тиратроне ТГИ-16/400. Отличительной чертой проводимых экспериментов явилось изменение в широком диапазоне параметров возбуждения триггера. Амплитуда импульса тока изменялась от 20 А до 1,8 кА; его длительность – от 0,5 мкс до 1,6 мкс; время нарастания фронта − от 0,1 мкс до 0,6 мкс. Измерения проводились при положительной и отрицательной полярностях возбуждающего импульса ГИТ. Контроль электрических параметров в разрядной цепи триггера осуществлялся поясом Роговского, работающего в режиме трансформатора тока.

Результаты исследования показали существенную зависимость временных, энергетических и пространственных характеристик рентгеновского излучения (РИ) от режимов возбуждения триггерного разряда. Наилучшие результаты по интенсивности рентгеновского излучения и стабильности образования горячих точек (с временным разбросом 300 нс и пространственным разбросом 500 мкм) были получены, когда триггер касался поверхности катода, обращенной в сторону разрядного промежутка, а на его центральный электрод подавался положительный импульс ГИТ. Оптимальный режим достигался при следующих характеристиках импульса триггерного тока: амплитуда тока составила величину около 30 А; длительность – 0,9 мкс; время нарастания – 0,1 мкс.

Изменение полярности импульса при тех же параметрах уменьшает вероятность возникновения плазменных точек, при этом наиболее интенсивное РИ наблюдается в виде диффузного свечения из прианодной области. Двукратное уменьшение длительности триггерного импульса приводит преимущественно к диффузному свечению областей в разрядном промежутке и вблизи анода. Двукратное увеличение длительности триггерного импульса вызывает возрастание интенсивности свечения анода при снижении интенсивности свечения плазменных точек. Повышение амплитуды триггерного импульса до 1 кА увеличивает количество импульсов РИ, а также размеры области свечения в разрядном промежутке при снижении интенсивности отдельных точек.

При перемещении триггера от катода в центр разрядного промежутка устойчивая генерация РИ наблюдалась лишь для токов триггера свыше 1 кА, причем с существенным увеличением пространственного и временного разброса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО И КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ ПИНЧЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Е.О.БАРОНОВА[1], О.А.БАШУТИН, Е.А. ВОВЧЕНКО, Э.И.ДОДУЛАД, И.Ф.РАЕВСКИЙ, А.С.САВЁЛОВ, С.А.САРАНЦЕВ, А.М.СТЕПАНЕНКО[1]

[1] *НИЦ «Курчатовский институт»*

Компонентный состав плазмы пинчевого разряда подразумевает очевидное наличие ионов рабочего газа, ионов материала электродов или материалов, из которых выполнена специальная нагрузка. Кроме того, в плазме всех видов пинчевых разрядов могут присутствовать ионы материала стенок камеры, так как на стадии максимального сжатия плазма является источником импульсного рентгеновского излучения, взаимодействие которого со стенками камеры приводит к их распылению. Динамика развития плазмы разряда зависит от того, какие примеси, в каком количестве и в какой момент попадают в периферийную, а затем и в горячую область плазмы. Следовательно, анализ зарядового и компонентного состава периферийной плазмы позволяет сделать заключение об особенностях развития разряда и получить информацию, определяющую его возможные практические применения.

Данные исследования посвящены определению зарядового и компонентного состава плазмы установки «Пион» (НИЯУ МИФИ). Электродная система установки состоит из заостренного стержня и плоского электрода цилиндрической формы. Материалом электродов служит сталь Ст3. В качестве накопителя используется конденсатор ИК-25-12 емкостью 12 мкФ, заряжаемый до напряжения 10÷20 кВ. Период разряда составляет 5,8 мкс.

Для регистрации спектра в диапазоне 2000÷11000 Å использован фокусирующий спектрограф, изготовленный в РНЦ КИ, обладающий широким диапазоном энергий – от 1 эВ до 200 кэВ. Регистрация спектра проводилась с помощью сферических дифракционных решеток (600 и 1200 штр./мм). Спектрометр пристыковывался к одному из диагностических окон камеры. На входе спектрометра устанавливалась щель размером 0.2x5 мм, которая дополнительно выполняла функцию защиты решетки от распыляемого материала. Угол падения излучения на решетку составлял 33,5 градуса.

Эксперименты показали, что плазма исследуемых пинчевых установок имеет сложный многокомпонентный состав, включающий в себя несколько атомных элементов. Спектр такой плазмы содержит большое количество линий, лежащих близко друг от друга. Для расшифровки спектра в системе Delphi создано программное обеспечение, позволяющее накладывать друг на друга экспериментально полученный и табличный спектры.

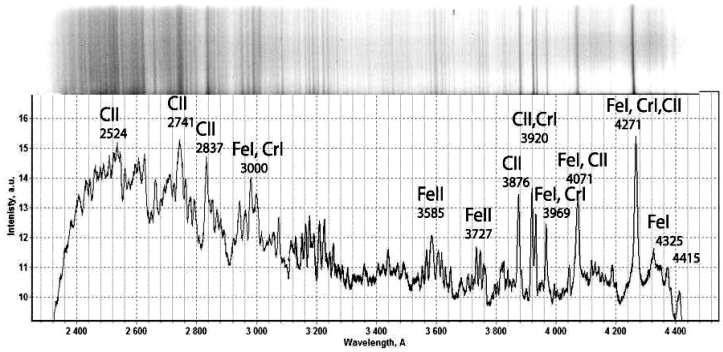


Рис.1

Анализ экспериментально полученного спектра позволил определить реперные линии для каждого из найденных элементов. Наличие таких реперных линий свидетельствует о присутствии в плазме указанного элемента. Спектр, полученный за 5 выстрелов на установке «Пион», изображен на рис.1. Рабочий диапазон 2000÷5000 Å ограничен чувствительностью фотослоя. В спектре присутствуют линии нейтрального и однократно-ионизованного железа и хрома, а также однократно и двукратно ионизованного углерода.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ

ЗАХВАТ И УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В СМЕШАННЫХ C-W-D ПЛЁНКАХ, СООСАЖДЁННЫХ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ В ДЕЙТЕРИИ

С.А. КРАТ, М.С. ЗИБРОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ

Соосаждение в углеводородные плёнки является одним из основных механизмов накопления изотопов водорода в термоядерных установках при использовании углеродных материалов. В рамках проекта ИТЭР в зоне дивертора планируется использовать и вольфрам, и углерод, что будет приводить к образованию смешанных углерод-вольфрамовых плёнок. Образование пленок с большим содержанием углерода наблюдалось даже в «полностью вольфрамовой» установке «ASDEX-Upgrade» [1]. В связи с этим актуальным является вопрос о накоплении и удалении изотопов водорода из смешанных C-W-D плёнок.

В данной работе проводилось осаждение смешанных C-W-D плёнок в магнетронном разряде в дейтерии путём распыления материала катода. Использовалось три типа катодов: вольфрамовый (чистоты не менее 99.9%), углеродный (из графитной бумаги *Papyex*) и смешанный (половина вольфрамового катода была закрыта графитной бумагой). Осаждение плёнок происходило на подложки (молибден и графит МПГ-8), находившиеся в различных положениях относительно плазмы и бывших под разными потенциалами (заземлённые и под потенциалом -62В). Температура образцов не превышала 100 °С. Количество дейтерия в плёнках определялось по методу ядерных реакций и термодесорбционной спектроскопии. Количество углерода в плёнках, осаждённых на молибденовые подложки, также определялось по методу ядерных реакций. Методом обратного резерфордовского рассеяния определялось количество вольфрама в плёнках и, для графитных подложек, количество кислорода (не превышавшее нескольких процентов).

В экспериментах с вольфрамовым катодом и полностью металлической установкой, в осаждённых плёнках было обнаружено большое количество углерода (наименьшее соотношение C:W было 4:5). Источником углерода, по всей видимости, являлось разложение остаточных газов в плазме магнетронного разряда, хотя улучшение давления остаточного газа в ходе разряда с 10^{-4} – 10^{-5} мбар не привело к уменьшению содержания углерода в пленках. Давление дейтерия в ходе разряда было $5\cdot10^{-2}$ мбар.

Несмотря на различные условия осаждения (разные потенциалы, интенсивности и дозы облучения) доля дейтерия в смешанных C-W-D плёнках остаётся практически постоянной и равной D/(C+W+D) = 0.15-0.30 в широком диапазоне отношений C:W (рис. 1). D/(C+W+D) сравнимо с долей дейтерия в углеводородных плёнках, полученных в схожих условиях [2].

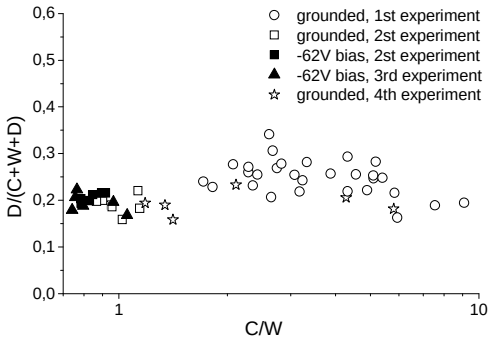


Рис.1. Доля дейтерия D/(C+W+D) в плёнках в зависимости от C:W отношения в них.

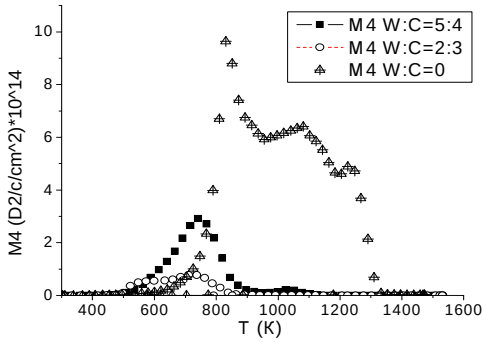


Рис.2. ТДС дейтерия из C-W-D плёнок, осаждённых на холодные молибденовые подложки под потенциалом -62В.

ТДС спектры C-D плёнок полученных с использованием углеродного катода обнаруживают пики 900 К, 1100 К и 1300 К, характерные для «твёрдых» плёнок, осаждённых под большим потенциалом.

ТДС спектры дейтерия C-W-D плёнок отличны от спектров чистых C-D плёнок. Они смещены в область низких температур и не имеют высокотемпературных пиков. Эти спектры также отличны от спектров получаемых при облучении вольфрама D+ ионами, которые содержат пики в области 300-600 К.

ЯР показывает большее количество дейтерия в плёнках, чем ТДС D2 и HD. Это может быть связано с большим количеством углеводородов, выходящих при ТДС и из C-D и из C-W-D плёнок.

Литература

1. M. Mayer, V. Rohde, K. Sugiyama, et al., J. Nucl. Mater. 390-391 (2009) 538.
2. В.И. Бурлака, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев и др. Вопросы атомной науки и техники, Серия «Термоядерный синтез», 2010, вып.2, с.33-38.

СТРУКТУРА И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ И МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНЫХ СЛОЁВ, НАПЫЛЁННЫХ В ПЛАЗМЕ.

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.А. КУЗЬМИН, А. МАКАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН

Доклад представляет результаты исследования формирования углеродных (C) и углеродно-вольфрамовых (C-W) слоёв, напылённых в плазме, и захвата газа в них. Эксперименты проводились в газовом разряде, описанном в работе [1]. Давление остаточного газа в установке не превышало P = $4\cdot10^{-4}$ Па. Аргон (P_{Ar} = 0,1 Па) и дейтерий (P_D изменялось от $2{,}7\cdot10^{-4}$ до $1{,}3\cdot10^{-2}$ Па) использовались в качестве рабочих газов. Атомы, распылённые с W- и C мишеней, напылялись на подложки из нержавеющей стали (SS), графита и вольфрама. Подложки держались под плавающим потенциалом при температуре 350 □C. Скорость напыления атомов C and W составляла $1{,}1\cdot10^{19}$ and $2{,}8\cdot10^{19}$ at/m^{2}s, соответственно. Отношение концентраций C/W в C-W слоях равнялось ≈ 2,5. Напылённые плёнки анализировались в растровом электронном микроскопе. Удержание газа в слоях измерялось в термодесорбционной установке описанной в работе [2].

C плёнки оставались однородными и гладкими независимо от материала подложки. C-W плёнки были такими же, пока их толщина не достигала 0,4 мкм. Затем плёнка начинала растрескиваться и отшелушивание начиналось, когда её толщина достигала 0,75 мкм. C-W плёнки толщиной 0,5-0,7 мкм на C и W подложках имели столбчатую структуру. Столбики, толщиной ≈3 мкм («большие» столбики) имели слоистую структуру. Совокупность верхних изогнутых слоёв формировала холмистую структуру поверхности. Позже появлялись столбики нового типа («малые» столбики) В основном, они росли вокруг больших, образуя своеобразные стенки между ними. Отношение C/W в больших конусах было большим, чем в малых.

Фрагменты покрытий теряли контакт с C подложкой, когда их толщина достигала 1 мкм. Вместе с тем, отшелушивания не отмечалось, даже когда толщина плёнок достигала ≈ 2,5 мкм. В то же время, 2 мкм плёнки на W подложке уже оказывались сильно разрушенными.

Концентрации дейтерия и водорода (D/C и H/C) в C плёнках практически не зависели от типа подложек. Отношение D/C возрастало от (0,001 до 0,01) и H/C уменьшалось (от 0,04 до 0,02), когда P_D увеличивалось.

Отношение H/C в C-W слоях также было большим, чем отношение D/C, но в этом случае оба отношения увеличивались с ростом P_D. Интересно отметить, что отношение D/C ratio в C-W слоях было в несколько раз меньшим, чем в C слоях, причём разница между ними увеличивалась при переходе от C- к W подложке.

Экспериментальные результаты анализируются. Обсуждаются особенности роста напылённых слоёв и влияние подложек на их формирование и характер разрушения. Рассматривается механизм захвата водорода в напыляемые в плазме слои. В частности, показано, что сорбированные на поверхности молекулы воды остаточного газа являются основным источником изотопов водорода для сорбции в осаждаемые в плазме слои.

Литература

1. L. Begrambekov, O. Buzhinsky, A. Gordeev et al. Physica Scripta 108 (2004) 72.
2. A. Airapetov, L. Begrambekov, S. Brémond et al. J. Nucl. Mater. (2011) doi:10.1016/j.jnucmat.2010.10.054.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО И АТОМАРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ДЕГИДРОГЕНИЗАЦИЮ C:H ПЛЕНОК

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, Я.А. САДОВСКИЙ, П.А. ШИГИН, А.М.ЗАХАРОВ

Были исследованы процессы в углеводородных пленках (H:C ≈ 0,2, толщина 2,5 мкм), инициированные бомбардировкой ионами и атомами дейтерия.

Облучение пленок проводилось ионами дейтерия с энергиями 50 эВ/D and 400 эВ/D, вытягиваемыми из дейтериевой плазмы. Плотность потока ионов дейтерия и флюенс равнялись 10^{16} $D \cdot см^{-2} \cdot с^{-1}$ и $5 \cdot 10^{19}$ $D \cdot см^{-2}$ соответственно. Средняя энергия атомарного дейтерия (D^0) была около 0,2 эВ. Плотность потока атомов D^0 и флюенс сохранялись теми же, что и при ионном облучении. Температура подложек во всех экспериментах поддерживалась равной 550 K. Облученные таким образом образцы распылялись в аргоновой плазме на глубину от 20 до 900 нм. Энергия ионов аргона была выбрана 300 эВ. Затем количества водорода и дейтерия в оставшейся части пленки измерялось с помощью термодесорбционной спектроскопии, и по измеренным данным рассчитывалось распределение изотопов водорода по глубине пленки.

Эксперименты показали, что бомбардировка ионами дейтерия приводила к проникновению и захвату дейтерия в глубоких слоях пленки, расположенных существенно глубже зоны торможения энергетичных ионов. В тоже время, облучение ионами дейтерия инициировало выход атомов водорода из слоев пленки за зоной торможения ионов, при этом, захватывающийся дейтерий не компенсировал уменьшение количество водорода. $9.1 \cdot 10^{16}$ и $1.3 \cdot 10^{17}$ $D \cdot см^{-2}$ атомов дейтерия было захвачено и $1.6 \cdot 10^{17}$ и $1.7 \cdot 10^{17}$ $см^{-2} \cdot H$ атомов водорода было удалено при облучении пленки ионами дейтерия с энергиями 50 эВ и 400 эВ. Концентрация водорода в слоях в зоне торможения при бомбардировке с энергией 50 эВ/D оказалась меньше, чем после облучения ионами 400 эВ/D.

Облучение атомарным дейтерием приводило к захвату дейтерия, главным образом, в приповерхностных слоях пленки и не вызывало сколько-нибудь заметной десорбции водорода из пленки.

Расчеты коэффициентов диффузии показали, что на глубине 0 – 200 нм его значение равно $3 \cdot 10^{-14}$ $см^2 \cdot с^{-1}$. В интервале 200 – 900 нм коэффициент диффузии оказался $2 \cdot 10^{-13}$ $см^2 \cdot с^{-1}$. Эти значения намного выше максимальных известных коэффициентов диффузии водорода в плотных графитах, которые лежат в интервале 10^{-15} – 10^{-17} $см^2 \cdot с^{-1}$ [1]. Меньший коэффициент диффузии в интервале 0 – 200 нм может объясняться влиянием дефектов, проникающих из зоны торможения в глубокие слои пленки.

Облучение атомарным дейтерием не приводило к созданию дефектов, и коэффициент диффузии дейтерия в соответствии со сделанным выше выводом оказался равным коэффициенту диффузии для интервала 200 – 900 нм, полученным при ионной бомбардировке пленки.

Сделан вывод, что дефекты и вызываемые ими напряжения в большей степени вызывали десорбцию водорода из углеродных ловушек, чем изотопный обмен дейтерия и водорода.

Литература

1. H. Atsumi. Hydrogen bulk retention in graphite and kinetics of diffusion. J. of Nucl. Mater. 307–311, 1466 (2002).

ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МАЛЫМИ ДОЗАМИ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ КЭВНЫХ ЭНЕРГИЙ

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

В работе проводилось исследование образования радиационных дефектов ионами дейтерия кэвных энергий и взаимодействия атомов дейтерия с этими дефектами при относительно малых дозах облучения (~10^{20} D/м^2).

Вольфрамовая мишень представляла собой полоску 5×1.5 см^2 толщиной 50 мкм, отрезанную от листа фольги чистотой 99.95 ат.% (Plansee, Германия). Перед началом экспериментов мишень отжигалась в течение 90 минут при температуре 1750 K для удаления производственных дефектов. При многократном использовании мишени перед каждым облучением образец снова отжигался при температуре 1750 K в течение 60 минут.

Облучение проводилось в сверхвысоковакуумной (<5×10^{-9} мбар) установке «Медион» моноэнергетичным, сепарированным по массе пучком ионов D_3^+ с энергией 2 ÷ 10 кэВ. Плотность тока на мишень была 5×10^{17} – 3.5×10^{18} D/м^{2}с в зависимости от энергии падающих ионов. Все облучения выполнены при комнатной температуре. Наличие системы глубокой дифференциальной откачки позволяет проводить термодесорбционную спектроскопию (ТДС) непосредственно в камере взаимодействий через 10-15 минут после облучения, без переноса по атмосфере. При этом в ходе нагрева не наблюдается значительного фонового взаимодействия. Измерения потока десорбции из образца проводились с помощью квадрупольного масс-спектрометра. Скорость линейного нагрева в ходе ТДС составляла 2 K/c, а максимальная температура – 1750 K.

На рис.1 представлена зависимость спектров термодесорбции дейтерия от энергии при облучении одинаковой дозой (3×10^{20} D/м^2) ионами D_3^+ в диапазоне энергий 2 ÷ 10 кэВ. Этот диапазон покрывает область, как ниже, так и выше порога образования пары Френкеля (40 эВ [1], что составляет 2.8 кэВ для ионов D_3^+).

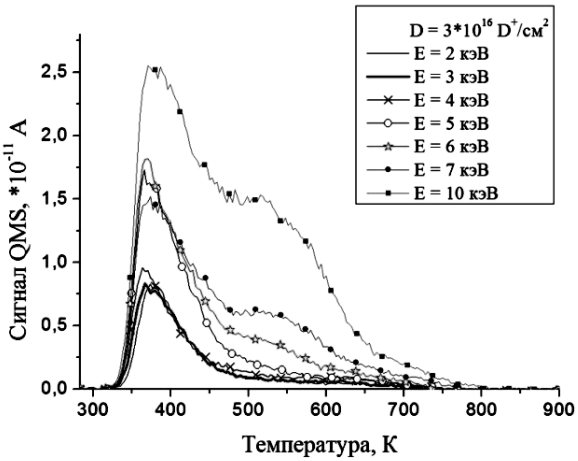


Рис.1. Спектры термодесорбции D_2 для различных энергий падающих ионов D_3^+ при дозе облучения 3×10^{20} D/м^2

С увеличением энергии, приходящейся на дейтрон, растёт общее количество захваченных атомов. При низких энергиях спектр состоит из одного пика с максимумом при температуре 370 K. Начиная с энергии 5 кэВ, отчетливо видны пики вблизи 550 K и 700 K. Низкотемпературный пик, по всей видимости, обусловлен выходом дейтерия из слабых ловушек, которые остаются после отжига. Пики 550 K и 700 K, скорее всего, связаны с захватом в вакансии и вакансионные кластеры [2]. Их появление обусловлено переходом через порог образования пары Френкеля. Несмотря на относительно малую дозу, пики на спектрах термодесорбции достаточно широкие, из чего можно предположить, что каждый пик соответствует выходу из групп ловушек с близкими энергиями связи.

Литература

1. H.H. Neely, D.W. Keefer, A. Sosin, Electron irradiation and recovery of tungsten // Physica Status Solidi, 1968, v. 28, p. 675.
2. A. Rusinov, Yu. Gasparyan, N. Trifonov, A. Pisarev, M. Mayer, M. Sakamoto, Investigation of defects in tungsten by probe fluence method // J. Nucl. Mater., doi:10.1016/j.jnucmat.2010.10.069, in press.

ЗАХВАТ ВОДОРОДА В УГЛЕГРАФИТОВЫЙ КОМПОЗИТ ПРИ АТОМАРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

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

Проблема захвата и удержания изотопов водорода в графитовых материалах является одной из важнейших для токамаков и других термоядерных установок с графитовыми элементами первой стенки и диверторов. Несмотря на большое количество работ, посвященных данному вопросу, до сих пор остаются недостаточно изученные аспекты этой проблемы. В частности, до настоящего времени не до конца разрешен вопрос о роли атомарной бомбардировки в захвате газа в графит. Поэтому было решено провести эксперименты по облучению углеграфитового композита атомарным потоком дейтерия.

Эксперименты проводились на модернизованной установке «МИКМА», описанной в работе [1].

При облучении атомарным потоком углеграфитового композита спектры термодесорбции дейтерия имели два основных пика – низкотемпературный (800-850 К) и высокотемпературный (1200-1250 К). Основываясь на выводах, сделанных в ходе предыдущих работ, в которых ставятся в соответствие положение пиков ТДС-спектров водорода из графитов, механизмы захвата и типы водородных ловушек, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Высокотемпературный пик свидетельствует о захвате дейтерия в ловушки, существование которых не связано с облучением графита ионами, атомами или электронами (к примеру, краевые дислокации). Появление низкотемпературного пика связано с десорбцией частиц, захваченных по потенциальному механизму, при котором за счет энергии неупругого взаимодействия атомов водорода с поверхностью создаются активные центры. Благодаря им происходит как захват самих облучающих атомов, так и диссоциация сорбированных на поверхности молекул с последующим захватом их компонент. Эксперименты показали, что при облучении атомарным потоком происходил захват дейтерия как на поверхности, непосредственно обращенной к атомизатору, так и на других поверхностях образца (благодаря рассеянию атомов на газе и конструкционных элементах установки). Для измерения захвата водорода на боковых и тыльной стороне образца проводился эксперимент, в котором во время облучения на фронтальную поверхности образца помещалась металлическая пластина, перекрывающая прямой поток атомов. Количество захваченного дейтерия в таком эксперименте составляло около 60 % от захваченного в образце, облучаемого со всех сторон. Коэффициент захвата дейтерия за счет облучения атомами, летящими напрямую с атомизатора на образец, составлял величину порядка $1x10^{-3}$. Захват дейтерия происходил в оба типа ловушек, как при облучении образца, закрытого от прямого потока атомов, так и не закрытого от него. Помимо дейтерия происходил захват водорода из паров воды. Захват водорода в значительно большей степени (приблизительно в 5 раз больше) происходил при облучении прямым потоком атомов, чем без него; он осуществлялся в основном в ловушки, соответствующие пику в районе 1300 К. Общее количество захваченного водорода при облучении прямым потоком атомов превышало захват дейтерия в 10 раз и составляло 1×10^{17} ат/см^2 (при дозе прямого потока $1,6\times10^{18}$ ат/см^2).

При больших временах облучения помимо вышеуказанных пиков появлялся пик при температуре около 950 К, который наблюдался при облучении ионами и связан с захватом дейтерия в ловушки в зоне торможения ионов. Такие ловушки создаются за счет кинетической энергии быстрых частиц при торможении. Таким образом, можно предположить, что при атомарном облучении при увеличении количества захваченного дейтерия возрастает дефектность структуры и появляются ловушки, сходные с созданными быстрыми ионами в зоне торможения.

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

Использование в качестве облучающих частиц атомов дейтерия позволило обнаружить инициацию атомарным облучением захвата водорода из сорбированной на поверхности воды. Захват дейтерия и водорода происходит как на поверхности, облучаемой прямым потоком атомов, так и на остальных поверхностях. Захват происходит в три типа ловушек (соответствующих пикам при 800-850 К, 950 К и 1200-1300 К). Есть основания полагать, что первые соответствуют захвату в приповерхностной области, а вторые – за счет увеличения дефектности структуры при накоплении дейтерия, а третьи – в более глубоких слоях. В целом количество захваченного водорода значительно больше (в 10 раз), чем количество захваченного дейтерия. Дейтерий захватывается больше в низкотемпературных ловушках. Захват происходит, как при облучении образца, закрытого от прямого потока атомов, так и не закрытого от него. Захват дейтерия на поверхности, облучаемой прямым потоком атомов, составляет менее 30-40% от общего количества захваченного дейтерия. Водород, в отличие от дейтерия, захватывается в основном в высокотемпературных ловушках при прямом облучении атомами.

Литература

1. Л.Б. Беграмбеков, А.А. Айрапетов, С.В. Вергазов, А.А.Кузьмин, П.А. Шигин, Я.А. Садовский, ВАНТ серия Термоядерный синтез, выпуск №3 2010г, с. 52.

МОДЕЛЬ ПРОНИКНОВЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛ, ПОКРЫТЫЙ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКОЙ

Ю.М. ГАСПАРЯН, С.С. ЯРКО, А.А. РУСИНОВ, А.А. ПИСАРЕВ

В экспериментах [1] было показано, что наличие углеродной пленки на поверхности вольфрама значительно изменяет поведение проникающего потока дейтерия при ионном внедрении. Наблюдались также существенная разница между облучением ионами с энергией 200 эВ/D и 1200 эВ/D (температура мебраны ~ 600 °C). В первом случае, пленка толщиной 120 нм была полностью распылена в ходе эксперимента, благодаря химическому распылению; время задержки для проникающего потока было много больше, чем для чистой мембраны; после появления проникающий поток рос до максимального значения, сопоставимого с потоком для чистого вольфрама, и затем спадал до более низких значений. В случае ионов 1200 эВ/D, пленка распылялась очень медленно; время задержки было больше, чем для чистого вольфрама, но меньше, чем в случае ионов 200 эВ/D; проникающий поток после появления рос медленно, достигая очень больших значений (несколько процентов от падающего потока).

Для описания полученных данных была предложена модель проникновения через углеродные материалы, которая предполагает наличие микроскопических дефектов (пор, трещин) в углеродной пленке. Такие дефекты могут быть разделены на четыре основных типа (рис.): I – через всю пленку, II – закрытые, III – открытые в сторону вакуума, IV – открытые в сторону границы между углеродной пленкой и мембраной (рис.1).

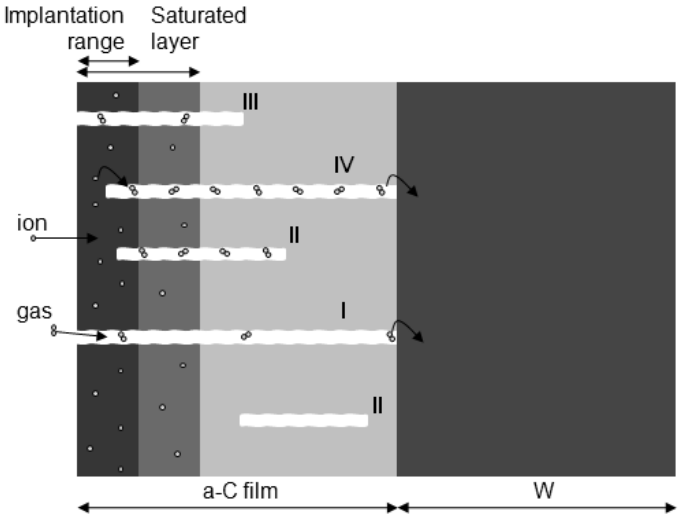


Рис.1. Иллюстрация модели транспорта дейтерия через углеродную пленку на металле, предполагающей четыре типа дефектов в пленке (детали в тексте)

Через дефекты первого типа возможно прямое проникновение газа к границе углерод-металл. Наличие даже небольшого количества таких пор приводит к проникающему потоку из газа равному значению для мембраны без покрытия [2]. При облучении ионами водорода проникающий поток через эти каналы может быть еще больше, за счет десорбции внутрь пор внедренного водорода, что приводит к локальному повышению давления в каналах и, соответственно, большему проникающему потоку. Поры второго и третьего типа приводят к уменьшению проникающего потока. Поры четвертого типа также приводят к появлению проникающего потока из газовой фазы. Разница между каналами I и IV в том, что давление в закрытых со стороны вакуума порах может достигать больших давлений. Поэтому проникновение через такие поры может быть основным механизмом в некоторых случаях. Насыщенный водородом слой медленно расширяется в ходе облучения, поэтому время задержки для появления потока через каналы четвертого типа определяется расстоянием от входной поверхности до таких пор.

Литература

1. Yu. Gasparyan, M. Mayer, A. Pisarev, et al., “Deuterium ion-driven permeation through carbon coated tungsten”, 12th PFMC workshop. The paper is submitted to Journal of Applied Physics.
2. A. Pisarev, I. Tsvetkov, S. Yarko, Fusion Engineering and Design, 2007, V.82, Iss.15-24. P.2120-2125.

ХОЛОДНАЯ ЭМИССИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ С ПОРИСТОГО ГРАФИТА

Д.В. ИВАНОВ, В.А. КУРНАЕВ, И.С. ЛЕВИЦКАЯ[1], Н.В. МАМЕДОВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ

[1]*Школа № 978*

Ранее было установлено, что в состав токов низкополевой эмиссии входят как электроны, так и отрицательные ионы, однако наличие в эмиссионном токе ионной составляющей было определено лишь качественно. В настоящей работе проведено масс-спектрометрическое исследование состава эмиссионных токов из широко используемого в термоядерных установках графита. Был использован графит МПГ-8 с поверхностью, полученной в результате разлома (рис.1). Эксперименты проводились на установке Большой масс-монохроматор МИФИ (БММ), использованной для анализа массового состава тока отрицательной эмиссии в инверсном режиме, а именно эмиссионный электрод помещался в точке фокуса установки, а детектор находился в районе ионного источника. Большой радиус центральной траектории ионов в установке БММ позволяет при приемлемой разрешающей способности обеспечить максимальную чувствительность за счет большой площади образца (~ 1см^2). Установка откачивалась с помощью турбомолекулярных насосов до давления 10^{-7} Торр. На расстоянии 2 мм от поверхности располагался плоский анод из сетки с прозрачностью 80%. Ток отрицательной эмиссии измерялся в цепи между образцом, на который подавался отрицательный потенциал 8 кВ и анодом. Таким образом в вакуумном промежутке создавались поля до $4\cdot10^4$ В/см. Для юстировки пучка отрицательных ионов, прошедших через сетчатый анод, использовалась измерительная пластинка, (предварительные эксперименты показали, что на один эмитированный ион приходится ~1000 электронов). Далее ионный пучок проходил через магнит, на который подавалась развертка по массам и, усиливаясь во вторичном электронном умножителе ВЭУ-6, регистрировался с помощью наноамперметра ЭК-1601. Управление электромагнитом и регистрация ионов осуществлялась с помощью разработанной для данной установки системы управления, позволяющей производить за минуту снятие спектра из 1000 точек.

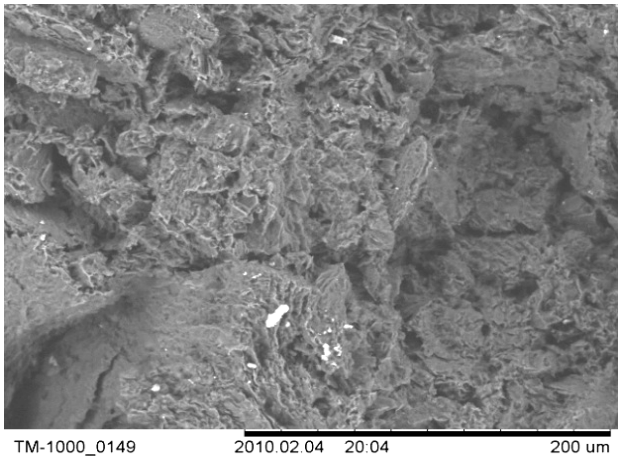


Рис. 1 Фотография поверхности графита МПГ-8

На рис. 2 приведен зарегистрированный при отрицательном потенциале 6 кВ на образце масс-спектр отрицательных ионов, основными элементами в котором является водород, углерод, его соединения с водородом, O^- и OH^-. Согласно справочным данным эти молекулы обладают наибольшей энергией сродства к электрону. Спектр отражает сложную физико-химию процессов на поверхности, которые могут происходить при адсорбции молекул остаточного газа, а также при диссоциативной ионизации на поверхности образующихся соединений. Об этом свидетельствует наличие в спектре ионов C^- и кластеров C_2^-, которые, очевидно, могут десорбироваться с поверхности только в результате диссоциации молекулярных ионов.

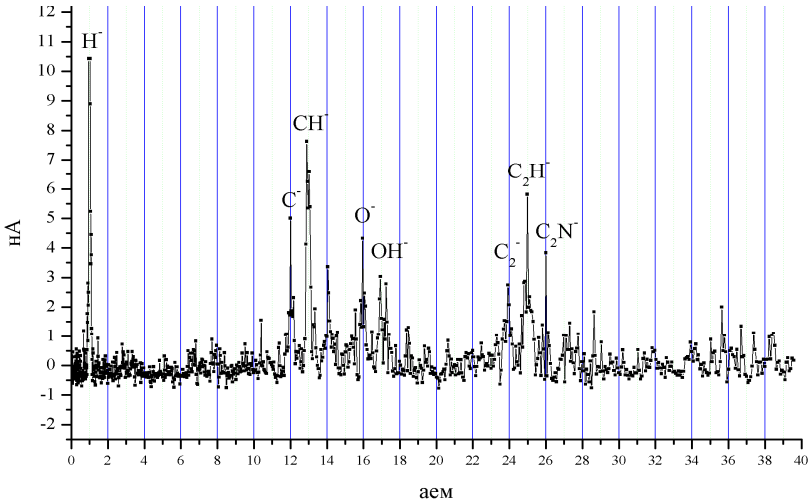


Рис. 2. Масс-спектр отрицательных ионов

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЦЕНТРОВ ЭМИССИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ХОЛОДНОЙ НИЗКОПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ

В.А. КУРНАЕВ, А.И. МАРКИН[1], Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н. СЫРОМЯТНИКОВ[1]

[1] *ФГПУП РФ «ГНЦ ТРИНИТИ»*

Для проверки предположения о том, что одними из источников низкополевой эмиссии на поверхности являются поры, был предложен эксперимент, в котором на тщательно отполированной поверхности объёмно пористого углеситаллового композита в определенных местах были насверлены с

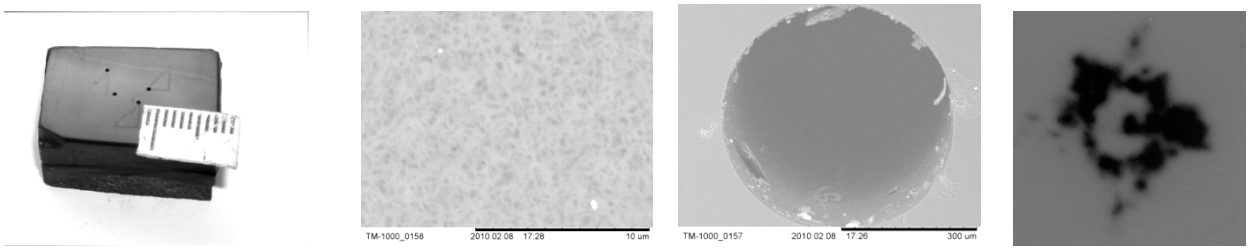


Рис. 1 Фотографии образца (а), его поверхности без пор с увеличением 2500 (б), поры диаметром 500мкм (в) и изображения центров эмиссии (г), полученное с помощью магнитного микроскопа (увеличение 2)

внутренним диаметром 10 мкм и глубиной 100 мкм (по сторонам изображенных на образце треугольников) и четыре большие поры диаметром 500мкм и глубиной 1мм (рис. 1а). В качестве материала для исследования был выбран углеситалл из-за наличия некоторой объёмной пористости, что позволило бы подпитывать поры газом изнутри, а также из-за возможности максимально гладко отполировать поверхность (на рис.1б приведена фотография отполированной части поверхности) и отсутствия оксидной пленки на поверхности.

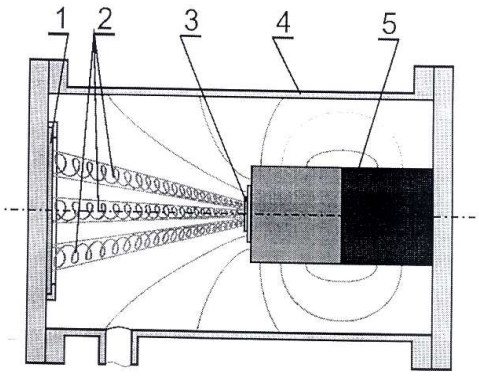


Рис.2 Принципиальная схема магнитного микроскопа: 1 – система регистрация состоящая из ЭОПа и светочувствительной фотопленки, 2 – траектории движения заряженных частиц между источником и экраном, 3 – источник эмиссии заряженных частиц, область магнитного поля B_0, 4 – вакуумная камера, 5 – магнитная система.

С помощью разработанного в ТРИНИТИ магнитного микроскопа предполагалось определить положение возможных эмиссионных центров на поверхности. Впервые предлагаемый метод реализован при получении изображения тритиевого β-источника при исследовании распределения трития, адсорбированного и внедрённого в поверхностный слой конструкционных материалов, в том числе в первую стенку термоядерного реактора. Магнитный микроскоп состоит из вакуумной камеры, магнитной системы, источника эмиссии и системы регистрации (рис. 2).

Для регистрации электронов использовался электронно-оптический преобразователь (ЭОП), состоящий из МКП и покрытого люминофором экрана. Напряжение питания МКП 1,2 кВ, а на экран подавалось напряжение +5,8 кВ относительно земли с целью ускорения выходящих из МКП электронов. Регистрация осуществлялась на расположенную за экраном фотопленку. В эксперименте по исследованию положений эмиссионных центров поверхность описанного выше углеситаллового образца располагалась перпендикулярно оси микроскопа и максимально близко к магниту для обеспечения минимального расхождения силовых линий на уровне поверхности. На образец изолированный от магнита фторопластовым изолятором подавалось напряжение до 8 кВ отрицательной полярности. В качестве анода использовалась сетка с прозрачностью 90% отделенная от образца на расстояние 2мм.

Несмотря на предварительную подготовку поверхности, на ней присутствовали инородные микрочастицы, поэтому было принято решение закрыть часть поверхности диэлектрической пленкой, так чтобы свободным остался только прямоугольник, внутри которого содержится большая пора диаметром 500мкм. В результате для напряжения на катоде 8 кВ и времени экспозиции пленки 5 мин было получено изображение (рис.1г). Поскольку так называемая тройная точка металл-диэлектрик-вакуум также является источником эмиссии электронов, то на пленке появилось изображение прямоугольника, и единственным эмитирующим центром внутри него оказалась пора.

Таким образом, эксперимент с магнитным микроскопом показал, что поры на поверхности действительно могут быть источником эмиссии отрицательных частиц. Также источником эмиссии может служить диэлектрическая пыль и инородные диэлектрические включения.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ПАРОВ ВОДЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

ПОДОЛЯКО Ф.С., СОРОКИН И.А., ВИЗГАЛОВ И.В., ГУТОРОВ К.М.

Локализация и устранение течей рабочего вещества системы охлаждения плазменных установок для обеспечения безопасности их использования является острой проблемой. Существует множество возможных моделей, имитирующих течи. Наиболее простыми в плане реализации для установок с водяным охлаждением являются методы, в которых используются химические соединения, содержащие кристаллизационную воду, и термохимические методы введения паров воды. Наиболее подходящим веществом является гидроокись кальция $Ca(OH)_2$ – гашеная известь. Это вещество разлагается на окись кальция и воду при относительно высоких температурах, порядка 400°С, при комнатной температуре имеет сравнительно низкое давление насыщающих паров – на уровне 10^{-7} Торр.

$$Ca(OH)_2 + 0{,}7\ эВ \longrightarrow CaO + H_2O. \qquad (1)$$

Для данного эксперимента были изготовлены и испытаны несколько вариантов прогреваемых кварцевых капсул, заполняемых порошком $Ca(OH)_2$. Испытания данных капсул проведены на установке ПР-2 и сверхвысоковакуумном термодесорбционном стенде.

Скорость поступления паров определяется температурой и размером калиброванного отверстия в капсуле. Регулирующий параметр – температура, контролируемая хромель-алюмелевой термопарой.

Первые испытания термохимического источника водяных паров проводились в режиме фиксированного потока. Для стабилизации потока по мере уменьшения количества связанной воды в порошке было необходимо поднимать его температуру и, соответственно, мощность нагревателя. В режиме высокого стационарного потока молекул воды (порядка $3*10^{18}$ $с^{-1}$) капсула обеспечивала стационарное поступление паров более 1часа.

Установлено, что давление паров воды в капсуле при комнатной температуре оказывается ниже расчетных значений более чем на порядок (10^{-8} Торр). Поток частиц из капсулы при этом составляет около 10^{12} $с^{-1}$.

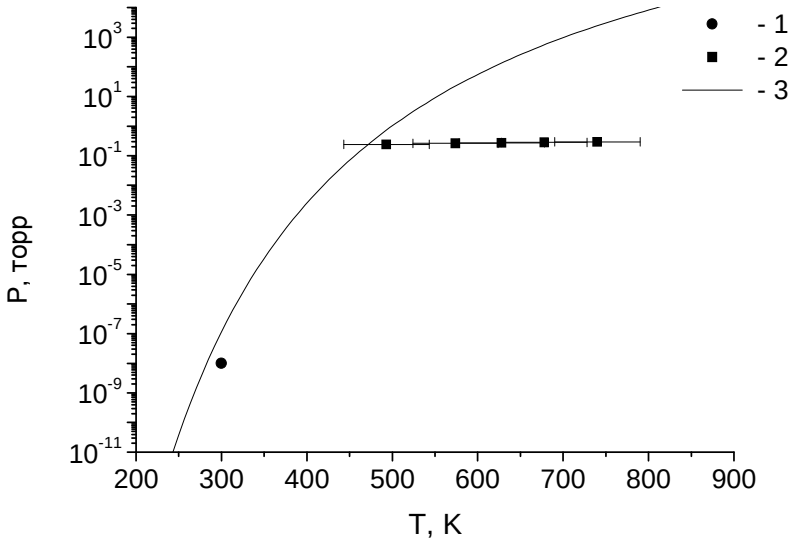


Рис.1. Экспериментальные значения давления водяных паров в капсуле в зависимости от температуры. Красная кривая – режим стационарного потока молекул воды. Зеленая точка – давление паров воды при комнатной температуре. Синяя кривая - расчетная зависимость давления насыщающих паров воды над поверхностью гидроокиси кальция $Ca(OH)_2$ от температуры.

Проведенные в работе исследования показали, что изготовленная модель течи может успешно применяться как источник паров воды для отработки методов диагностики течей в установках. Модель течи может использоваться в сверхвысоковакуумных установках и позволяет удобным образом контролировать поступление паров воды в диапазоне 10^{12}-10^{19} молекул/с.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ РАССЕЯННЫХ ИОНОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТАВА МИШЕНЕЙ И ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Д.В. ИВАНОВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.В. МАМЕДОВ, К.А. МИЛИКЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ

Для реализации возможности контроля состава и толщины пленок в процессе плазменного воздействия разработана схема модернизации установки «Большой масс монохроматор МИФИ», включающая в себя использование встраиваемого плазменного источника и основанная на спектроскопии ионного рассеяния и ионов отдачи.

Данная установка (рис.1), может работать с ионами при максимальном ускоряющем напряжении 40 кВ при отношении их массы к заряду вплоть до *M/Z* =100. После модернизации давление остаточного газа в ионном тракте составило 10^{-7}Па. Прогреваемый дуоплазматрон с автоматизированной системой газонапуска позволяет получать ионные пучки с очень низким уровнем примесей. Так, при работе на гелии, ток ионов He^+ на два порядка превышает суммарный ток остальных компонентов, основным из которых являются ионы водорода H_2^+

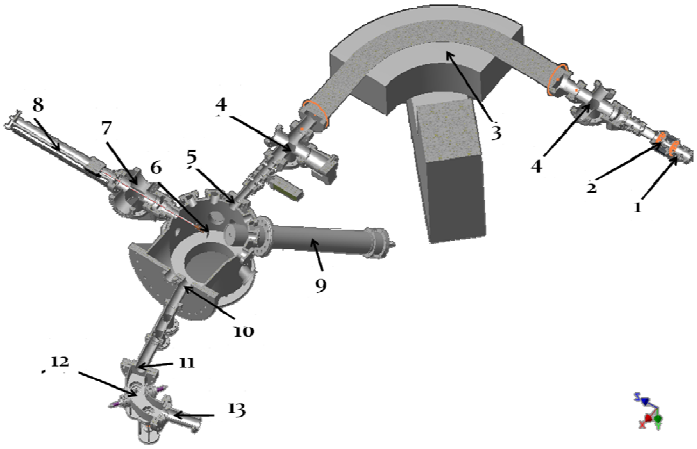


Рис.1 схема установки «Большой масс монохроматор»: 1 – дуоплазматрон, 2 – электростатическая линза, 3 – сепарирующий электромагнит ,4 – вакуумная камера дифференциальной откачки, 5 – входная диафрагма основного ионного пучка , 6 – мишень,7 – вакуумная камера для замены мишени,8 – манипулятор ввода-вывода мишени, 9 – плазменная пушка,10 – входная диафрагма энергоанализатора,11 – выходная диафрагма энергоанализатора, 12 – электростатический энергоанализатор ,13 – ВЭУ-1А .

В качестве анализатора энергетических спектров при реализации методики спектроскопии ионного рассеяния и ионов отдачи применен четвертьсферический дефлектор выносного типа с радиусом центральной траектории 25 см. При разрешении по энергии не более 0,8% он обеспечивает телесный угол регистрации рассеянных частиц $1{,}1\cdot10^{-3}$ стер с полушириной угла рассеяния $\Delta\vartheta = \pm 0{,}6^0$. Для усиления тока в нем используется прогреваемый вторично-эмиссионный умножитель ВЭУ-1А. При измерении больших входных токов на первый динод умножителя полный динамический диапазон регистрации ионных токов составил более 10^9. В частности, при работе источника на гелии по анализу энергетического спектра ионов, прошедших через тонкую мишень, удалось определить в пучке ионов с *M/Z* =5 относительное содержание ионов D_2H^+ и $^4HeH^+$ при общей интенсивности ионной линии менее 1% по отношению к интенсивности ионов $^4He^+$.

Камера взаимодействия откачивается турбомолекулярным насосом производительностью 1000л/с, что допускает использование в качестве плазменного источника ранее разработанного встраиваемого плазмогенератора с плазменно-пучковым разрядом, который может работать при сравнительно низких рабочих (~10^{-2} Па) давлениях и позволят при плотности тока 10 мА/см^2 и полном токе ~ 30 мА поддерживать в камере давление ~ 10^{-4}Па.

Для обеспечения работоспособности электростатического анализатора в процессе плазменного облучения при больших давлениях в камере взаимодействия он снабжен автономной системой откачки с турбомолекулярным насосом TMU 071 производительностью 70л/с. Для замены мишеней диаметром до 40мм без развакуумирования установки предусмотрена шлюзовая система с автономной вакуумной откачкой и стандартным вводом движения на постоянном магните.

Автоматизация управления ионным пучком дает возможность проводить ионно-пучковые эксперименты по заранее разработанным программам облучения. При работе, например, на смеси аргона и водорода масс-монохроматор можно настроить на соотношение $E_0\cdot M$ = 40кэВ·2 а.е.м. После чего на источник ускоряющего напряжения подается изменяющееся ускоряющее напряжение, обеспечивающее периодическое попадание на мишень ионов аргона с энергией 2 кэВ и ионов H_2^+ с энергией 40 кэВ. Меняя скважность и длительность импульсов можно изменять дозу облучения мишени соответственно ионами аргона и водорода. Соответственно, можно следить за образованием пленки и ее ростом, а также осуществлять ее распыление ионами аргона.

Таким образом, с помощью описанной установки можно по спектроскопии рассеяния легких и тяжелых ионов средней энергии непосредственно при осаждении слоев легких элементов на подложки из тяжелых элементов или наоборот, а также после или в процессе плазменного или другого воздействия контролировать состав и толщину пленок на поверхности.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПОНИЖАЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ

И.Д. ЕГОРОВ

Универсальные источники питания УИП-1, широко использовавшиеся в лабораторных и исследовательских работах, физически устарели, их надёжность снизилась ниже минимально приемлемого уровня. Кроме того, эти блоки устарели морально, т.к. используют регуляторы напряжения на электронных лампах. В связи с этим появилась необходимость заменить морально и физически устаревшие регуляторы напряжения на полупроводниковые.

К высоковольтной обмотке трансформатора УИП-1 подключается высоковольтный выпрямитель, собранный из диодов и конденсаторов самого УИП-1, а к выходу этого выпрямителя параллельно подключаются два новых универсальных высоковольтных регулятора напряжения. Схема высоковольтных регуляторов приведена на рис. 1.

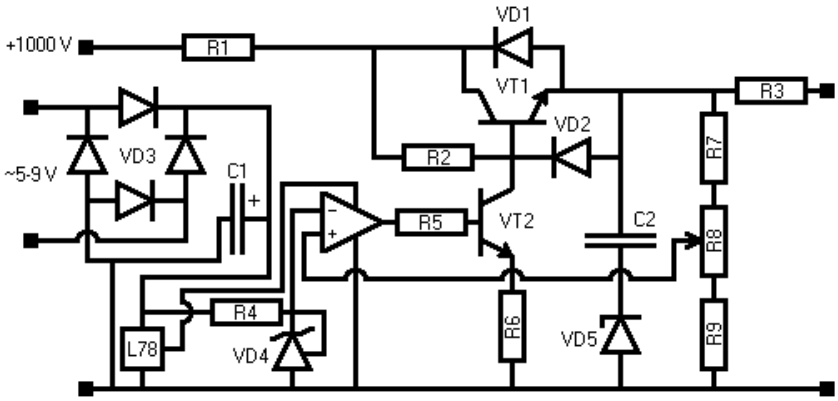


Рис.1: Схема высоковольтного регулятора напряжения

Принцип действия схемы заключается в следующем:

- напряжение на выходе операционного усилителя (ОУ) и номиналы резисторов R5 и R6 определяют базовый ток транзистора VT2 и, соответственно, ток через резистор R2. Резистор R6 также осуществляет обратную связь, стабилизируя ток через резистор R2;
- ток через резистор R2 определяет падение напряжения на нём и, соответственно, напряжение на коллекторе транзистора VT2;
- напряжение на эмиттере транзистора VT1, а значит и на выходе схемы, равняется напряжению на коллекторе транзистора VT2 минус падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT1 (последнее во всех случаях приблизительно равно 0,7В);
- таким образом, напряжение на выходе ОУ определяет напряжение на выходе схемы;
- на инвертирующий вход ОУ подаётся опорное напряжение 2,5В с источника VD4. На неинвертирующий вход ОУ подаётся напряжение с делителя R7-R8-R9, подключённого к эмиттеру транзистора VT1. Таким образом, ОУ будет изменять напряжение на своём выходе до тех пор, пока напряжение на выходе схемы не станет равным 2,5В, умноженным на коэффициент деления делителя.

Диод VD2 необходим для разрядки конденсатора C2 через транзистор VT2 при регулировке выходного напряжения в сторону уменьшения. Стабилитрон VD5 необходим для защиты входа ОУ от высокого напряжения в случае быстрой регулировки блока от максимального напряжения до минимального. Конденсатор C1 и стабилизатор L78 обеспечивают стабильное напряжение питания ОУ. Резисторы R1 и R3 ограничивают ток на уровне не более 30 мА для обеспечения безопасности.

По данной схеме собран прототип регулятора. На испытаниях совместно с трансформатором и выпрямителем из УИП-1 он показал высокую надёжность, пригодность для получения газовых разрядов пониженного давления и устойчивость к коротким замыканиям на выходе. Напряжение на выходе регулируется в диапазоне от 75 до 1000 В.

К достоинствам этой схемы необходимо отнести компактность, низкую себестоимость компонентов (менее 1000 рублей), простоту, надёжность, бесступенчатую регулировку выходного напряжения и безопасность эксплуатации. При необходимости, путём смены номиналов резисторов и установки радиатора транзистора VT1 повышенной площади, возможно повышение максимального тока через регулятор до 150 мА.

К недостаткам схемы относится низкий КПД при работе на низком выходном напряжении (при напряжении 75 В он составляет менее 7%), что обуславливает тепловыделение до 30 Вт при определённых режимах работы.

6. ОБЗОРЫ / СООБЩЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 19-ОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСТАНОВКАХ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В.А. КУРНАЕВ

В мае 2010 г. в Сан Диего (США) прошла очередная 19 конференция по взаимодействию плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза (PSI-19). Ниже кратко излагаются некоторые из наиболее обсуждавшихся на конференции вопросов.

Интерес к **вольфраму** связан не только с тем, что он хуже всего распыляется корпускулярными потоками из плазмы, но и с тем, что он рассматривается как конструкционный материал, хорошо выдерживающий нейтронное облучение при $T > 500^0$C. Наблюдаемая модификация W поверхности при плазменном воздействии: появление блистеров, возникновение в гелиевой плазме при 1000K < T< 1400K на поверхности вольфрамового пуха (fuzz) или при T>1400K гелиевых пузырьков размером 50 нм также как и накопление в W трития и даже характерное для W образование трещин не являются серьезной проблемой для его использования. Оказалось, что вместо того, чтобы интенсивно испаряться под действием больших тепловых потоков, приводя к загрязнению плазмы W, насыщенные гелием нановолоски W пуха хорошо выдерживали повышенные тепловые нагрузки, под действием которых толщина пухового слоя постепенно уменьшалась. Таким образом, полагают, что W пух может замедлить образование трещин при импульсных тепловых нагрузках.

Для более адекватного описания динамики поведения захваченных в обращенные к плазме элементы (ОПЭ) изотопов водорода и гелия использованы недавно разработанные **комбинированные коды** ACAT DIFFUSE, TRYDIN PIDAT, новая версия кода EDDY. При таком комбинировании периодически рассчитывается профиль внедрения, а затем диффузия частиц в твердом теле.

Моделирование движения частиц в пристеночной области методом «частица в ячейке» (PIC) указывают на сильную зависимость наиболее вероятного угла падения частиц от угла наклона к поверхности магнитного поля, а также влияние вторичной электронной эмиссии на пристеночный потенциал.

Моделирование осаждения углеводородных пленок в щелях реальных ОПЭ позволяет качественно описать наблюдаемые экспериментально результаты, но требует дальнейшего развития метода PIC для описания пристеночной плазмы у топографически неоднородной поверхности ОПЭ. Специально для интерпретации данных с разных токамаков и особенно с TEXTORa были разработаны коды, учитывающие сложную геометрию и изменение параметров плазмы для узких длинных каналов. Так, разработанный в Юлихе 3D GAPS код (Д.Матвеев) учитывает трехмерность задачи и две отличающиеся зоны: облучаемую плазмой и затененную от нее. При этом наряду с нейтралами перезарядки, ионами дейтерия и углерода из скреп-слоя учитывается возможность образования углеводородов, их ионизация и осаждение на стенках щели. Одновременно с помощью PIC кода SPICE2 рассчитывается детальное, с точностью масштаба дебаевского слоя (десятки мкм), распределение полей и потоков ионов в щели с миллиметровыми размерами. Моделирование дает хорошее численное совпадение за исключением осаждения на дне щели, для которой получаются существенно заниженные значения величины осадка.

Для **учета химических процессов** в общем описании взаимодействия плазмы с поверхностью предлагается в общую модель наряду с описанием ОПЭ, включающем описание плазмы, задаваемой кодами типа 2B-EIRENE, матрицу перераспределения типа DIVIMP и код для вычисления распыления типа SDTrim, добавить описание химической эволюции приповерхностного слоя материала. Знание результатов совместимости материалов при плазменном воздействии позволит сознательно модифицировать ОПЭ и потоки на них.

Для моделирования переноса и переосаждения распыленного материала с успехом используется код ERO. Результаты эволюции со временем потоков эродированного Be на внешнем обводе JET в L моде были неплохо описаны моделированием с помощью кода DIVIMP-ERODEP.

Литизация стенок путем введения в скреп-слой Li капелек (аэрозоля) резко улучшили параметры плазмы в NSTX и EAST, а ВЧ разряд в смеси Li+SiH_4 в токамаке HT-7 обеспечил кондиционирование стенок для более чем 50 рабочих разрядов. По мере накопления Li в NSTX уменьшалось число ЭЛМов в

разряде до их полного исчезновения при введении более 5 г Li, что подтвердило предсказания Л.Захарова об изменении положения градиента плотности тока по отношению к поверхностям с рациональными значениями мод. Однако к нерешенным проблемам литизации отнесены вопросы коррозии, накопления трития, электромагнитные нагрузки, возникающие из-за появления ЭДС и соответствующего тока в жидком металле, а также течи и образование «пробок» после контакта с атмосферой.

Лабораторное исследование **захвата и удержания водорода** в смешанных слоях на основе Be (IPP, Garching) применительно к ИТЭРу (при прогреве $T_{стенки}$ =240^{0}C, $T_{дивертора}$= 350^{0}C) показало, что проблем с удалением захваченного водорода не возникает с чистыми осажденными Be слоями и со слоями насыщенного водородом Be, осажденными в холодных зонах установки (доля оставшегося после прогрева водорода менее 10%). Однако в смешанных Be/W слоях эта доля возрастает до 30% при содержания W более 60%, а в Be/C смешанных слоях при содержании C более 50% удаления водорода практически не происходит. Естественно, что водород не выходит при прогреве до 350^{0}C, если его имплантация происходила при такой же или более высокой температуре.

Напуск азота в JETe снизил максимальную плотность тепловой нагрузки на диверторную пластину в десятки раз (от ~15 МВт/м^2 до менее чем 1 МВт/м^2). Радиационное охлаждение для достижения частичного отрыва плазмы можно рассматривать как трехстадийный процесс. Сначала происходит снижение потока мощности излучения из центральной зоны до значения, определяемого удержанием (до P_{rad} ~$2P_{L\text{-}H}$), что приводит к снижению потока мощности через сепаратрису. Это, в свою очередь, приводит к снижению потока энергии в скреп-слое и температуры в нем до T_e ~ 5 эВ и росту в нем плотности n_e. Ниже 10 эВ наибольшее излучение в расчете на атом дают C и N, Ar тоже хорошо излучает, но есть опасность его накопления в центре. 3-я стадия включает интенсивную перезарядку и рекомбинацию ионного потока, что необходимо для осуществления отрыва плазмы на мишени. Если первая стадия линейно зависит от концентрации примесей, то вторая и третья зависят от нее нелинейно, поэтому для оптимизации пространственного распределения излучения примесей необходимо рассматривать напуск в установку многокомпонентных смесей. Энергия ионов с зарядом Z, ускоряемых пристеночным падением потенциала и бомбардирующих поверхность ОПЭ составляет ~ $3ZT_e+2T_i$. Оценки коэффициента распыления различными ионами при одинаковой переизлучаемой энергии показывают, что эрозия максимальна для азота и минимальна для криптона за счет уменьшения требуемого количества напускаемого газа. Азот захватывается в приповерхностных слоях ОПЭ, но глубина проникновения, которая пропорциональна скорости частиц, для него оказывается значительно меньше, чем для водорода. Так, глубина внедрения в W атомов азота с энергией 100 эВ составляет 1-2 нм и на поверхности накапливается менее 10^{20} N/м^2 в виде нитридной фазы (W/N=1:1), причем насыщение наступает при очень малых дозах облучения. **Шероховатость поверхности** и соосаждение азота при осаждении атомов вольфрама могут привести к обогащению приповерхностных слоев азотом. Образование WN приводит примерно к 3-х кратному уменьшению коэффициента распыления. Однако измерение эрозии W непосредственно в токамаке ASDEX такого уменьшения при насыщении поверхности азотом не показали.

Проблема «смягчения» ЭЛМов может быть решена разными способами: применением возмущения магнитного поля: использованием 4-х внешних катушек, увеличением частоты ЭЛМов в 4-5 раз (до 20-100 кГц), уменьшением плотности, изменением треугольности, бросками в вертикальном направлении, напуском примесей, напуском рабочего газа.

Исследования тонкой структуры ЭЛМ-ов на JET позволили выявить их «тонкую» структуру. Число филаментов в ЭЛМе в пределах всей установки оценено в 10-20, а время нарастания 100 мкс.

Подавление ЭЛМов на NSTX при напылении на область дивертора слоя Li происходит по следующей схеме: литий уменьшает рециклинг водорода, уменьшаются градиенты давления на границе, максимум градиента давления перемещается внутрь, изменяется магнитный шир, что влечет за собой перестройку бутстреп тока и параллельных токов, приводящую к подавлению кинк и пилинг неустойчивостей, а отсюда, и подавление ЭЛМов. Откачка водорода, когда напыление Li происходило в область дивертора, 5% которой была занято элементами описанного выше так называемого жидколитиевого дивертора и, когда напыление происходило до установки этого дивертора, оказалась практически одинаковой. Прогрев дивертора показал, что термодесорбционные спектры соответствуют газовыделению гидратированного лития.

Последние результаты по **стационарному режиму работы дивертора на китайском токамаке** со сверхпроводящим соленоидом тороидального поля EAST с проектным значением длительности импульса в

1000 с первая стенка из нержавеющей стали заменена на графитовую. Тайлы из графита GBST1308, содержащего 1%B_4C, 2,5%Si и 7,5%Ti, покрытые SiC прикручены болтами к водоохлаждаемым стенкам, что обеспечивает их температуру не выше 900^0C при нагрузке в 2 МВт/м^2. Карбид кремния должен уменьшать химическое распыление углерода и его прилипание за счет более высокого коэффициента отражения. Получены разряды с диверторной конфигурацией длительностью свыше 65 с с поддержанием тока исключительно благодаря генерации тока на нижнем гибриде.

При обсуждении **проблем пыли** в установках было подчеркнуто, что ни источники пыли, ни вероятности ее появления количественно не определены. Наблюдение с помощью скоростной камеры вводимых в LHD углеродных макрочастиц диаметром 8 мкм, показало, что часто частицы движутся однонаправленно без ускорения со скоростью до 40 м/с, Наблюдалась также абляция конгломератов частиц.

В докладе Б.В.Кутеева обсуждались «пылевые» технологии для УТС. Расчеты на основании модели с 1D центральной плазмой и 2D плазмой скреп-слоя, согласно которой параллельный перенос частиц определяется звуковой скоростью, а поперечный – диффузией или эффектом Симона, параллельный и поперечный коэффициенты рециклинга зависят от сорта примеси, а перенос энергии определяется параллельной электронной теплопроводностью и с учетом напуска и откачки и коронального равновесия, показывают, что инжекция в скреп слой ИТЭР капель Li диаметром 20-30 мкм и скоростью 30-500 м/с при общем расходе 1г/с позволит переизлучить в скреп-слое половину (около 40 МВт) поступающей в него мощности.

На конференции обращено внимание на **проблему униполярных дуг**, которые могут привести к значительному поступлению примесей и пыли в установку. Если ранее считали, что основным источником примесей будет распыление, то наличие ЭЛМов и изменение рельефа в результате плазменного воздействия заставляют вернуться к рассмотрению роли униполярных дуг, которые могут быть инициированы переходными режимами. Удалось зафиксировать возникновение дуг непосредственно в разряде (длительность существования дуг 0.1 мкс и характерный размер 10 мкм^2). Появление изолирующих слоев резко усиливает дугообразование. Обнаружена сильная корреляция появления дуг и ЭЛМов. Роль дуг в эрозии ОПЭ для ИТЭР с полностью металлическими стенками остается неясной.

Результаты исследования эрозии СС-композитов и вольфрамовых образцов **под действием импульсных плазменных нагрузок** на КСПУ в ТРИНИТИ (Н.Климов и др.) сводятся к следующему. Основная эрозия СС-композита происходит за счет параллельных поверхности (PAN) волокон, причем их скорость эрозии пропорциональна примерно кубу энерговклада. Основным процессом эрозии W ниже порога плавления является трещинообразование, первичные трещины глубиной 500 мкм образуют на поверхности вольфрама сетку с характерными размерами 1-3 мм, а вторичные глубиной 50 мкм делят поверхность на ячейки размерами 100-300 мкм. Ширина щелей растет с увеличением числа импульсов. Выше порога плавления эрозия W происходит за счет движения расплавленных слоев и эмиссии капель (вылетают они в основном вдоль потока плазмы, их скорость 0-25 м/с).

На важную особенность взаимодействия плазмы с поверхностью обратил внимание П. Стенжеби (P.Stangeby). Осаждение примесей, которое изучалось в специальных экспериментах с углеводородами на основе изотопа ^{13}C, на шероховатую поверхность (размер микронеровностей порядка 1 мкм) оказалось в несколько раз большим, чем на гладкую (микронеровности менее 0,1 мкм). Анализ данных с напуском изотопа углерода, выполненных на разных токамаках, показал, что перенос примесей определяется локальными радиальным и полоидальными дрейфами в электрических полях,

Расчеты плотности энерговыделения для самого неблагоприятного случая ЭЛМов, когда из плазмы с энергосодержанием 350 МДж ЭЛМом уносится 20 МДж и 2/3 этой энергии приходится на 0,8 м^2 мишени внутреннего дивертора, а тот работает в режиме с полным отрывом плазмы, дают примерно в 35 раз большее значение, чем может выдержать W моноблок без плавления (0,5 МВт/м^2). Поэтому для работы ИТЭРа необходимо сильное подавление ЭЛМов (до 0,6 МДж или в 30 раз!).

Максимальные тепловые нагрузки в доактивационной стадии работы ИТЭР в стационарном режиме предполагаются на уровне 13,5 МВт/м^2 при работе на водороде в L-моде при токе 15 МА и при работе на гелии в H-моде при токе 7,5 МА, а при переходных событиях – 2,1 МДж/м^2 для неуправляемых ЭЛМов при том же токе и 1,7-6,9 МДж/м^2 при больших срывах в L-моде и токе 15 МА.

Для предотвращения разрушения краев соседних моноблоков точность их радиальной установки должна быть не хуже 0.15 мм. Эрозия Be стенок в дальнем скреп-слое за счет распыления ожидается

(моделирование с помощью LIM DIVIMP) на уровне 0,00025-0,055 мм Be/час, а накопление трития за счет переосаждения на уровне 0,5 – 5,5 г/час.

Важной частью европейской программы исследований являются **эксперименты на JET с «итэропобными» ОПЭ** (S.Brezinsek et al), (первая стенка - Be и W дивертор, охлаждение только инерционное), которая предполагает монтаж ОПЭ в 2011.

Быстрая потеря плазмой тепла или **тепловое тушение** (thermal quench, TQ), предшествующая гашению тока (current quench, CQ), происходит в 10 раз быстрее, чем следует из резистивной МГД, его продолжительность пропорциональна малому радиусу и для ИТЭРа должна составлять ~ 1 мс. Во время TQ скреп-слой может перемещаться, расширяться и расщепляться. При всех основных видах срывов: при превышении пределов по плотности, по току, по бета, радиационном и вертикальном смещении (VDE) происходит расширение скреп-слоя (примерно в 7 раз). Тепловые нагрузки на первую стенку могут быть сравнимы с таковыми в диверторе.

Напускаемые в установку газовые струи могут перевести в излучение около 100% TQ. Первоначально ассиметричное распределение напущенного газа в установке на пике TQ тороидально симметризуется в отличие от тушения разряда пеллетами, распределение примесей после которых менее симметрично из за меньшего времени на тороидальный перенос. Быстрые болометрические измерения показывают полоидальный дрейф зоны максимального излучения при TQ.

Скорость гашения тока (CQ) зависит от сопротивления плазмы. При слишком быстром CQ в окружающих плазму конструкциях возникают вихревые токи, приводящие к большим электромагнитным нагрузкам. Если CQ медленный, то образующийся в плазме полоидальный ток, взаимодействуя с ОПЭ, также приводит к большим электромагнитным нагрузкам на них. Максимальное значение гало-тока с учетом фактора тороидального пикирования (1-5) составляет значительную долю от тока плазмы (< 0.7 I_p). Напуск небольшого количества газа для тушения тока приводит к «горячим» вертикальным смещениям (VDE) и увеличению гало-токов в 2-4 раза (DIII-D), а уменьшает гало-токи введение большого количества газа (4000л·Торр He).

Данные с JET показывает, что существует порог по тороидальному полю (2 Тл), ниже которого убегающие электроны не возникают. Напуск многоэлектронных атомов при тушении тока может увеличить общее число убегающих электронов на порядки величины. Недавние вычисления эффекта от использования возмущающих магнитных полей (RMP) показывают, что возможно значительное уменьшение тока быстрых электронов на начальной стадии. Полное подавление развития электронной лавины убегающих электронов возможно при большой электронной плотности, достигаемой путем интенсивной инжекции примесных атомов на стадии теплового тушения.

При Q=10 и допустимой плотности мощности на ОПЭ энергия в ЭЛМе не должна превышать 1 МДж. Такие ЭЛМы возможны на токамаке JET в так называемой комбинированной фазе, следующей сразу после гигантского ЭЛМа. при мощности излучения при тепловом срыве 10^8 Вт.

Анализ влияния нейтронного облучения на ОПЭ и конструкционные материалы в условиях ДЕМО показал, что выбранные для ИТЭРа материалы W, Be и CC-композиты, как и их производство, не согласуются с термоядерными реакторами следующего поколения. Диапазон их применения в условиях нейтронного облучения узок и выдерживают они недостаточно большие дозы облучения.

Итоги конференции можно суммировать следующим образом. Несмотря на наличие интересных физических результатов из области взаимодействия плазмы с конденсированным веществом, серьезный прогресс развитии диагностики такого взаимодействия непосредственно в установках и в моделировании пристеночных процессов, сама проблема влияния обращенных к плазме материалов на работоспособность и параметры термоядерных реакторов далека от своего разрешения и требует не столько широкого, сколько более углубленного подхода. Большим открытым вопросом остается влияние интенсивного нейтронного воздействия на поведение этих материалов.

ДВА НЕОБЫЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРИМЕРА ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ГРУПП В ПРИРОДЕ *

Б.А. ТРУБНИКОВ, О.Б. ТРУБНИКОВА[1]

[1] *Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН. Москва, Россия.*

Существует раздел математики, называемый теорией групп. В нём «группой» называют совокупность объектов, которые подчиняются определённым правилам поведения при операциях преобразования группы. Группа должна быть устроена так, чтобы применение операции давало бы новый объект, но обязательно принадлежащий той же группе, и для всякой операции должна существовать обратная операция. Последовательное применение прямой и обратной операции должно возвращать группу в исходное состояние. Ниже рассмотрены два плазменных примера: группа мультиполей Крамерса, описывающих тормозное излучение плазмы, и группа «листов да-Винчи», описывающая 24 карликовые галактики – спутники нашей Галактики – Млечного Пути.

1) В качестве первого примера приведём **группу мультипольных решений Крамерса для тормозного излучения электронов плазмы в поле неподвижного иона.**

В сборнике «тезисы докладов» Звенигородской конференции по Физике плазмы и УТС 2009 года в докладе В. И. Когана сделано излишне сильное утверждение, что Фейнман и Ландау не понимают квантовую механику, потому что не знают параболическую электродинамику, как ключ к пониманию квантовой механики (!) В докторской диссертации А. Б.Кукушкина 2010 года проблема тормозного излучения названа «концепцией «крамерсовской электродинамики». Но в книге Эдмонда Бауэра «Введение в теорию групп» изд. Комкнига, 2005 г. на стр. 47 говорится: «Для того чтобы точно определить условия излучения и вычислить относительную интенсивность различных линий спектра, необходимо **(когда атом находится в стационарном состоянии)** вычислить вероятности различных возможных переходов».

Первая попытка в этом направлении была сделана Крамерсом (1923) и основана на принципе соответствия. И в той же книге Бауэра в примечании на стр. 47 говорится: «При этом мы пренебрегаем квадрупольным излучением, которое в $e^2/\hbar c = 1/137$ раз меньше дипольного. Но учет только дипольного излучения означает, что учитываются только однофотонные процессы. В этих условиях ни о какой квазиклассичности процесса излучения говорить нельзя, что подчеркивается отсутствием понятия траектории, как об этом говорили сам Ландау и Берестецкий в воспоминаниях о Ландау. Как видим, истинно «крамерсовская» электродинамика не является «параболической», поскольку слово «параболическая» характеризует вид траектории электрона. Между тем, в книге «Воспоминания о Л. Д. Ландау» имеется статья В. Б. Берестецкого, в которой на стр. 72 говорится: «Сначала хотели узнать детально, по какой траектории движется электрон в атоме, а потом выяснилось, что электрон вообще траектории не имеет. Вот эту идею, чрез 15 с лишним лет после Гейзенберга возродил Ландау в 1959 г.

С другой стороны, в учебнике Б.А.Трубникова «Теория плазмы» (Атомиздат, 1996 г.) на стр.374 приведена формула (37.24) для гаунт-фактора $g(x), x = \dfrac{\hbar\omega}{\varepsilon_0} \le 1$:

$$g = \frac{1}{2\sqrt{1-x}} \ln \frac{1+\sqrt{1-x}}{1-\sqrt{1-x}}, \qquad (37.24)$$

которой нужно пользоваться в том случае, когда понятия траектории не существует.

2) В качестве второго необычного «плазменного» примера группы возьмем денежную купюру достоинством 100 рублей и рассмотрим закономерности правил преобразования фигур, возникающих при её сворачивании или при добавлении к ней новых купюр, При этих чисто геометрических операциях возникают либо квадраты, либо прямоугольники, длина которых вдвое больше их ширины, так что отношение длинной стороны к короткой равно либо единице – у квадратов, либо двойке – у прямоугольников. Во всех случаях отношение длинной стороны к короткой мы будем называть «статистическим весом» и обозначать большой буквой Ω. Теперь организуем «очередь операций», присвоив

* Материал опубликован в редакции автора

каждой операции её очередной номер. Исходной бумажной купюре присвоим № = 1 и отметим, что она имеет статистический вес 2. Теперь присоединим к ней рядом вторую такую же купюру, образовав из них квадрат, все стороны которого равны 2. Этой фигуре присваиваем № = 2 при статистическом весе Ω = 1 и полной площади S_2 = 4 = (№ = 2)^2. И далее продолжаем построение очереди нумерованных фигур. Натуральный логарифм статистического веса будем называть энтропией. Тогда нетрудно заметить, что по мере нарастания очереди, статистические веса будут перемножаться, а энтропии суммироваться. Дойдя до определённого этапа, можно повернуть назад и пойти по очереди в обратном направлении, на каждом шаге отнимая половинки фигур. Весь рассмотренный набор фигур мы будем называть «множеством «листов да-Винчи», которые в математическом отношении являются группой.

Судя по всему, подобными групповыми свойствами обладают так называемые карликовые галактики – спутники нашего Млечного Пути. Они были обнаружены лишь недавно – в 2008 году группой астрономов под руководством Луиса Стригари. При этом оказалось, что у всех 24-х карликовых галактик – спутников Млечного Пути – гравитирующая **масса является одинаковой, поскольку она соответствует «энтропии листа да-Винчи», которая определяется как логарифм статистического веса, равного отношению сторон (длинной к короткой).**

Более того, требование нулевой температуры является здесь обязательным и позволяет исключить рассмотрение проблем лоренцевского сокращения длин всех отрезков, фигурирующих в данной задаче, что и позволяет ввести общую одинаковую гравитирующую массу для всех 24-х карликовых галактик – спутников Млечного Пути, проявляющих свое присутствие только участием в гравитационных взаимодействиях при отсутствии каких-либо других признаков их присутствия (они не участвуют ни в электромагнитных, ни в слабых ядерных, ни в сильных ядерных взаимодействиях). Единственный способ обнаружить их присутствие состоит в численном моделировании поведения всей их совокупности и последующем истолковании наблюдаемого движения звезд, окружающих место расположения очередной выбранной карликовой галактики. Этот метод и был использован в работе группы астрономов Стригари (см.[1-2]). При таком моделировании оказалось возможным выявить, что карликовые галактики отличаются друг от друга по своей светимости, которая оказалась их важным отличительным признаком.

Наконец, полезно учесть, что именно при нулевой температуре можно ожидать (см. [3]) хорошей применимости нормального распределения Пуассона, когда имеется множество k независимых событий с вероятностями, определяемыми формулой Пуассона:

$$w_k = [(\exp - \mu) / k!]\ \mu^k ,$$

где μ – среднее число событий при стандартном отклонении $\sqrt{\mu}$, и в работе [2] приведены графики по моделированию 18-ти карликовых галактик, для которых разброс по светимостям охватывает 4 порядка солнечных светимостей. Если предполагать справедливость схемы Пуассона, то такой разброс светимостей должен соответствовать стандартному отклонению в 2 порядка солнечных единиц светимости. Именно такие отклонения от мест наибольшей светимости и приведены в графиках статьи [2] для всех карликовых галактик – спутников нашего Млечного Пути.

3) О группе «листов Леонардо да-Винчи» и сверхтекучести карликовых галактик – спутников Млечного Пути.

Вернемся к проблеме «бумажных листов Леонардо да-Винчи» и сравним их с карликовыми галактиками. В обоих этих случаях энтропия описывается формулой (в сторону нарастания номера последовательности

$$N = 1, 2, 3,///24) \qquad S' = k_{eff}.\ \ln 2 \qquad (*),$$

где k_{eff}.– условная единица измерения энтропии для нашего случая (аналог постоянной Больцмана). Для случая с карликовыми галактиками её можно принять равной $k_{eff} = 10^3$ светимостей Солнца. Эта формула (*) и является доказательством того, что множество листов да-Винчи образуют группу со всеми присущими группе математическими свойствами.

Можно считать, что члены группы, проявляя свойство сверхтекучести, **движутся без трения**, испытывая воздействие лишь гравитационных сил, подобно тому, как это свойство (текучесть) проявляют так называемые жидкие кристаллы, см. работу А. Ф. Андреева [1], в ней имеется следующее определение:

«мезоскопическая система (как и макроскопическая) получается из конечной системы в результате предельного перехода N—> ∞ (иV—> ∞), где N – число частиц, V – объём. Однако, одновременно с этим необходимо во-первых, неограниченно понижать температуру Т—» *0, и во-вторых неограниченно повышать чувствительность измерений.* Понижение температуры обеспечивает квантовую когерентность во всей сколь угодно большой системе. В сочетании с повышением чувствительности измерений это обеспечивает характерное для мезоскопики свойство – изменение числа частиц в системе на единицу, *AN* = 1, дает конечный (измеримый) эффект, несмотря на то, что N —» ∞ . Вместо слов «повышение чувствительности измерений» можно говорить об изменении шкалы для *AN* без изменения шкалы для N, так что в результате перехода к мезоскопике из одной переменной N мы получаем по существу две различные переменные *AN* и N —» ∞. Вся эта картина замечательно пригодна для интерпретации свойств карликовых галактик Млечного Пути, явно обладающих свойством сверхтекучести в условиях по существу нулевых температур.

4) Существо дела состоит в формуле (10) для энтропии $S = k \ln \Delta n$, (10) из статьи Л.П. Питаевского в Физическом энциклопедическом словаре. Здесь k=1,38×10^{-16} эрг/град. – постоянная Больцмана, а $\Delta n -$ статистический вес. И далее Л. П. Питаевский уточняет, что здесь существенно, что для **<u>однозначного определения энтропии</u>** нужно пользоваться именно **<u>квантовой</u>** формулой

$$Z = \sum_n E_n / kT \quad (8),$$

где сумма берется по всем возможным квантовым состояниям (а их число Δn обязательно равно целому числу и не может быть дробным). Теперь обратим внимание на тот факт, что в формуле (10) постоянная Больцмана k = 1,38 × 10^{-16} эрг/град играет роль условной размерной единицы измерения энтропии с учетом того, что стат. вес Δn - это целое безразмерное число.

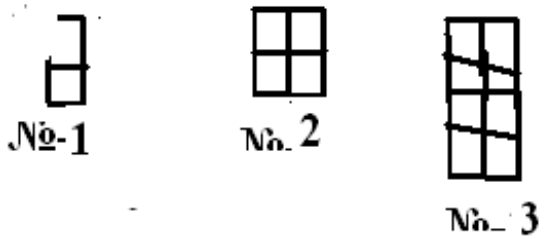
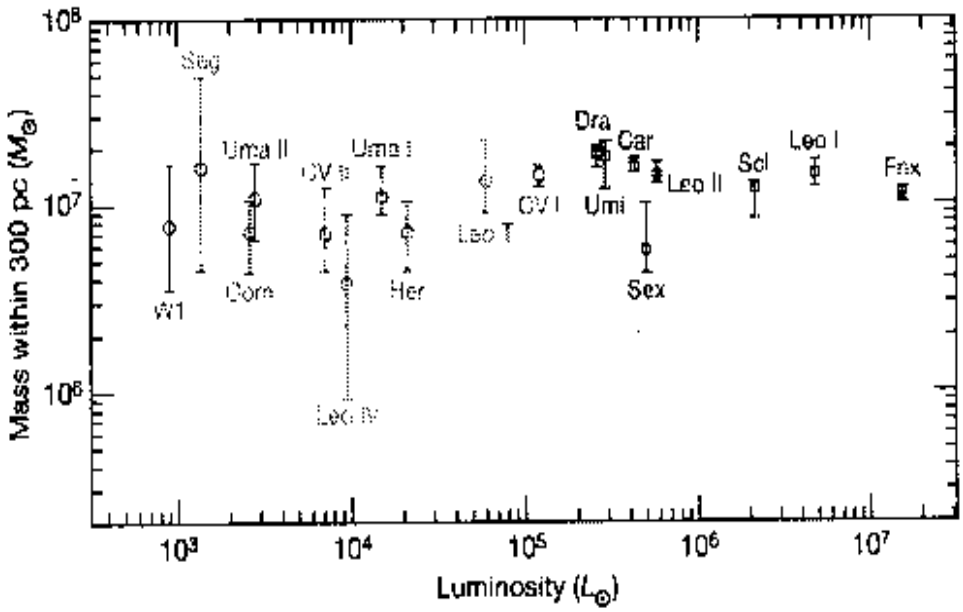


Рис. 1. Группа «листов да-Винчи»

Во всех случаях определим энтропию (множества листов Да-Винчи), как натуральный логарифм стат-веса Ω, равного целому числу (отношению длинной стороны фигуры к короткой стороне). Здесь Ω – квантовый статистический вес, принимающий всего два значения и равный или Ω = 1, когда лист имеет форму квадрата (при этом энтропия равна нулю), или Ω = 2, когда лист имеет вид прямоугольника с отношением сторон 2/1. (длинной к короткой). Если «шаг за шагом» мысленно продвигаться вдоль группы «листов Леонардо да-Винчи», то получим чередующийся набор квадратов и прямоугольников, причем вклад в энтропию вносят только прямоугольники, всегда имеющие *нужное отношение сторон* 2/1. (длинной к короткой). Им можно последовательно присвоить номера: № = 1, 2, 3, …, считая, что каждый номер означает номер очередной карликовой галактики Млечного Пути, как это изображено ниже на рис. 2.

На рис. 2, взятом нами из статьи [1], указаны лишь 18 карликовых галактик (КГ) – спутников Млечного Пути. Но всего их наблюдается 24, причем эти наблюдения являются не прямыми, а получены путём сравнения с предсказаниями моделирования. По горизонтали отложена их светимость, и 18 КГ охватывают интервал в 4 порядка величин, так что на одну КГ приходится интервал $10^4/18 \approx 10^3/2 \approx 500$ единиц солнечных светимостей. Поскольку всего имеется ≈ 24 КГ, то они займут полный интервал (4/3×10^4) солнечных единиц светимостей.



(1-2-3-4-5) (6-7-8-9-10) (11-12-13-14-15) (16-17-18)

Рис. 2. Карликовые галактик, спутники Млечного Пути, с указанием номера каждой КГ (от № 1 до № 18) №№ 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18. Такая нумерация (через единицу полностью соответствует номерам последовательно выстраиваемых матриц квадратов Кели. Но ввиду неопределённо большой длины их полного набора, этот интервал цифр («1-2-…18») мы будем называть «вставкой» и вводим особое «правило начала вставки» («ПНВ»). Поскольку масса у всех КГ одинакова, то «ПНВ» подбирается так, чтобы начало вставки соответствовало бы подходящему постепенно нарастающему значению экспериментально наблюдаемой светимости, которая для галактики № 1 равна 10^3 светимости Солнца.

5) Последний пункт, который следует обсудить, состоит в вопросе о том, почему и массы и светимости карликовых галактик оказываются столь большими. Как мы видели, гравитирующие массы оказываются все примерно равными 10^7 масс Солнца. Наблюдаемая максимальная светимость наиболее яркой карликовой галактики примерно равна $1{,}3\cdot10^7$ солнечных светимостей. Столь большие цифры показывают, что, скорее всего, все карликовые галактики являются остатками одинаковых по массе взорвавшихся черных дыр и отличаются друг от друга полным моментом вращения остаточных сгустков вещества, ставшего сверхтекучим из-за переохлаждения до ультранизких температур (см. [4]).

Литература

1. «Природа» 2009, № 4 стр. 68 «У галактик есть нижний предел массы»
2. Nature, 2008, V. 454, p. 1096-1097/ Louis E. Strigari. «A common mass scale for satellite galaxies of the Milky way»
3. Основные формулы физики. Справочник под редакцией А. Мензела. Изд. И.Л. М. 1957 стр.101
4. А.Ф. Андреев «Сверхтекучесть, сверхпроводимость и магнетизм в мезоскопике» УФН. Том 168, № 6, июнь 1998 г. стр. 655-663)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПЕРЕЧЕНЬ ТРУДОВ КАФЕДРЫ ЗА 2010 ГОД

Международные журналы

1. *Zhdanov V.M., Roldughin V.I.* Gas flow and diffusion in nano-sized capillaries and porous bodies. Nanomechanics: Science and Technology. 2010. V. 1.No 1. P. 49-97.
2. *Zhdanov V.M., Roldughin V.I.* Gas flow and diffusion in nano-sized capillaries and porous bodies. Nanomechanics: Science and Technology. 2010. V. 1. No 2. P. 99-125.
3. *K.A. Moshkunov, K. Schmid, M. Mayer, V.A. Kurnaev, Yu.M. Gasparyan*, Air exposure and sample storage time influence on hydrogen release from tungsten, J. Nucl. Mater. 404 (2010) 174–177.
4. *Shchelkanov I.A., Naumov D.S., Krashevskaya G.V., Tsventoukh M.M., Vovchenko D.E., Khodachenko G.V., Kurnaev V.A.* The distributions of plasma parameters in the "MAGNETOR" device with hot cathode discharge. Journal of Physics: Conference Series. 2010. T. 207. C. 012036.

Отечественные журналы

5. *Долгов А.Н., Земченкова Н.В., Клячин Н.А., Прохорович Д.Е.* Механизмы образования и транспортировки ионных потоков в плазме разряда сильноточной вакуумной искры. – Физика плазмы, 2010, том 36, № 9, с. 826 – 832.
6. *Жданов В.М. Ролдугин В.И.* Эффект анизотропии разделительных свойств многослойных пористых мембран // Перспективные материалы. Спец. выпуск (8). Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул. 2010. С. 237-241.
7. *Жданов В.М., Ролдугин В.И., Шерышева Е.Е.* О газоразделительных свойствах бислойных пористых мембран. // Коллоид. журн. 2010. Т. 72. № 5. С. 627-634.
8. *А.А. Писарев, В.И. Бурлака, Г.В. Крашевская, А.А. Русинов, Г.В. Ходаченко, Л.В. Мисожников, И.Н. Юркевич*, Диагностика свойств конденсаторной фольги с развитой наноструктурированной поверхностью. Краткие сообщения по физике ФИАН, 2010, номер 1, с.44-47.
9. *В.И. Бурлака, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев, И.В. Визгалов, А.А. Русинов, С.А. Крат*. Захват дейтерия в графит мпг-8 и углеводородные плёнки при облучении дейтериевой плазмой, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 2, с.33-38.
10. *Е.Д. Маренков, И.В.Цветков, А.А.Писарев*, Проницаемость изотопов водорода через многослойные мембраны. Известия РАН. Серия физическая, 2010, Том 74, №2, с.316-322.
11. *Г.В.Ходаченко, А.А.Писарев, Г.В.Крашевская, И.А.Щелканов, И.Е.Орлов, А.Ю.Соколов, А.В.Казиев, М.В.Атаманов, А.А.Юрченко, К.А.Купцов*, Ионно-плазменная генерация тонкого TiN-покрытия фольги электролитических конденсаторов. Известия РАН. Серия физическая, 2010, т.74, №2, с.277-283.
12. *К.А. Мошкунов, К. Шмид, В. Якоб, А.А. Русинов, В.А. Курнаев.* Взаимодействие водорода с вольфрамом, покрытым оксидом алюминия, при плазменном облучении. Известия РАН. Серия физическая. 2010, т. 74, № 2, с. 284-288.
13. *Г.В. Крашевская, В.А. Курнаев, Г.Х. Салахутдинов, М.М. Цвентух,* Исследование высокоэнергетичных электронов плазмы СВЧ-разряда в конфигурации би-дипольной магнитной ловушки "МАГНЕТОР" по анализу рентгеновского излучения. Прикладная физика. 2010. № 1. С. 43-47.
14. *Гуторов К.М., Визгалов И.В., Маркина Е.А., Курнаев В.А.* Влияние тонких диэлектрических пленок на электронную эмиссию и устойчивость плазмо-поверхностного контакта. Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 2. С. 208-211.
15. *Матвеев Д.И., Курнаев В.А., Цветков И.В.* Зависимость вероятного угла падения ионов на поверхность первой стенки ТЯР от угла наклона магнитного поля. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 6. С. 108-112.
16. *Мамедов Н.В., Курнаев В.А.* Модернизированная установка для исследования взаимодействия с поверхностью ионов с энергиями до 40 кэВ. Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2010. № 4. С. 45-48.
17. *Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Вергазов С.В., Кузьмин А.А., Смирнов В.М., Шигин П.А.* Захват и удержание дейтерия в углеродных материалах, облучаемых в плазме. Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 2. С. 248-253.
18. *Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Вергазов С.В., Кузьмин А.А., Фадина О.С., Шигин П.А.* Спектры термодесорбции водорода из графитов и их связь с условиями имплантации и удержания. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 7. С. 23-28.
19. *Беграмбеков Л.Б., Айрапетов А.А., Вергазов С.В., Кузьмин А.А., Шигин П.А., Садовский Я.А.* Удаление кислорода из углеграфитового композита и нержавеющей стали в дейтериевом тлеющем разряде. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2010. № 3. С. 29-34.

20. *Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савёлов А.С., Саранцев С.А., Терёхин А.Н.* Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди. Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. С. 463-472.
21. *Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х., Колтунов М.В., Лемешко Б.Д., Юрков Д.И., Сидоров П.П.* Исследование импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса в широком энергетическом диапазоне. Прикладная физика. 2010. № 4. С. 52-56.
22. *Курнаев В.А., Урусов В.А.* Восстановление энергетических спектров для спектрометров с предварительным замедлением из диафрагм с круглыми отверстиями, Письма в ЖТФ, 2010, том 36, выпуск 10, с.24.
23. Щелканов И.А., Нанесение защитных покрытий высокой твердости в сильноточном импульсном магнетронном разряде, Научно-практический межотраслевой журнал Интеграл, том 53, №3, 27.

Международные конференции

1. *Zhdanov V.M.* On the theory of separation effects in the flow of gas mixture through multi-layer porous membranes // XXV INTERNATIONAL SYMPOSIUM "ARS SEPARATORIA" TORUŃ, POLAND, July 4-7, 2010
2. *Yu. Gasparyan, S. Yarko, M. Mayer, V. Kurnaev, A. Pisarev*, “Modeling of deuterium permeation through tungsten coated with a carbon film”, 19th International Conference on Plasma Surface Interaction, 24-28 May 2010, San Diego, USA
3. *V. Kurnaev, D.Kogut , N.Trifonov*, Modeling of erosion and deposition in gaps, cracks and Be dustЭб19th International Conference on Plasma Surface Interaction, 24-28 May 2010, San Diego, USA
4. *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”, 19th International Conference on Plasma Surface Interaction, 24-28 May 2010, San Diego, USA
5. *A. Rusinov, Yu. Gasparyan, N. Trifonov, A. Pisarev, M. Mayer, M. Sakamoto*, “Investigation of defects in tungsten by probe fluence method”, 19th International Conference on Plasma Surface Interaction, 24-28 May 2010, San Diego, USA
6. *Yu. Gasparyan, V. Burlaka, S. Krat, A. Pisarev*, “Recycling of Deuterium and the Cathode Material in Magnetron”, 10th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials (H-Workshop), May 31 – June 1, 2010, Pleasanton, USA
7. *A. Skovoroda, A. Pisarev, Yu. Gasparyan, A.Kislov, A. Spitsin*, “Thermal Desorption from Carbon Films Collected in T-10”, 10th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials (H-Workshop), May 31 – June 1, 2010, Pleasanton, USA
8. *V. Burlaka, Yu. Gasparyan, A. Pisarev, A. Rusinov, S. Krat, K. Sugiyama*, “Deuterium trapping in graphite and carbon films growing under irradiation by deuterium plasma“,4th International Workshop & Summer School on Plasma Physics, 5-10 July 2010, Kiten, Bulgaria
9. *E.D. Marenkov, Yu.M. Gaspayan, A.A. Pisarev*, “Deuterium Release from Pores in Tungsten created by 10 kev D_3^+ beam”, 24th International Conference on Atomic Collisions in Solids, ICACS, 18-23 July 2010, Krakow, Poland
10. *Y. Zayachuk, G. Bousselin, J. Schuurmans, Yu. Gasparyan, I. Uytdenhouwen, G. Van Oost*. Design of a planar probe diagnostic system for plasmatron VISION I and its application for the study of deuterium retention in tungsten. 26th Symposium on Fusion Technology, SOFT-2010, 27 September – 1 October 2010, Porto, Portugal
11. *I. Shchelkanov, G.Khodachenko, G. Krashevskaja, A. Sokolov*. Experimental investigation of physical processes in the high power pulsed magnetron discharge. // PSE 2010 abstracts, p. 218
12. *O.A. Bashutin, E.D. Vovchenko, A.S. Savjolov, S.A. Sarantsev*. Optimization of a vacuum spark discharge as a X-ray source. International Conference-School on Plasma Physics and controlled Fusion and 4-th International Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement in Stellarators and Tokamaks. Alushta (Crimea), Ukraine, September 13-18, 2010
13. *V.Kurnaev* Controlled Nuclear Fusion: training and research in National Research Nuclear University MEPhI International Round Table Italy-Russia, Yekaterinburg, 28-30 October 2010
14. *А.Н. Долгов, Н.В. Земченкова, Н.А. Клячин, В.В. Наумов, Д.Е. Прохорович*. Исследования влияния структуры разряда вакуумной искры на параметры корпускулярной эмиссии. – Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, Моск. обл., 8 – 12 февраля 2010 г., с. 323
15. *A.Airapetov, L.Begrambekov, C.Brosset, J.P.Gunn, C.Grisolia, A.Kuzmin, T.Loarer, M.Lipa, P.Moner-Garbet, P.Shigin, E.Tsitrone, A.Zakharov*. Peculiarities of hydrogen trapping in CFC and hydrogen isotope retention in the Tore Supra tiles. 19th International Conference on Plasma Surface Interaction in controlled fusion devices, San Diego, California. May 24-28, 2010

16. *Leon.B. Begrambekov, Alexey A. Gordeev, Sergey.V.Vergazov,Andrey.M. Zakharov.* Solar water heating systems. 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 24-27 августа 2010, Shanghai JiaoTong University, China
17. *L.B. Begrambekov, Y.A. Sadovsky, P.A. Shigin, V.M. Smirnov.* Influence of ion irradiation on composition of C:H films.24th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 18-23 июля, 2010, Краков, Польша
18. *А.А. Айрапетов, Л.Б.Беграмбеков, А.А. Кузьмин, О.С.Фадина, П.А.Шигин, С.В. Вергазов.* Спектры термодесорбции водорода из графитов и их взаимосвязь с условиями имплантации и удержания. 4th International Workshop & Summer School on Plasma Physics, 5 – 10 июля, 2010, Китен, Болгария
19. *А. А. Айрапетов, Л. Б. Беграмбеков, С. Бремон (S. BRÉMOND), Д. Дуэ (D. DOUAI), А.А. Кузьмин, Я. А. Садовский, П. А. Шигин, С. В. Вергазов.* Удаление кислорода из нержавеющей стали в дейтериевом тлеющем разряде. 4th International Workshop & Summer School on Plasma Physics, 5 – 10 июля, 2010, Китен, Болгария
20. *А. А.Айрапетов, Л. Б. Беграмбеков, А.А. Кузьмин, П. А. Шигин, А.М.Захаров.* Захват дейтерия в углеграфитовый композит при высоких дозах. (Deuterium trapping in Carbon Fiber Composites under high fluence). European Nuclear Conference -2010), Барселона, Испания, 30 мая – 2 июня 2010 г.

Отечественные конференции

21. *А.В. Голубева, А.В. Спицын, М. Майер, Ю.М. Гаспарян, Д.Ю. Смирнов.* «Накопление водорода в поликристаллическом вольфраме при плазменном облучении», Всероссийская научная конференция «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2010), 26 сентября – 02 октября 2010 г., г.Туапсе, Краснодарский край
22. *Е.В. Берлин, В.Ю. Григорьев, И.А. Щелканов, Г.В.Ходаченко, Т.В. Шукшина.* Экспериментальное исследование характеристик плазмы индукционного ТСР разряда, создаваемой технологическим генератором газоразрядной плазмы//«Вакуумная наука и техника» Материалы XVII научно-технической конференции. 2010 г., стр.153-156
23. *Э.И. Додулад, А.П. Кузнецов, С.А. Саранцев.* Предварительное исследование влияния условий инициирования на динамику плазмы сильноточной вакуумной искры на установке «Пион». VII Российская конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», Москва, НИЯУ МИФИ, 30 ноября – 2 декабря, 2010г., сборник научных трудов, стр.120
24. *Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х.* Механизмы образования высокоэнергетичного рентгеновского излучения в плазме сильноточного электрического разряда – там же, стр.150
25. *Иванов Д.В., Курнаев В.А., Мамедов Н.В., Синельников Д.Н.* Разработка спектрометрических методов диагностики эмиссии заряженных частиц с поверхности, её состава и структуры под воздействием потоков ионов и плазмы – там же, стр.186
26. *Жестилевский Д.А., Румянцев С.А., Соломатин С.А., Сухов Н.М., Мошнина З.И., Вовченко Е.Д., Савёлов А.С., Мошнин М.В.* Лазерная пуфа-терапия образования сшивок ДНК под действием ультрафиолетового излучения азотного лазера в присутствии 8-МОП с – там же, стр.167
27. *Большакова И., Васильевский И., Виерербл Л., Голяка Р., Дюран И., Ерашок В., Коноплёва Р., Кость Я., Куликов С., Курнаев В., Лерой К., Макидо Е., Чеканов В., Шурыгин Ф.* Магнитная диагностика токамаков нового поколения: проблемы и решения – там же, стр.4
28. *Д.В.Мозгрин, Т.В.Степанова, В.И.Тройнов, Г.В.Ходаченко, А.В.Шумов, И.А.Щелканов* Исследование излучательных характеристик сильноточного импульсного магнетронного разряда – там же, стр.68
29. *Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Бялковский О.А., Саранцев С.А., Раевский И.Ф.* Исследование эрозионного капиллярного разряда в воздухе атмосферного давления методами теневого фотографирования – там же, стр.127
30. *Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Саранцев С.А.* Методика регистрации рентгеновских обскурограмм микропинчевого разряда с помощью ПЗС камеры – там же, стр.141
31. *Кирко Д.Л., Савелов А.С., Додулад Э.И.* Изучение спектрального состава излучения низкоиндуктивной вакуумной искры – там же, стр.139
32. *Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Самарин А.В., Цыбин А.С., Шиканов А.Е.* Исследование плазменной разрядной системы с полым катодом и инерционно-электростатическим удержанием ионов – там же, стр.144
33. *А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, С.В. Вергазов, А.М. Захаров, А.А. Кузьмин, Я.А. Садовский, П.А. Шигин.* Закономерности и механизмы захвата и удержания кислорода и дейтерия в углеграфитовом композите при облучении в плазме. «Быстрозакаленные материалы и покрытия», 30.11.2010 – 01.12.2010, МАТИ, Москва

34. *Л.Б. Беграмбеков.* Захват и удержание водорода в материалах при радиационно-стимулированном насыщении. 4-ая Международная конференция «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами», 5-10 июля, 2010, Воронеж, Россия
35. *Ю.М. Гаспарян, В.И. Бурлака, А.А. Русинов, С.А. Крат, К. Сугияма, А.А. Писарев,* "Захват дейтерия в графит мпг-8 и углеродные пленки, растущие при облучении дейтериевой плазмой", 4-ая Международная конференция «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами», 5-10 июля 2010, Воронеж, Россия
36. *А.А.Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, А.Е. Евсин.* Захват водорода в графит под действием электронного облучения. 4-ая Международная конференция «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами», 5-10 июля, 2010, Воронеж, Россия

Доклады, представленные на зимней научной сессии НИЯУ МИФИ 2010 года

37. *Земченкова Н.В., Наумов В.В.* Корпускулярная диагностика – инструмент исследования процессов в сильноточной вакуумной искре – Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, 25-31 января 2010 г. XIII Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых. Сборник научных трудов – 2010, стр. 27 – 29
38. *Земченкова Н.В., Наумов В.В.* Возможности создания источника ионов на основе разряда сильноточной вакуумной искры – там же, стр. 25 – 27
39. *Безуглый В.В., Цветков И.В.* Зависимость параметров потоков рециклинга от характеристик пристеночной плазмы и наклона магнитного поля. – Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, 25-31 января 2010 г. Сборник научных трудов – 2010, стр. 65
40. *Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Евсин А.Е., Крат С.А.* Захват водорода в графит при электронном облучении – там же, стр.65
41. *Березина И.Е., Цветков И.В.* Влияние наклона магнитного поля и параметров пристеночной плазмы на электронную эмиссию с поверхности первой стенки термоядерного реактора – там же, стр.66.
42. *Беграмбеков Л.Б., Гордеев А.А., Макаров А.А.* Осаждение двухкомпонентных металлических слоев при повышенных температурах – там же, стр.67
43. *Беграмбеков Л.Б., Каплевский А.С., Шигин П.А., Садовский Я.А.,* О разделении сигналов дейтерия и гелия при проведении термосорбционного анализа – там же, стр.67
44. *Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Николаева А.С., Цыбин А.С., Шиканов А.Е.* Расчет полей и динамики в плазменном диоде с инерциальным электростатическим удержанием ионов и внешним цилиндрическим анодом – там же, стр.68
45. *Маренков Е.Д., Цветков И.В., Писарев А.А.* Проницаемость водорода через многослойные мембраны – там же, стр.70
46. *Курнаев В.А., Синельников Д.Н., Татаринова Н.В.* Эмиссия заряженных частиц из газонасыщенных материалов – там же, стр.70
47. *Бурлака В.И., Гаспарян Ю.М., Русинов А.А., Писарев А.А.* Влияние состояния поверхности на захват дейтерия в графит МПГ-8 при облучении в плазме магнетронного разряда – там же, стр.71
48. *Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Самарин А.В., Цыбин А.С., Шиканов А.Е.* Плазменная разрядная система с полным катодом и инерционно-электростатическим удержанием ионов – там же, стр.72
49. *Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савелов А.С., Саранцев С.А.* Диагностика сильноточной вакуумной искры при различных условиях тригатронного инициирования – там же, стр.72
50. *Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Самарин А.В., Цыбин А.С., Шиканов А.Е.* Установка для генерации нейтронов в плазме высоковольтного микросекундного разряда с полым катодом – там же, стр.73
51. *КрашевскаяГ.В., ЦвентухМ.М.* Магнитные ловушки со спадающим полем большой кривизны – там же, стр.73
52. *Писарев А., Гаспарян Ю., Русинов А., Трифонов Н., Спицын А., Хрипунов Б., Schwarz-Selinger T., Rasinski M., Sugiyama K.* Термосорбция дейтерия из углеродных материалов: сравнение облучения в плазме, ионного внедрения, адсорбции из газа и осажденных C-D пленок – там же, стр.74
53. *Татаринова Н.В., Казиев А.В.* Влияние микроструктуры поверхности электродов на процессы в вакууме и газе – там же, стр.168
54. *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 Т-10. – там же
55. *А.А.Айрапетов, Л.Б.Беграмбеков, Евсин А.Е., Крат С.А.* Захват дейтерия в углеграфитовый композит CFC при облучении атомарным потоком и электронами – там же
56. *Беграмбеков Л.Б., Шигин П.А., Захаров А.М., Бужинский О.И., Отрощенко В.* О защите обращенных к плазме элементов возобновляемыми покрытиями из карбида бора – там же

Кроме того 8 докладов было представлено на VIII Курчатовской молодежной школе, 22 – 25 ноября 2010 г.:

1. *Ефимов В.С., Гаспарян Ю.М., Писарев А.А.* Исследование формирования радиационных повреждений в вольфраме при облучении ионами дейтерия кэвных энергий
2. *Казиев А.В., Ходаченко Г.В., Щелканов И.А.* Расчет областей зажигания разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях сложной конфигурации
3. *Бурлака В.И., Гаспарян Ю.М., Зибров М.С., Крат С.А., Писарев А.А.* Захват и удержание дейтерия в соосажденных из плазмы углеродновольфрамовых пленках
4. *Аскинази Л.Г., Николаева В.Е.* Баланс заряженных частиц на токамаке ТУМАН-3М
5. *Додулад Э.И., Раевский И. Ф., Саранцев С.А., Степаненко А.М.* Применение универсального фокусирующего спектрометра в исследованиях видимого спектра вакуумной искры
6. *Черкез Д.И., Голубева А.В., Спицын А.В.* Исследование проницаемости вольфрамовых покрытий на графите
7. *Тукачинский А.С., Шалпегин А.В.* Исследование спектров свечения примесей в различных режимах работы токамака ТУМАН-3М
8. *Кулешин Э.О.* Одномерное и двумерное моделирование экспериментов по исследованию спектральных пробегов на лазерной установке Искра-5

Патент

1. *Мисожников Л.В., Юркевич И.Н., Кошелевский В.Ф., Гевал Ю.Н., Ходаченко Г.В., Атаманов М.В., Крашевская Г.В., Писарев А.А., Шукшина Т.В., Щелканов И.А., Мозгрин Д.В., Шарипов Э.И.* Способ получения анодной фольги, № RU2391442 от 10.06.2010

Защищенные диссертации

Докторская

Салахутдинов Г.Х. Методы диагностики рентгеновского излучения плазмы сцинтилляционными и трековыми детекторами, д.ф.м.н. специальности 01.04.08 + 01.04.01 М., НИЯУ МИФИ, октябрь 2010.

Кандидатские

1. *Мошкунов К.А.* Отражение молекулярных ионов водорода от поверхности вольфрама, к.ф.м.н., специальность 01.04.08., М., НИЯУ МИФИ, июнь 2010.
2. *Гуторов К.М.* Моделирование неустойчивого поверхностно-плазменного взаимодействия на линейном симуляторе с плазменно пучковым разрядом, к.ф.м.н., специальность 01.04.08., М., НИЯУ МИФИ, октябрь 2010.

Издания кафедры

1. Годовой отчет по НИР за 2010 год (ISBN 978-5-7262-1318-7) Ред. В.А.Курнаев, М.: МИФИ 2010, 40с.
2. Труды VII конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», МИФИ, 30 ноября-2 декабря 2010 г.

Научно-организационные мероприятия, проведенные кафедрой в 2010г.

1. Секция «Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез» на научной сессии МИФИ-2010, Москва, 27-28 января 2010 г.
2. XIII Межотраслевой семинар «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, 29 января 2010г. (выпущен CD – диск).
3. VII конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», НИЯУ МИФИ, 30 ноября-2 декабря 2010 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ДИПЛОМНЫЕ ПРОЕКТЫ, ЗАЩИЩЕННЫЕ СТУДЕНТАМИ КАФЕДРЫ В 2010 ГОДУ С ПРИСВОЕНИЕМ КВАЛИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕР-ФИЗИК

№	*Фамилия И.О.*	*Руководитель*	*Тема дипломного проекта*
		Т11-21	
1	Безуглый Владимир Викторович	Цветков И.В., НИЯУ МИФИ	Расчетные исследования зависимости параметров потоков рециклинга от характеристик пристеночной плазмы и наклона магнитного поля.
2.	Буданова Софья Андреевна	Визгалов И.В., НИЯУ МИФИ	Малогабаритный источник нейтронов на основе автоколебательного разряда
3.	Бурлака Владимир Игоревич	Писарев А.А., НИЯУ МИФИ	Исследование захвата дейтерия и модификации поверхности графита МПГ-8 при облучение в стационарном магнетронном разряде дейтериевой плазмы
4.	Гончаров Сергей Владимирович	Сурков В.В., ИКИ	Исследование связи естественного магнитного поля на поверхности Земли с флуктуациями глобальных продольных токов в ионосфере
5.	Егоров Игорь Дмитриевич	Курнаев В.А., НИЯУ МИФИ	Система диагностики плазмы на основе подвижного зонда Ленгмюра
6.	Ерохин Николай Николаевич	Шварцбург А.Б., ИКИ	Резонансное туннелирование электромагнитных волн через слои плазмы с мелкомасштабными структурами плотности
7.	Жиляев Дмитрий Владимирович	Нестерович А.В., НИЯУ МИФИ	Плазменный эмиттер электронов на основе ВЧ-разряда в спиральном резонаторе с диэлектрической камерой
8.	Лосовский Александр Сергеевич	Наумов В.Г., ТРИНИТИ	Разработка физико-технических основ лазерно-плазменной технологии синтеза поликристаллических алмазных покрытий
9.	Наумов Виктор Владимирович	Прохорович Д.Е., НИЯУ МИФИ	Характеристики корпускулярной эмиссии из области разряда вакуумной искры
10.	Новиков Дмитрий Алексеевич	Курнаев В.А., НИЯУ МИФИ	Экспериментальное исследование плазменно-пылевых образований при криогенных температурах и их влияние на свойства положительного столба тлеющего разряда
11.	Орлов Игорь Евгеньевич	Ходаченко Г.В., НИЯУ МИФИ	Исследование параметров плазмы высокочастотного индукционного разряда низкого давления, возбуждаемого плоской электромагнитной антенной
12	Панов Андрей Игоревич	Алексеев А.Г., ТРИНИТИ	Расчет оптимальных параметров и тестирование прототипа болометра с тепловой обратной связью на токамаке Т-11М
13	Петров Дмитрий Сергеевич	Климов И.С., ТРИНИТИ	Эрозия металлов под воздействием потока плазмы, обусловленная движением расплавленного слоя
14	Полянский Михаил Сергеевич	Писарев А.А., НИЯУ МИФИ	Исследование эпитаксиального роста вискеров оксида вольфрама при физическом осаждении
15.	Светлов Евгений Владимирович	Зайцев В.И., ТРИНИТИ	Исследование рентгеновского излучения на сильноточных плазменных установках
16.	Симонян Георгий Эдуардович	Голубев А.А., ИТЭФ	Исследование плазмы сильноточного разряда для фокусировки ионного пучка

17.	Соколов Артем Юрьевич	Ходаченко Г.В., НИЯУ МИФИ	Исследование характеристик импульсного разряда в магнетроне с управляемым магнитным полем
18.	Ступников Алексей Андреевич	Афонин О.Н., ФИАН	Исследование параметров разряда в полом катоде для оптимизации спектроскопического метода диагностики микропинчей
19.	Филимонов Евгений Васильевич	Горшков А.В., РНЦ КИ	Разработка метода расчета температуры электронов плазмы по спектрам томсоновского рассеяния с помощью функции максимального правдоподобия и его апробация в экспериментах на установке токамак Т-10
Е11-04			
1.	Когут Дмитрий Константинович	Трифонов Н.Н., НИЯУ МИФИ	Моделирование взаимодействия частиц с морфологическими неоднородными поверхностями обращенными к плазме
2.	Маренков Евгений Дмитриевич	Писарев А.А., НИЯУ МИФИ	Проницаемость водорода через многослойные мембраны
3.	Полозова Татьяна Леонидовна	Пилипенко В.А., ИКИ	Пространственно-временная структура ионно-циклотронных волн в верхней ионосфере по наблюдениям на спутниках ST5
6.	Синельников Дмитрий Николаевич	Курнаев В.А., НИЯУ МИФИ	Холодная эмиссия заряженных частиц из газонасыщенных материалов термоядерных реакторов

В день защиты дипломов 21.02.2010. В первом ряду преподаватели (слева направо): А.С.Савелов, Г.С.Воронов, В.А.Курнаев, Н.Г.Ковальский (зам. председателя ГЭК), Б.А.Трубников, С.В. Мирнов, А.А. Писарев, Л.Б.Беграмбеков, Д.Л. Кирко

Летняя практика школьников

№	Фамилия И.О.	Лицей	Тема проекта	Руководитель
Т11-21				
1.	Бегрова Дарья	1511	Анализ возможных способов введения воды в имитационных установках	Визгалов И.В.
2.	Вихарев Андрей	1511	Изучение процессов формирования металлических слоёв наноразмерных толщин в плазме	Гордеев А.А.
3.	Давыдов Роман	1511	Численное моделирование движения электрона в магнитном поле	Маренков Е.Д.
4.	Демидов Дмитрий	1511	Исследование захвата водорода в углеродные пленки	Кузьмин А.А.
5.	Ерыгин Роман	1511	Численная модель термодесорбции изотопов водорода из вольфрама	Маренков Е.Д.
6.	Крючков Андрей	1511	Исследование термодесорбции дейтерия после ионного внедрения при малых дозах	Ефимов В.С. (Писарев А.А.)
7.	Левицкая Ирина	978	Изучение масс-спектров отрицательных ионов, входящих в состав токов низкополевой эмиссии	Синельников Д.Н.
8.	Малышева Анна	1511	Исследование распределения вещества катода (W), распылённого в магнетронном разряде дейтериевой плазмой	Гаспарян Ю.М.
9.	Мишин Александр	1511	Автоматизация установок с помощью среды LabView	Мамедов Н.В., Синельников Д.Н.
10.	Иванов Дмитрий	1511		
11.	Мухин Илья	1511	Изучение состава и топографии тонких напылённых металло-углеродных слоёв методами электронной спектроскопии и энерго-дисперсионного анализа	Шигин П.А.
12.	Пушкин Андрей	1511	Выбор технологического газа для работы стационарного магнетрона	Щелканов И.А.
13.	Столова Ольга	1511	Исследование параметров высоковольтных импульсов для инициирования микропинчевого разряда	Саранцев С.А.
14.	Токарев Дмитрий	1511	Спектры термодесорбции водорода из циркония с хромовым напылением	Садовский Я.А.
15.	Турков Илья	1511	Плазма, исследование плазмы, молнии	Крашевская Г.В.
16.	Федотова Анна	1511	Исследование роста кристаллитов оксида вольфрама в ходе химического осаждения из газовой фазы	Гаспарян Ю.М.
17.	Эль-Кажж Халиль	1511	Изучение процессов на поверхности графитов при их облучении электронами	Айрапетов А.А.

По окончании двухнедельной практики часть школьников продолжила работу на кафедре, после чего ребята с успехом представили доклады на различных конкурсах в начале 2011 года.

Федотова Анна – первое место на конкурсе «Юниор» (будет представлять Россию на конкурсе INTEL ISEF –мае 2011 в США), первое место на всероссийской олимпиаде «Нанотехнологии – прорыв в будущее!».

Малышева Анна - второе место на конкурсе «Потенциал», второе место на конкурсе «Юниор»,

Демидов Дмитрий - второе место на конкурсе «Юниор»

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

СПИСОК СОТРУДНИКОВ И АСПИРАНТОВ КАФЕДРЫ

Штатные преподаватели

Беграмбеков Л.Б.	*проф.*
Визгалов И.В.	*доцент*
Гаспарян Ю.М.	*доцент*
Гуторов К.М.	*ассистент*
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.	*профессор*
Салахутдинов Г.Х.	*доцент*
Трифонов Н.Н.	*доцент*
Цветков И.В.	*доцент*
Шигин П.А.	*доцент*

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.	*инженер*
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)*
Стрелков В.С.	*проф. (ИФТ НИЦ КИ)*
Трубников Б.А.	*проф. (ИФТ НИЦ КИ)*
Черковец В.Е.	*проф. (ТРИНИТИ)*

Научный сектор

Башутин О.А.	*н.с.*
Бердникова М.М.	*инж. 1 кат.*
Борисюк Ю.В.	*инж. 1 кат.*
Вайтонис В.В.	*м.н.с.*
Вергазов С.В.	*н.с.*
Вовченко Е.Д.	*с.н.с., к.ф.м.н.*
Вовченко Д.Е.	*инж. 1 кат.*
Гриднева Е.А.	*н.с., к.ф.м.н.*
Иванов И.В.	*инж.вед.*
Калачев А.М.	*м.н.с.*
Коборов Н.Н.	*м.н.с.*
Королев Л.В.	*Инж. 1 кат*
Перелыгин С.Ф.	*с.н.с,. к.ф.м.н.*
Политыко И.В	*Инж. 1 кат*
Смирнов В.М.	*в.н.с, к.ф.м.н*
Сотников В.М.	*с.н.с. к.ф.м.н.*
Урусов В.А.	*н.с.*
Ходаченко Г.В.	*с.н.с., к.ф.м.н.*
Шукшина Т.В.	*н.с.*
Голубева А.В.	*совм инж. к.ф.м.н.*
Кондаков В.В.	*совм инж. к.ф.м.н.*
Спицын А.В.	*совм, н.с., к.ф.м.н.*
Цвентух М.М.	*совм. к.ф.м.н.*
Сидорова О.Н.	*совм. к.ф.м.н.*
Фетисов И.К.	*с.н.с, к.ф.м.н.*

Учебно-вспомогательный персонал

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

Аспиранты

Айрапетов А.
Быков И.О.
Земченкова Н.А.
Калинникова Е.И.
Кузьмин А.А.
Мамедов Н.В.
Матвеев Д.И.
Мошкунов К.В.
Попова Е.А.
Садовский Я.
Русинов А.А.
Щелканов И.А.
Саранцев С.А.
Додулад Э.И.
Маркина Е.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ РАБОТ

Айрапетов А.А. 25
Аскинази Л.Г. 7
Атаманов М.В. 13
Афонин О.Н. 17
Баронова Е.О. 20
Башутин О.А. 18, 19, 20
Беграмбеков Л.Б. 22, 23, 25
Визгалов И.В. 9, 14, 17, 29
Власюк Н.В. 14
Вовченко Е.Д. 18, 19, 20
Воронов Г.С. 17
Гаспарян Ю.М. 21, 24, 26
Гуторов К.М. 9, 29
Додулад Э.И. 18, 19, 20
Евсин А.Е. 25
Егоров И.Д. 31
Ефимов В.С. 24
Жданов В.М. 5
Захаров А.М. 23
Земченкова Н.В. 10, 15
Зибров М.С. 21
Иванов Д.В. 27, 30
Казиев А.В. 11, 12
Каплевский А.С. 23
Когут Д.К. 8
Крат С.А. 21
Крашевская Г.В. 16
Крашенинников С.И. 5, 6
Кузьмин А.А. 22
Курнаев В.А. 8, 16, 17, 27, 28, 30, 32
Левицкая И.С. 27
Макаров А.А. 22
Мамедов Н.В. 27, 30
Маренков Е.Д. 6
Маркин А.И. 28
Миликян К.А. 30
Мисожников Л.В. 13
Николаева В.Е. 7
Очкин В.Н. 17
Пигаров А.Ю. 6
Писарев А.А. 6, 13, 21, 24, 26
Подоляко Ф.С. 29
Раевский И.Ф. 20
Русинов А.А 26
Савёлов А.С. 18, 19, 20
Садовский Я.А. 22, 23
Салахутдинов Г.Х. 16
Саранцев С.А. 18, 19, 20
Синельников Д.Н. 27, 28, 30
Смирнов Р.Д. 5
Сорокин И.А. 29
Степаненко А.А. 5
Степаненко А.М. 20
Сыромятников Н. 28
Трифонов Н.Н. 8
Трубников Б.А. 36
Трубникова О.Б. 36
Урусов В.А. 17
Ходаченко Г.В. 11, 12, 13
Цвентух М.М. 16
Цветков И.В. 6
Шигин П.А. 22, 23
Щелканов И.А. 11, 12
Юркевич Ю.М. 13
Ярко С.С. 26

Подчеркнуты фамилии студентов

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

13 конференция-семинар
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Четверг, 28 января **Начало в 10.00**

Аудитория 33-103
(Кафедра физики плазмы первый этаж)

Председатель – профессор БЕГРАМБЕКОВ Л.Б.

10.00 – 10.20	ПОЗНЯК И.М.[1] , КЛИМОВ Н.С.[1], ПЕТРОВ Д.С.[2] *[1]ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Московская обл.* *[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Эрозия материалов под воздействием интенсивных интенсивных потоков плазмы**
10.15 – 10.30	БЕРЕЗИНА И.Е., ЦВЕТКОВ И.В. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Влияние наклона магнитного поля и параметров пристеночной плазмы на электронную эмиссию с поверхности первой стенки термоядерного реактора**
10.30 – 10.50	АФАНАСЬЕВ В.П., БАТРАКОВ А.А., ЛУБЕНЧЕНКО А.В. *Московский энергетический институт (технический университет)* **Послойный анализ изотопов водорода на основе спектроскопии отраженных электронов**
10.50 – 11.05	АЙРАПЕТОВ А.А., БЕГРАМБЕКОВ Л.Б., ЕВСИН А.Е., КРАТ С.А. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Захват водорода в графит при электронном облучении**
11.05 – 11.20	БЕГРАМБЕКОВ Л.Б., ГОРДЕЕВ А.А., МАКАРОВ А.А. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Осаждение двухкомпонентных металлических слоев при повышенных температурах**
11.20 – 11.35	БЕГРАМБЕКОВ Л.Б., КАПЛЕВСКИЙ А.С., ШИГИН П.А., САДОВСКИЙ Я.А. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **О разделении сигналов дейтерия и гелия при проведении термодесорбционного анализа**
11.35 – 11.55	Перерыв на кофе
11.55 – 12.10	МАРЕНКОВ Е.Д., ЦВЕТКОВ И.В., ПИСАРЕВ А.А. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,* **Проницаемость водорода через многослойные мембраны**
12.10 – 12.30	ВОЛКОВ Н.В., БАДАЕВ Е.Н., САБО С.Е. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Влияние температуры облучения на Радиационную эрозию конструкционных материалов при воздействии пучков ионов He+ и Ar+ с широким энерегетическим спектром**
12.30 – 12.45	БЕЗУГЛЫЙ В.В., ЦВЕТКОВ И.В. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Зависимость параметров потоков рециклинга от характеристик пристеночной плазмы и наклона магнитного поля**
12.45 – 13.00	КУРНАЕВ В. А., СИНЕЛЬНИКОВ Д. Н., ТАТАРИНОВА Н. В. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Эмиссия заряженных частиц из газонасыщенных материалов**

13.00 – 13.15	БУРЛАКА В.И., ГАСПАРЯН Ю.М., РУСИНОВ А.А., ПИСАРЕВ А.А. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Влияние состояния поверхности на захват дейтерия в графит мпг-8 при облучении в плазме магнетронного разряда**
13.15 – 13.30	ПИСАРЕВ А.А, ГАСПАРЯН Ю.М, РУСИНОВ А.А, ТРИФОНОВ Н.Н, СПИЦЫН А.А, ХРИПУНОВ Б.А, SCHWARZ-SELINGER T. , RASINSKI M. , SUGIYAMA K. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* *Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* *Max-Planck-Institut für Plasmaphysics, Garching, Germany* **Термодесоорбция дейтерия из углеродных материалов: сравнение облучения в плазме, ионного внедрения, адсобции из газа и осажденных C-D пленок.**

Заседание №2

Пятница, 29 января начало в 10.00

Аудитория **Б-304**

(Главный корпус – Большая химическая аудитория, направо от входа в главный корпус прямо до конца коридора 3 этаж)

Председатель – профессор КУРНАЕВ В.А.

10.10-10. 40	КУРНАЕВ В.А. *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* **Итоги ITPA DIV SOL-13 и заседания программного комитета конференции PSI2010.**
10.40-11.10	МИРНОВ С.В. *ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Московская обл.* **Итоги январского совещания по литию в Японии**
11.10.-11.30	КЛИМОВ Н.С.,[1] ПЕСЧАНЫЙ С. Е.[1], ПОДКОВЫРОВ В. Л.[1], ЖИТЛУХИН А. М.[1], КОВАЛЕНКО Д. В.[1], ХИМЧЕНКО Л.Н.[2] *[1]ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Московская обл.* *[2]Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* **Эрозия защитных покрытий дивертора ИТЭР при нагрузках, соответствующих переходным плазменным процессам**
11.30-11.50	Перерыв на кофе
11.50 - 12.10	КУТЕЕВ Б.В. *Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* **«Пылевые» технологии для реакторов с магнитным удержанием.**
12.10-12.30	БЕГРАМБЕКОВ Л.Б.,[1] ШИГИН П.А.,[1] ЗАХАРОВ А.М.,[1] БУЖИНСКИЙ О.И.,[2] ОТРОЩЕНКО В.[2] *[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* *[2]ФГУП ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Московская обл.* **О защите обращенных к плазме элементов возобновляемыми покрытиями из карбида бора.**
12.30-12.50	ХРИПУНОВ Б.И. *Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* **Эрозия и захват дейтерия в вольфрам, облученный высокоэнергетичными альфа-частицами.**

12.50 13.10	БУДАЕВ В. П. *Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* **Осаждение фрактальных пленок в термоядерных установках.**
13.10- 14.00	Перерыв на обед
14.00- 14.20	КОЛБАСОВ Б.Н. *Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* **Проблемы ИТЭР**
14.20- 14.40	АЙРАПЕТОВ А.А,[1] БЕГРАМБЕКОВ Л.Б.[1], БРЕМОНТ С.[2] ДОУАЙ Д.[2], КУЗЬМИН А.А[1], САДОВСКИЙ Я.А[1], ШИГИН П.А.[1], ВЕРГАЗОВ С.А.[1] [1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* [2]*CEA/IRFM, Cadarache, France* **Очистка в тлеющем разряде СС-композита и нержавеющей стали**
14.40- 15.00	ГОЛУБЕВА А.В.,[1] СПИЦЫН А.В.,[1] СКОВОРОДА А.А.,[1] ЧЕРКЕЗ Д.,[2] МАЕР М.,[3] ШВЕРЦ-ЗЕЛИНГЕР Т.[3] [1]*Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* [2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»* [3]*Max-Planck-Institut für Plasmaphysics, Garching, Germany* **Проницаемость изотопов водорода через графиты с покрытиями.**
15.00- 15.20	СПИЦЫН А.В.,СКОВОРОДА А.А., ГУРЕЕВ И.М., ЗУБАРЕВ И.Ф., ВЕРШКОВ И.А. *Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва* **Моделирование поведения Li в токамаке Т-10.**
15.20- 15.40	Перерыв на кофе
15.40- 16.00	ЗАЛАВУТДИНОВ Р.Х.,[1] ГОРОДЕЦКИЙ А.Е.,[1] БУХОВЕЦ В.Л.,[1] ЗАХАРОВ А.П.,[1] МАЗУЛЬ И.В.,[2] [1]*Институт физической химии и электрохимии РАН, Москва* [2]*НИИ электрофизической аппаратуры, Санкт-Петербург* **Эрозия a-C:H пленок, осажденных на W, Mo и SS, в тлеющем разряде в воздухе.**
16.00- 16.20	АРХИПОВ И.И., ГОРОДЕЦКИЙ А.Е., ЗАЛАВУТДИНОВ Р.Х. *Институт физической химии и электрохимии РАН, Москва* **Технология плазменной очистки оптических элементов в ИТЭР.**
16.20- 17.20	Дискуссия
17.30 - 20.00	Welcome together (103, корпус 33. кафедра физики плазмы,

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ПРОГРАММА VII РОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Вторник, 30 ноября Начало в 10.00

ВРЕМЯ	ДОКЛАД
10:00	**ОТКРЫТИЕ**
10:20	**И.Большакова, И.Васильевский, Л.Виерербл, Р.Голяка, И.Дюран, В. Ерашок, Р. Коноплёва, Я. Кость, С.Куликов, В.Курнаев, К. Лерой, Е. Макидо, В. Чеканов, Ф. Шурыгин** МАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА ТОКАМАКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ.
10:50	**Е.П.Горбунов, А.А.Петров, В.Г.Петров, Д.С.Сергеев, Ю.В.Скосырев.** ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕФРАКТОМЕТРА 150 ГГц ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ-10
11:10	**А.А.Белокуров, Л.Г.Аскинази** ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М С ПОМОЩЬЮ HIBP МЕТОДОМ ДВУХТОЧЕЧНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
11:30	Перерыв на кофе
11:50	**С.Е.Кривицкий, К.Ю.Вуколов, Т.Р.Мухаммедзянов, А.Ю.Таранченко** МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДИАГНОСТИК ТОКАМАКА ИТЭР
12:10	**Г.С.Воронов, М.С.Бережецкий** ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА Л-2М
12:30	**А.М.Бишаев, А.И.Бугрова, И.С.Гордеев, А.И.Денисюк, М.В.Козинцева, А.С.Липатов, А.С.Сигов, И.А.Тарелкин, В.А.Терехов** ПОЯС РОГОВСКОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМАГНИТНОГО ТОКА В МУЛЬТИПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ–ГАЛАТЕЕ ТРИМИКС -3М
12:50	**Ю.В.Ковтун, А.И.Скибенко, Е.И.Скибенко, Ю.В.Ларин, В.Б.Юферов** ДВУХЧАСТОТНАЯ СВЧ-ФЛУКТУАЦИОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ
13:10	Перерыв на обед
14:10	**И.И.Орловский** СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС РАБОТ ПО ПРОБЛЕМЕ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИК H-ALPHA И CXRS
14:40	**Ю.Ю.Луценко, В.А.Власов, Е.П.Зеленецкая** ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА НА ЕГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
15:00	**И.Ш.Абдуллин, М.Ф.Шаехов, А.А.Хубатхузин, Р.Ф.Шарафеев** ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ТЕМПЕРАТУРУ ОБРАЗЦА В ПОТОКЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ
15:20	**И.Ш.Абдуллин, А.Н.Быканов, И.Г.Гафаров, О.Е.Ибрагимов** СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ РАЗРЯДОВ
15:40	Перерыв на кофе

16:00	**А.М.Астафьев** ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА С ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ПРИ ТОКЕ ПОРЯДКА ДЕСЯТКОВ АМПЕР (ГАТЧИНСКИЙ РАЗРЯД)
16:20	**Е.А.Елистратов, А.П.Кузнецов, С.П.Масленников, А.А.Протасов** ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ
16:40	**Л.А.Луценко, А.В.Ильницкая, А.М.Егорова, И.В.Березняк** СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО АЭРОЗОЛЯ
17:00	**Д.В.Мозгрин, Т.В.Степанова, В.И.Тройнов, Г.В.Ходаченко, А.В.Шумов, И.А.Щелканов** ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

Среда, 1 декабря **Начало в 10.00**

ВРЕМЯ	ДОКЛАД
10:00	**O.F.Petrov, V.E.Fortov** DUSTY PLASMA LIQUID AS A STRONGLY COUPLED COULOMB SYSTEM: DIAGNOSTICS AND RESULTS
10:30	**А.В.Бульба** ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ 3D РЕКОНСТРУКЦИИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР
10:50	**М.Ю.Пустыльник, Л.Ху, А.В.Ивлев, Х.М.Томас, Г.Е.Морфилл, Л.М.Василяк, В.Е.Фортов** ВОЗМУЩЕНИЕ ЕМКОСТНОГО ВЧ-РАЗРЯДА ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСОМ
11:10	**А.А.Пискунов, С.Ф.Подрядчиков, А.Д.Хахаев** МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ МАКРОЧАСТИЦ В УПОРЯДОЧЕННЫХ СТРУКТУРАХ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ
11:30	Перерыв на кофе
11:50	**В.А.Власов, В.Ф.Мышкин, Д.Л.Гамов, И.А.Ушаков, А.В.Еремин, В.А.Борисов** ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДА
12:10	**С.Л.Шалимов** ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НАД СПРАЙТАМИ НА СДВ-ТРАССАХ
12:30	**Е.Е.Тимофеев, С.Л.Шалимов ,М.К.Валлинкоски, Й.Кангас** О ПРИРОДЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ АНОМАЛИИ ПЛАЗМЫ ДИНАМО СЛОЯ АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ
12:50	**Ю.Д.Котов, А.В.Кочемасов, А.С.Гляненко, В.Н.Юров, А.И.Архангельский** СПУТНИКОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ФОКА» ПО РЕГИСТРАЦИИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ
13:10	Перерыв на обед
14:10	**M. Zlobinski, V. Philipps, A. Huber, B. Schweer, the TEXTOR Team et al. Laser Induced** DESORPTION AS TRITIUM RETENTION DIAGNOSTIC METHOD. *STATUS & PLANS FOR EXPERIMENT AND THEORY*
14:40	**М.Матвеева, А.Литновский, L.Marot, B.Eren, V.Philipps, A.Pospieszczyk, H. Stoschus, Д.Матвеев, U.Samm** ЭРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ РЕАКТОРА ITER

15:00	**С.Б.Заякина, Г.Н.Аношин** СОВРЕМЕННЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ(КРАТКИЙ ОБЗОР К 150-ЛЕТИЮ МЕТОДА)
15:20	**С.Б.Заякина , Г.Н.Аношин, В.А.Лабусов, А.Н.Путьмаков, А.Ф.Веряскин** АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСПЕРСНЫХ ПРОБ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
15:40	Перерыв на кофе
16:00	**А.В.Дунаев, С.А.Пивоваренок, С.П.Капинос, А.М.Ефремов, В.И.Светцов** СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ТРАВЛЕНИЯ GaAs В ПЛАЗМЕ HCl
16:20	**Д.В.Ситанов, М.Ю.Ивентичев, В.И.Светцов** ПРИМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ РЕКОМБИНАЦИИ АТОМОВ В ПЛАЗМЕ ХЛОРА НА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ
16:40	**А.П.Кузнецов, А.С.Савёлов, О.А.Бялковский, С.А.Саранцев, И.Ф.Раевский** ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДАМИ ТЕНЕВОГО ФОТОГРА-ФИРОВАНИЯ
17:00	**О.А.Башутин, Е.Д.Вовченко, Э.И.Додулад, С.А.Саранцев** МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ОБСКУРОГРАММ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ ПЗС КАМЕРЫ

Четверг, 2 декабря **Начало в 10.00**

ВРЕМЯ	ДОКЛАД
10:00	**И.Ю.Скобелев, А.Я.Фаенов, Т.А.Пикуз** СПЕКТРЫ МНОГОЗАРЯДНЫХ ПОЛЫХ ИОНОВ В РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ СВЕРХПЛОТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
10:30	**А.Н.Митрофанов, А.Я.Фаенов, А.В.Виноградов, Т.А.Пикуз** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ, СПЕКТРАЛЬНЫХ И КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВ ПУЧКА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ЗА ОДНО ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ
10:50	**В.К.Гончаров, К.В.Козадаев, Д.В.Щегрикович** ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОИНДУЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ФАКЕЛОВ МЕТАЛЛОВ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ
11:10	**В.А.Бураков, М.В.Осипов, В.Н.Пузырев, А.Н.Стародуб, О.Ф.Якушев** ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
11:30	**Ю.Л.Бакшаев, С.А.Данько, Е.Е.Соколов, К.В.Чукбар** ИМПУЛЬСНЫЙ БОЛОМЕТР В ИЗМЕРЕНИЯХ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИЛЬНОТОЧНОМ Х-ПИНЧЕ.
11:50	**О.А.Бялковский, Р.О.Гаврилин, А.А.Голубев, К.Л.Губский, А.П.Кузнецов, В.И.Туртиков, А.В.Худомясов, А.Д. Фертман** ДВУХВОЛНОВЫЙ КВАДРАТУРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ТОРМОЖЕНИЮ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ИОНИЗОВАННОМ ВЕЩЕСТВЕ
12:10	Перерыв на кофе
12:30	**СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ**
13:30	**ЗАКРЫТИЕ**

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ
Е.Е.Тимофеев, С.Л.Шалимов, О.Г.Чхетиани, М.К.Валлинкоски, Й.Кангас ТЕПЛОВЫЕ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЫ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭКМАНОВСКОГО ТИПА
Э.И.Додулад, А.П.Кузнецов, С.А.Саранцев ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ НА ДИНАМИКУ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ НА УСТАНОВКЕ «ПИОН»
Д.Л.Кирко, А.С.Савелов, Э.И.Додулад ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОИНДУКТИВНОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ
Е.Д.Вовченко, К.И.Козловский, А.В.Самарин, А.С.Цыбин, А.Е.Шиканов ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ РАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЫ С ПОЛЫМ КАТОДОМ И ИНЕРЦИОННО-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УДЕРЖАНИЕМ ИОНОВ
А.М.Жукешов, А.У.Амренова, А.Т.Габдуллина, Т.Е.Нурланбаев ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ В КОАКСИАЛЬНОМ УСКОРИТЕЛЕ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ПОТОКОМ
А.С.Савелов, Г.Х.Салахутдинов МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО РЕНТГЕ-НОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИ-ЧЕСКОГО РАЗРЯДА
С.Б.Заякина, Г.Н.Аношин, В.Г.Гаранин, В.А.Лабусов, А.Н.Путьмаков КИНЕТИЧЕСКОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И РУДАХ
Д.А.Жестилевский, С.А.Румянцев, С.А.Соломатин, Н.М.Сухов, З.И.Мошнина, Е.Д.Вовченко, А.С.Савёлов, М.В. Мошнин ЛАЗЕРНАЯ ПУФА-ТЕРАПИЯ. ОБРАЗОВАНИЕ СШИВОК ДНК ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АЗОТНОГО ЛАЗЕРА В ПРИСУТСТВИИ 8-МОП
В.Ф.Туганов ИНТЕГРАЛЫ СТОЛКНОВЕНИЙ В ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ПО ПОЛЮ КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЯХ: РЕГУЛЯРНЫЙ МЕТОД ИХ НАХОЖДЕНИЯ ИЛИ «ВТОРИЧНАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ» НУЛЕВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ
В.Ф.Туганов ИНТЕГРАЛ СТОЛКНОВЕНИЙ ЛОРЕНЦЕВОЙ ПЛАЗМЫ И ЭФФЕКТ КРАМЕРСА-ГИНЗБУРГА
И.А.Бориев КВАНТОВО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ОСОБЕННОСТЬ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНА НА АТОМЕ: ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИЧИНЫ ЭФФЕКТА РАМЗАУЭРА И СИЛЬНОГО РОСТА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ ПРИ ИХ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР
КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2010 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Оригинал-макет подготовлен Золотовской С.В.

Подписано в печать 01.06.11	Формат 60×84 1/8	
Уч.-изд. 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