

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР

КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

ЗА 2009 ГОД

Москва 2010

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2009 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Москва 2010

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2009 г. / Под ред. В.А. Курнаева. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. - 40 с.

Отчет кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ за 2009 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 также краткие обзоры из области управления и организации НИР, подготовленные с участием одного из сотрудников-совместителей кафедры. Приведены также сведения о составе кафедры, работах, опубликованных в журналах и доложенных на конференциях в 2009 году, перечень защищенных на кафедре дипломных работ и диссертаций. В приложениях дается также краткая информация о проведенных с участием кафедры в 2009 научных конференциях и семинарах.

This annual report of the Plasma Physics Department (PPD) of National Research Nuclear University MEPHI for 2009 represents main results of theoretical, numerical, experimental and technological investigations obtained by faculty and scientific stuff as well as by students in 2009. 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 reviews in the field of management of research work presented by one of Department members in 2009. The list of faculty and scientific stuff as well as the list of the publications and scientific presentations, list of master thesis's defended and books for students issued in 2009 are given. The short information on conferences held by Department in 2009 is also presented.

Редакционная коллегия	l	
Председатель	-	Курнаев В.А.
Зам. председателя	-	Писарев А.А.
Научный секретарь	-	Гаспарян Ю.М.

ISBN 978-5-7262-1318-7

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В.М. ЖДАНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО Уравнения переноса для частично ионизованной пристеночной плазмы токамака. Гидродинамическое приближение	5
Г.В. КРАШЕВСКАЯ, М.М. ЦВЕНТУХ Сильно непараксиальные магнитные ловушки на основе диполя	6
М.М. ЦВЕНТУХ	-
Применение внутренних витков в длинных гофрированных системах И.Е. БЕРЕЗИНА, И.В. ЦВЕТКОВ	1
Влияние наклонного магнитного поля на электронную эмиссию с поверхности первой стенки термоядерного реактора	8
И.В. ЦВЕТКОВ, А.А. ПИСАРЕВ, Е.Д. МАРЕНКОВ Динамика проницаемости водорода через многослойные мембраны	9
2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ	
<u>Η Β. ΒΗ3ΓΑ ΠΟΒ. Κ.Μ. ΓΥΤΟΡΟΒ</u>	
Формирование высоковольтных импульсов в автоколебательном разряде А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ	10
О влиянии условий инициирования на динамику плазмы вакуумной искры А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОЛАЧЕНКО, И.А. ШЕЛКАНОВ	11
Исследование характеристик импульсного разряда в новом магнетроне с управляемым магнитным полем	12
А.В. КАЗИЕВ, Г.В. КРАШЕВСКАЯ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ	
Энергетического распределения ионов в плазме высокочастотного разряда А.В. КАЗИЕВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ	13
Исследование энергетического распределения ионов в плазме сильноточного импульсного	14
магнетронного разряда Г.В. КРАШЕВСКАЯ, И.Е. ОРЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ Исследование характеристик импульсного разряда в новом магнетроне с управляемым магнитным полем	15
3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ	
О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, Э.И. ДОДУЛАД, А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ Методика регистрации рентгеновских обскурограмм микропинчевого разряда на установке «ЗОНА-2» Д.А. ЖЕСТИЛЕВСКИЙ, С.А. РУМЯНЦЕВ, С.А. СОЛОМАТИН, Н.М.СУХОВ,	16
Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.С. САВЕЛОВ, М.В. МОШНИН Образование сшивок ДНК под действием ультрафиолетового излучения азотного лазера в	17
О.А. БЯЛКОВСКИЙ, А.П. КУЗНЕЦОВ, А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ Исследование плотности плазмы триггерного поджига с помощью гомодинного квадратурного интерферометра на установке «ПИОН»	18
А.П. КУЗНЕЦОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, И.Ф. РАЕВСКИЙ, А.С. САВЁЛОВ, С.А САРАНЦЕВ Визуализация процессов плазмообразования в эрозионном капиллярном разряде с применением усилителя яркости на основе лазера на парах меди	19
4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ	
М.С. ПОЛЯНСКИЙ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН,	
А.А. ПИСАРЕВ, С.Л. КАНАШЕНКО Исследование эпитаксиального роста вискеров оксида(vi) вольфрама при физическом осаждении	20
В.И. БУРЛАКА, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, А.А. РУСИНОВ, С.А. КРАТ Захват дейтерия в углеродные пленки, растущие при облучении дейтериевой плазмой	21
2	

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КУЗНЕЦОВ, П.А. ШИГИН	
Зависимость захвата водорода в углеродные слои от материала и температуры подложки Л.Б БЕГРАМБЕКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, А.А МАКАРОВ	22
Осаждение двухкомпонентных металлических слоев в плазме при повышенных температурах Л.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.А. КУРНАЕВ	23
Холодная эмиссия заряженных частиц из газонасыщенного графита	24
Диссоциация молекулярных ионов водорода при отражении от вольфрама	25
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ	
 В. И. БУРЛАКА, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, А.А. РУСИНОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ, С.Ф. ПЕРЕЛЫГИН Установка магнетронного типа для изучения процессов взаимодействия плазмы с поверхностью и ионного внедрения 	26
6. ОБЗОРЫ	
 А.В. ХЛУНОВ, А.В. НАУМОВ, В.Ф. ФЕДОРКОВ, С.Ф. ОСТАПЮК, А.А. ШМАКОВ, В.В. КОНДАКОВ, Л.И. БУГАЙЧЕНКО, О.Д. АНАШИНА, А.Г. САВЧЕНКО О реализации программы развития наноиндустрии в российской федерации до 2015 года С.Ф. ОСТАПЮК, А.А. ШМАКОВ, В.В. КОНДАКОВ, О.Д. АНАШИНА, О.С. НАРАЙКИН, М.В. ПОПОВ 	27
О критериях отнесения продукции к категории «продукция наноиндустрии»	29
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Перечень трудов кафедры за 2009 год Дипломные проекты, защищенные студентами кафедры в 2009 году с присвоением	31
квалификации инженер-физик, защищенные диссертации Список сотрудников и аспирантов кафедры Именной указатель авторов работ	34 36 37

1. ТЕОРИЯ ПЛАЗМЫ

УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ДЛЯ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

В.М. ЖДАНОВ, А.А. СТЕПАНЕНКО

В работе [1] было отмечено заметное влияние ион-атомных и атом-атомных столкновений на процессы переноса частиц и тепла в области диверторных пластин в пристеночной плазме современных токамаков. Наличие нейтральных частиц, возникающих в процессах рекомбинации плазмы в пристеночной области и в результате взаимодействия ионов со стенкой, оказывается существенным в плотной диверторной плазме ИТЭР при концентрации плазмы и нейтральных частиц ~ $10^{21} - 10^{22}$ м⁻³. Характерная средняя длина свободного пробега нейтральных атомов λ при $n_a \sim 10^{21}$ составляет величину порядка нескольких миллиметров, что при размерах дивертора ИТЭР порядка 50 см соответствует числу Кнудсена λ/L ~0,01. Это позволяет при описании процессов переноса в такой плазме использовать гидродинамическое приближение. Упрощенные системы уравнений переноса (уравнений непрерывности, движения и энергии), записываемые для плазмы в целом и отдельно для нейтральной компоненты в гидродинамическом (навье-стоксовском) приближении рассматривались в [1,2]. При этом учитывался вклад ионизации и рекомбинации в уравнениях сохранения частиц и импульса, а также влияние резонансной переноса пренебрегалось ролью кулоновских столкновений частиц, отсутствовал учет термосилы в уравнениях движения частиц и термодиффузионного вклада в выражениях для потока тепла.

В настоящей работе получена полная система уравнений переноса в многокомпонентной частично ионизованной плазме с использованием 21-моментного приближения метода Грэда [3], обеспечивающего более высокую точность расчета кинетических коэффициентов и позволяющего учесть вклад термосилы и термодиффузии при наличии градиентов температуры. Это приближение уже успешно использовалось при анализе процессов переноса в токамаке для полностью ионизованной многокомпонентной плазмы с примесями [4]. Для применения в конкретных расчетах параметров диверторной плазмы в токамаке система уравнений переноса с учетом вклада нейтральных атомов записывается, как и в работах [1,2], в декартовой системе координат (x,y,z), где x соответствует полоидальному направлению, y - радиальной координате и z выбрано в качестве тороидального направления. Предложенная система уравнений может быть использована для модернизации кода UEDGE [2], применяющего гидродинамические модели расчета и для сравнения с результатами расчетов на основе кода EIRENE [5], где учет влияния нейтральных частиц производится с помощью метода Монте-Карло.

- 1. D.A. Knoll, P.R. McHuge, S.I. Krasheninnicov, D.J. Sigmar, Contr.Plasma Phys.,1996, v.36, №2/3, 328-332 ; Phys Plasma,, 1997, v.3 (1), 293-303
- 2. T.D. Roglien, B.J. Braams, D.A. Knoll, Contr.Plasma Phys., 1996, v.36, №2/3, 105-116;
- 3. В.М. Жданов, Процессы переноса в многокомпонентной плазме, М.: Физматлит, 2009
- A. Bergman, Yu. Igithanov, B. Braams, D.P. Coter, R. Shneider, Contr. Plasma Phys., 1996, v.36 №2/3, 192-196
- 5. D.J. Reiter, Nucl. Mat., 1992, v.196-198, 80-95

СИЛЬНО НЕПАРАКСИАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ НА ОСНОВЕ ДИПОЛЯ

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, М.М. ЦВЕНТУХ

Сильно непараксиальные магнитные ловушки – с большой кривизной силовых линий, позволяют стационарно удерживать плазму в "естественной" геометрии магнитного поля при высоких β и большом перепаде давления. Интерес к таким конфигурациям продиктован разработкой реактора на перспективных топливных циклах D-D и D-³He [1], а также поиском наиболее оптимального термоядерного источника нейтронов в гибридном реакторе "синтез-деление" [2,3]. В работе кратко приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований, проведенных на компактной двухдипольной ловушке Магнетор [4-9].

Обнаружено, что эффект сжимаемости позволяет удерживать плазму со значительными градиентами давления. При этом экспериментально обнаружена высокая степень локализации плазмы. Экспериментальное распределение давления фоновой плазмы (ее плотности) близко к $p_0 \cdot (\int dl/B)^1$ =const. Энергетический спектр тормозного излучения показал наличие быстрых электронов, эффективно нагревающихся в ЭЦР до энергий более 20 кэВ.

Установлено, что необходимый и достаточный бесстолкновительный кинетический критерий (Крускала-Обермана) дает гораздо более благоприятные параметры удержания с позиции и локализации плазмы и равновесия, чем простая МГД-модель [7].

Сравнение измеренного и рассчитанного распределения давления плазмы показало, что возможно удержание значительного давления плазмы в центральных областях в быстрых ЭЦР электронах. Максимальная величина в центре экспериментальной установки Магнетор может достигать ~10²⁰–10²¹ эВ/м³ (локальное бета – до ~30%) [6,7]. Подобная величина давления сравнима с получаемыми на крупнейших современных открытых ловушках.

Предложена новая многосвязная конфигурация, основанная на (замкнутой) многопробочной цепочке ловушек с диверторами и внутренними токовыми кольцами. Обнаружено, что эффект знакопеременной кривизны приводит к формированию резкого радиального пьедестала давления внутри объема удержания подобных многосвязных конфигураций [8].

Работа поддержана Президентским грантом МК-4357.2009.2.

- 1. J. Kesner, D. T. Garnier, A. Hansen, et al., Nucl. Fusion 44, 193 (2004).
- Алексеев П.Н. и др., 36-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. Звенигород 9-13 февраля. Москва 2009. С.21.
- Аникеев А.В. и др., 36-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. Звенигород 9-13 февраля. Москва 2009. С.39.
- 4. Бердникова М.М. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1 22 (2003); Вовченко Д.Е. и др., ibidem, 4, 68 (2006).
- 5. Krashevskaya G.V., et al., Proc. 28th ICPIG, Prague, 2007, p. 393.
- 6. Galina V Krashevskaya, et al., Plasma Confinement in a Compact Double-Dipole Magnetic Trap, *Submitted to* Plasma Physics and Controlled Fusion 2010.
- 7. Цвентух М.М. // Физика плазмы. 2010. Т.36 №9 С.499.
- 8. Цвентух М.М. // Физика плазмы. 2009. Т.35. №4 С.381.

ПРИМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ВИТКОВ В ДЛИННЫХ ГОФРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

М.М. ЦВЕНТУХ

Предложена новая многосвязная магнитная конфигурация в виде замкнутой гофрированной ловушки типа ДРАКОН или EPSILON, в которой предлагается применить дополнительную ячейку-пробкотрон с внутренним витком с током противоположного направления [1]. Из-за появления нулей поля в центре ячейки у оси возникает средняя магнитная яма (min *B*), позволяющая существенно повысить давление плазмы в центральных областях. Внешние области вне этой ямы можно стабилизировать дивертором при плавном спаде давления.

В предложенной конфигурации обнаружен радиальный пик (разрыв) на конвективно-устойчивом профиле давления, рассчитываемом согласно бесстолкновительному кинетическому критерию (Крускала-Обермана), отсутствующий при МГД описании. Он расположен у границы средней магнитной ямы grad $U \rightarrow 0$ в слое силовых линий со слабой знакопеременной кривизной. Его практическое значение заключается в возможности формирования у границы средней ямы радиального пьедестала давления, который позволяет иметь еще больший перепад давления между центром и периферией. В проведенных расчетах суммарный перепад давления от центра до периферии ловушки p_{inn}/p_{perif} составил ~ 10^4 - 10^5 . При этом влияние дивертора незначительно. Стоит подчеркнуть, что речь идет о длинной *замкнутой* (гофрированной) ловушке. В расчетах рассматривался левитирующий виток, однако, такую же конфигурацию можно создать и при генерации плазменного тока. В этом случае в ячейках с "плазменным витком" требуется иметь локальное $\beta >>1$.



Рис. 1. Слева – силовые линии в гофрированном торе с двумя диверторами и двумя ячейками с внутренними витками (в экваториальном сечении x-y) (четверть тора). Справа – профили давления в радиальном сечении гофрированного тора, построенные по лучу через дивертор. Профиль давления в магнитной яме ($\nabla_p \nabla U < 0$) (1) сопряжен с конвективно-устойчивыми профилями вне ямы ($\nabla_p \nabla U > 0$) – 2 и 3, рассчитанными согласно МГД (2) и кинетическому (3) описанию для G=1). 4 – U(r). 5 – МГД профиль в базовой конфигурации без внутренних витков

Литература

1. Цвентух М.М. // Физика плазмы. 2009. Т.35. №4 С.381.

ВЛИЯНИЕ НАКЛОННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ ЭМИССИЮ С ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

И.Е. БЕРЕЗИНА, И.В. ЦВЕТКОВ

Представлены результаты расчетного исследования влияния наклонного магнитного поля на энергетическое и угловое распределения электронов, достигающих поверхности первой стенки ТЯР. Показана необходимость учета зависимостей средней энергии и среднего угла падения электронов на стенку от угла наклона магнитного поля при расчете коэффициента и интенсивности вторичной электронной эмиссии.

Была поставлена задача исследования зависимости средних характеристик потока электронов, достигающих стенки, от величины угла наклона магнитного поля. На рисунке 1 показаны результаты расчета энергетического распределения падающих на стенку электронов, имеющих на границе плазмы максвелловское распределение. Распределения приведены для различных углов наклона магнитного поля α и напряженности $H = 5 \cdot 10^4$ Э. Распределения нормированы на число вылетевших из плазмы электронов. Видно, что при увеличении α число долетающих до поверхности электронов существенно уменьшается, а средняя энергия электронов, достигающих стенки, увеличивается.



Рис.1. Энергетические распределения доля электронов, долетевших до стенки с данной энергией от числа вылетевших из плазмы электронов при различных углах наклона магнитного поля а. W – энергия долетевших до стенки электронов в эВ.



Рис.2. Зависимости коэффициентов истинной электрон-электронной эмиссии бе, отражения пе, суммарного коэффициента вторичной электронной эмиссии үе и числа вторичных электронов Ne от угла наклона магнитного поля а.

В работе исследовалось влияние угла наклона магнитного поля на коэффициент вторичной эмиссии. Коэффициент вторичной эмиссии зависит от энергии и угла падения электронов из плазмы. Эти характеристики, как было показано раннее, зависят от угла наклона магнитного поля. Поэтому, используя известные формулы зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии и угла падения электронов на стенку [1-4], можно оценить влияние магнитного поля на коэффициент вторичной электрон-электронной эмиссии. Для расчетов в качестве материала стенки был выбран вольфрам. Из рисунка 2 видно, что с увеличением угла наклона магнитного поля суммарный коэффициент вторичной электронной эмиссии возрастает. В то же время, вследствие подавления наклонным магнитным полем потока электронов к стенке число вторичных электронов с увеличением угла наклона магнитного поля уменьшается. Полученные зависимости указывают на необходимость учета наклона магнитного поля при расчете самосогласованного распределения потенциала в пристеночном слое, зависящего как от плотности потока приходящих электронов, так и плотности потока уходящих со стенки электронов.

- Stangeby P. The Plasma Sheath, Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion. Ed. by D.E. Post. – Plenum Press, New York, 1986. P. 41.
- 2. Chodura R. Plasma Flow in the Sheath and Presheath of a Scrape-Off Layer, Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion. Ed. By D.E. Post – Plenum Press, New York, 1986. P. 99.
- 3. Kollath R. // Handbuch der Physik. 1956. V.21.
- 4. Thomas E.W. // Atomic and plasma-material interaction data for fusion. 1991. V.1. P. 79.

ДИНАМИКА ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНЫЕ МЕМБРАНЫ

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

Рассмотрена задача проницаемости водорода через многослойные мембраны в промежуточном режиме. Для двух предельных режимов транспорта через мембрану (режим ограничения проницаемости диффузией и режим ограничения проницаемости поверхностью) получены явные выражения для проникающего потока и концентрации водорода в мембране в зависимости от времени. Разработан численный метод решения задачи проницаемости в многослойных мембранах, который позволяет определять проникающий поток и профили концентрации в общем случае.

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

В работе [1] было показано, что можно выделить два предельных режима транспорта водорода через многослойную мембрану: SLR (режим ограничения транспорта поверхностью) и DLR (режим ограничения транспорта диффузией). Эти два режима разделяются по значению параметров проницаемости V_1 и V_n :

$$V_1 = V_n / \gamma$$
$$V_n = k_m S_n^2 \sqrt{P} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{D_i S_i},$$

где $k_{\rm m}$ – коэффициент рекомбинации на выходной стороне мембраны, P – давление на входной стороне, $\gamma = k_{rn}S_n^2 / k_{r1}S_1^2 = k_{an} / k_{a1}$ - параметр асимметрии, S_i , D_i , l_i – растворимость, коэффициент диффузии и толщина *i*-го слоя, соответственно. Если оба параметра много больше одного, реализуется режим DLR, если хотя бы один из них меньше одного – режим SLR.

Исходя из баланса частиц, в мембране, можно записать уравнение для концентрации водорода в мембране в режиме SLR. Это уравнение является уравнением с разделяющимися переменными и может быть решено до конца аналитически. В результате для проникающего потока в режиме SLR получается выражение:

$$J_{p} = 2P \frac{k_{a1}k_{an}}{k_{a1} + k_{an}} \operatorname{th}^{2} \left(\frac{\sqrt{k_{a1}(k_{a1} + k_{an})}}{\sum_{i=1}^{n} S_{i}l_{i}} \sqrt{Pt} \right),$$

где k_{a1} , k_{an} – коэффициенты абсорбции на входной и выходной сторонах. В случае n = 1 это выражение совпадает с известной формулой для проникающего потока через однослойную ассиметричную мембрану [2].

В режиме DLR решение системы уравнений для концентрации в слоях мембраны с учетом условий на границах слоев может быть найдено методом Лапласа. Получить окончательное выражение для проникающего потока при этом не удается, однако можно показать, что в общем случае такое выражение будет иметь вид:

$$J_{p} = J_{p}^{\infty} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\psi_{n} \beta_{k}}{\sqrt{D_{n}}} \cos \frac{\beta_{k} l_{n}}{\sqrt{D_{n}}} - \frac{\phi_{n} \beta_{k}}{\sqrt{D_{n}}} \sin \frac{\beta_{k} l_{n}}{\sqrt{D_{n}}} \right) \exp\left(-\beta_{k}^{2} t\right),$$

где J_p^{∞} - проникающий поток в стационарном режиме, Ψ_k , φ_k - коэффициенты, выражающиеся рекуррентными формулами через коэффициенты диффузии и растворимости всех слоев мембраны, β_k - корни характеристического уравнения. В случае однослойной мембраны эта формула дает известный [3] результат:

$$J_{p} = \frac{DS\sqrt{P}}{L} \bigg[1 + 2\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k} \exp \bigg(-\frac{D}{L^{2}} \pi^{2} k^{2} t \bigg) \bigg].$$

- 1. E. Marenkov, I. Tsvetkov, A. Pisarev// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 74 (2010) 245.
- 2. A. Pisarev // Journal of Membrane Science. 335 (2009) 51.
- 3. Daynes // H. Proc.Roy.Soc. 1920. 97. Ñ. 286-307.

2. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ

И.В. ВИЗГАЛОВ, К.М. ГУТОРОВ

Рассматривается один из режимов горения пучково-плазменного разряда с самовозбуждением колебаний в плазме. Колебания возбуждаются вследствие неустойчивости взаимодействия плазмы с поверхностью коллектора с высокой вторичной электрон-электронной эмиссией (цепь с коллектором имеет N - образную ВАХ). На коллектор подается отрицательное смещение от внешнего источника питания, для управления режимом колебаний можно включать в цепь питания коллектора дополнительную индуктивность. В предельном случае автоколебательного режима, когда внешняя индуктивность L в цепи питания очень велика, автоколебания должны развиваться в форме периодических высоковольтных импульсов. Наблюдаемые автоколебания этого типа действительно сопровождаются значительными бросками напряжения (>> 1 кВ). На осциллограммах они имеют вид высоковольтных импульсов с очень крутыми фронтами (порядка и более 1 кВ/нс).

Таким образом, на участке отрицательного сопротивления ВАХ, разрядная система работает как автоколебательный релаксационный генератор, позволяющий получать очень высоковольтные импульсы, что соответствует высоковольтному режиму автоколебательного вторично-эмиссионного разряда (АВЭР). Этот режим может быть использован для прямого ускорения ионов дейтерия в простейшей схеме нейтронного генератора на автоколебательном разряде. Отметим, что в этом режиме амплитуда колебаний и форма отдельных импульсов не зависят от ЭДС источника питания, т.е. от конкретного положения особой точки на падающем участке ВАХ. От ЭДС зависит частота следования импульсов. С этим выводом согласуются экспериментальные результаты, согласно которым частота следования импульсов может изменяться в 3-4 раза при перемещении особой точки от верхней точки *N*-образной ВАХ разряда до его локального минимума.

Проиллюстрируем поведение разрядного релаксатора на примере при следующих экспериментальных условиях: потенциал коллектора – 300 В, внешняя индуктивность $L = 10^{-3}$ Гн, водородная плазма. Если считать, что энергия индуктивности полностью переходит в энергию плазменно-поверхностного конденсатора C_N , то без учета разрядки, максимум напряжения на конденсаторе составит порядка 200 кВ. В простейшей схеме нейтронного генератора на основе автоколебательного разряда рассмотренный релаксационный режим может обеспечить весьма значительный нейтронный выход. В настоящее время электрическая прочность мишенного узла не позволяет получать столь высокие напряжения. Реально импульс имеет конечный фронт, и ток разрядки по у-ветви ВАХ значительно уменьшает предельное напряжение. С учетом скорости роста напряжения на фронте импульса $(0,4\cdot10^{12} \text{ B/c}$ при напряжении 1кB) длительность всего высоковольтного импульса составляет порядка 50 нс, а его амплитуда составит порядка 10 кВ, что действительно наблюдается экспериментально. При этом необходимо, чтобы была обеспечена высоковольтная изоляция электродной системы. Увеличивая индуктивность и электрическую прочность коллекторного узла и самой индуктивности, а также сопротивление системы охлаждения можно значительно увеличить напряжение импульса, правда, при снижении частоты следования, если не увеличивать мощность источника смешения. Малая продолжительность высоковольтного импульса затрудняет развитие высоковольтного пробоя с вакуумной стороны. С атмосферной стороны возможно развитие разрядного процесса по механизму волны ионизации. Поэтому требуется высококачественная изоляция индуктивности, высоковольтного ввода и кабелей коммутации.

О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ НА ДИНАМИКУ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ

На динамику плазмы микропинчевого разряда (МПР) могут оказывать влияние условия инициирования основного разряда [1], а именно: геометрия системы инициирования, длительность инициирующего импульса и его амплитуда, состав плазмообразующего диэлектрика триггерного поджига. В представленной работе, выполненной на установке «Пион» [2], проводилось исследование нескольких вариантов конструкций системы инициирования разряда, отличавшихся положением плазмообразующей поверхности триггерного диэлектрика относительно оси разрядного промежутка МПР. Наилучшие результаты были получены для конструкции, в которой плазмообразующая поверхность примыкала к катоду и располагалась сбоку от него (рис. 1).

Генератор высоковольтных импульсов представлял собой ГИТ на основе тиратрона ТГИ1-1000/25 и конденсатора К75-48 емкостью 0.22 мкФ. Применялись два варианта схемы ГИТ с повышающим импульсным высоковольтным трансформатором и без него. В качестве плазмообразующих диэлектриков использовались керамика и фторопласт. Исследования были проведены для двух полярностей на центральном триггерном электроде. Напряжение на основной конденсаторной батарее составляло 10+15 кВ. Напряжение на центральном триггерном электроде – 7÷18 кВ. Как выяснилось в ходе экспериментов, наилучшие результаты наблюдались для U = 12 кВ, поэтому все результаты приводятся для этого напряжения.



Рис. 1. Электродная система установки «Пион»

Результаты исследования показали, что лучшая стабильность МПР наблюдается для схемы с применением импульсного трансформатора, о чем свидетельствовали характерные для всех разрядов типа Z-пинч особенности на осциллограмме тока при наличии пинчевания, а также соответствующие этому моменту времени сигналы рентгеновского излучения из области МПР, регистрируемые с помощью *pin*-диода.

При положительной полярности на центральном триггерном электроде как для фторопласта, так и для керамики отсутствовала устойчивая воспроизводимости пиков рентгеновского излучения от разряда к разряду. Для отрицательной полярности – результаты для обоих диэлектриков несколько отличаются. Так, время появления рентгеновских импульсов относительно начала разряда было

достаточно стабильным, но при использовании фторопласта присутствовал больший по величине разброс ~ 500 нс, в то время как для керамики разброс составлял ~ 100 нс. Большая стабильность наблюдалась и для амплитуды рентгеновского сигнала, что хорошо видно на рис.2 и 3 (верхняя кривая – осциллограмма тока, нижняя – сигнал рентгеновского детектора).



использовании фторопласта.



- 1. Ch. K. Erber O.H. Herzog, A. Schulz, E.J. Clothiaux, F. Walden, and H.-J. Kunze Optimization of micropinch plasmas produced by vacuum spark discharges // Plasma Sources Sci. Technol. 1996. V.5. P.436-441.
- 2. Башутин О.А., Бялковский О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Саранцев С.А. // Доклад на 3-ей Всероссийской молодежной школе-семинаре с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики». 2009 г. ФИАН. Москва – Технопарк ФИАН. г. Троицк. Московская обл.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В НОВОМ МАГНЕТРОНЕ С УПРАВЛЯЕМЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.Ю. СОКОЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ

Разработана конструкция нового импульсного магнетрона (рис.1), которая предусматривает возможность электрической изоляции анода магнетрона от заземленной вакуумной камеры, а также за счет усовершенствования системы охлаждения катода обеспечивает работу устройства при тепловой нагрузке мощностью до 500 Вт/см². Вместе с полученными ранее результатами по определению времени восстановления электрической прочности разрядного промежутка по времени распада плазменного образования, которая позволила определить максимальную частоту следования импульсов высокого напряжения (для длительности импульса 10 мс такая частота составляет 100Гц [1]), созданная конструкция обеспечивает перевод магнетрона в импульсно-периодический режим, необходимый для технологического применения данного типа разряда.

После сборки нового магнетрона были проведены эксперименты по поиску на нем режимов сильноточного магнетронного импульсного разряда (СИМР), характеризующихся высоким током и достаточно большой скоростью распыления. Поиск режимов СИМР на новом магнетроне проводился с учетом оптимальных параметров (давление рабочего газа, мощность предварительного стационарного разряда), полученных ранее на старом магнетроне. После процедуры предварительной откачки в камеру напускался рабочий газ Ar до давления 8·10⁻³ торр. Для создания предварительной ионизации зажигался стационарный магнетронный разряд, с током разряда от 80 мА до 120 мА. Затем для различных значений магнитного поля (которое регулируется положением магнитов) были сняты вольтамперные характеристики разряда для двух случаев конфигурации магнетрона: с наличием анода в разрядной цепи и без него. Различий в вольт-амперных характеристиках разрядов для этих случаев обнаружено не было, однако режим с выделенным анодом позволил получить наиболее устойчивые режимы



Puc.1. Конструкция нового импульсного магнетрона

горения разряда. Отсутствие различий при использовании выделенного анода показало, что ток разряда замыкается от катода именно к аноду, а не ко всей области рабочей камеры.

На рис.2 представлены вольт-амперные характеристики для магнетронов новой (рис.2а) и старой конструкции (рис.2б).



Рис.2. Вольт-амперные характеристики для магнетронов а) новой и б) старой конструкции

Как можно видеть, принципиальных отличий режимов горения СИМР в различных разрядных устройствах нет, т.е. новый магнетрон позволяет достичь требуемых параметров разряда при возможности запуска его в импульсно-периодическом режиме.

Литература

1. Г.В. Крашевская, А.Ю. Соколов, Г.В. Ходаченко, Т.В. Шукшина, И.А. Щелканов. Исследование сильноточного импульсного магнетронного разряда в среде аргона с добавками химически активных газов. Годовой отчет по НИР кафедры физики плазмы за 2008.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

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

Задачей данной работы является исследование энергетического распределения ионов, падающих на заземлённую подложку из плазмы безэлектродного высокочастотного индукционного разряда. Проведённое исследование связано с поиском возможностей управления энергиями ионов для плазменной доработки материалов, на которые в связи с технологическим процессом нет возможности подавать дополнительное смещение из-за их непосредственного контакта с заземленными частями установки. Такими частями могут быть, например, валы системы перемоточных механизмов, применяемых в рулонных технологиях.

Для проведения измерений энергии ионов, падающих на подложку, был спроектирован и собран электростатический многосеточный энергоанализатор, состоящий из трёх сеток (входной, анализирующей и супрессорной) и коллектора. Геометрические и электротехнические параметры анализирующего прибора были рассчитаны в соответствии с теорией многоэлектродных зондов, изложенной, например, в работах [1] и [2]. Были проведены предварительные испытания с электронным пучком контролируемой энергии, подтвердившие адекватность информации, получаемой с помощью собранного устройства.

В ходе основных экспериментов проводились измерения энергии приходящих на подложку ионов с использованием изготовленного энергоанализатора. Условия варьировались в зависимости от давления рабочего газа, вводимой ВЧ мощности, расстояния от анализатора до ВЧ антенны. Рассматривались режимы обработки с доускорением и без доускорения ионов. В режиме «с доускорением» в плазму был погружен дополнительный электрод определенной формы, находящийся под заданным положительным потенциалом (от 0 до 300 В). Наличие данного электрода в плазме при отсутствии емкостных связей через неё со стенками камеры позволило бы поднять потенциал плазмы относительно потенциала земли, и, соответственно, повысить энергию падающих на заземленную подложку ионов, не прикладывая при этом электрического смещения к самому образцу.

Типичные получаемые энергетические спектры после обработки данных с энергоанализатора представлены на рис. 1.



Рис. 1. Энергетические спектры ионов аргона: без доускорения (слева) и с доускорением (справа)

Заметных изменений в энергетическом спектре при вводе дополнительного электрода не наблюдалось. Основной пик энергии ионов приходится на величину, соответствующую разности между потенциалом плазмы и плавающим потенциалом, которую ионы проходят, двигаясь в слое. К тому же, зависимость ионного тока коллектора от напряжения, подаваемого на анализирующую сетку, во всех экспериментах доходит до нуля (а иногда также уходит в отрицательную область, что связано с ускорением электронов к коллектору при достаточно больших потенциалах анализирующей сетки). Это значит, что более быстрых ионов в исследуемой плазме исчезающее мало. Тот же результат был получен и для плазмы N₂+Ar с любыми соотношениями состава смеси и независимо от вводимой ВЧ мощности.

Эксперименты показали, что в рассматриваемых условиях управлять энергией ионов за счёт введения в плазму дополнительного электрода не удаётся, что объясняется наличием гальванической связи между плазмой и доступными для неё заземлёнными частями вакуумной камеры [3]. Искомый эффект реализуется в данной конфигурации лишь в случае подачи отрицательного смещения на саму подложку.

- 1. О. В. Козлов. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969, с. 100–119.
- H. Hutchinson. Principles of Plasma Diagnostics. Second Edition. Cambridge University Press, 2002, p. 94– 100.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

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

Данная работа посвящена исследованию энергетического распределения ионов, приходящих на поверхность подложки в сильноточном импульсном магнетронном разряде (СИМР). Проводилось также сравнение полученных данных с результатами аналогичных исследований разрядов технологии HIPIMS (high power impulse magnetron sputtering, т.е. импульсного магнетронного распыления высокой мощности, предложенного впервые в [1]) и её разновидностей (см. [2]) с целью выявления принципиальных отличий этих разрядов от СИМР. На сегодняшний день сторонних публикаций, посвящённых режиму СИМР, нет. Тем не менее, этот режим чрезвычайно перспективен, т.к. обеспечивает высокие скорости осаждения материала (до 10^4 нм/мин), причём качество получаемого с его помощью тонкого TiN покрытия для фольги электролитических конденсаторов оказывается наилучшим [3].

Для проведения измерений энергии ионов, падающих на подложку, использовался электростатический многосеточный энергоанализатор, состоящий из четырёх сеток (входной, разрывающей плазму, анализирующей и супрессорной) и коллектора.

Условия экспериментов, проведённых на установке ПИНЧ, задавались следующими параметрами: напряжением стационарного разряда $U_{\rm cr}$, током стационарного разряда $I_{\rm cr}$ и напряжением зарядки длинной линии, используемой для подачи импульса $U_{\rm зар}$.

В проведённой серии экспериментов варьировалось напряжение зарядки длинной линии, и для каждого из использованных значений $U_{\rm sap}$ производилось сканирование по потенциалу анализирующей сетки с некоторым фиксированным шагом. На рис. 1 приведены результаты обработки данных, полученных с помощью многосеточного энергоанализатора.



Рис.1. Энергетические спектры ионов ${}^{36}Ar^+$ и ${}^{48}Ti^+$ в СИМР (суммарный спектр, слева) и в HIPIMS (отдельно для разных ионов, справа, [4])

Видно, что в СИМР существует пик распределения при энергии ионов ~ 10 – 13 эВ, причём его положение не зависит от величины напряжения прикладываемого импульса. Явно просматриваемой закономерностью является увеличение числа ионов в высокоэнергетичной части спектра при повышении напряжения источника питания разряда.

Сравнивая кривые энергетических распределений в разрядах СИМР и HIPIMS, можно заключить, что энергия, при которой наблюдается пик, в случае СИМР в несколько (~ 5 – 10) раз выше. С другой стороны, как и в HIPIMS, положение этого пика не меняется при повышении вкладываемой мощности. Связать этот пик с ускорением в слое между анализатором и плазмой, как это делают авторы ряда работ для случая HIPIMS, не представляется возможным, т.к. температура электронов в разряде СИМР, определённая из зондовых характеристик, составляет $T_e \sim 10$ эВ. Таким образом, обнаруживается существенное различие между энергетическими распределениями ионов в СИМР и HIPIMS, которое может являться причиной улучшенной адгезии покрытий к материалу образца, достигаемой в случае СИМР.

- 1. V.Kouznetsov, K.Macák, J.M. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov // Surf. Coat. Technol., v.122, 1999, p. 290.
- 2. А. И. Кузьмичёв. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. К.: Аверс, 2008.
- 3. Г.В. Ходаченко, А.А. Писарев, Г.В. Крашевская и др. // Известия РАН. Серия физическая, том 74, № 2, 2010, с. 277–283.
- 4. J. Bohlmark, M. Lattemann, J. T. Gudmundsson, A. P. Ehiasarian, Y. Aranda Gonzalvo // Thin Solid Films, v. 515, 2006, p. 1522–1526.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В НОВОМ МАГНЕТРОНЕ С УПРАВЛЯЕМЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Г.В. КРАШЕВСКАЯ, И.Е. ОРЛОВ, Г.В. ХОДАЧЕНКО, И.А. ЩЕЛКАНОВ

Работа посвящена изучению возможностей управления энергиями ионов для нанесения покрытий на заземленные подложки. Решение данной задачи актуально при использовании плазмы в промышленных установках для доработки ленточных материалов, т.к. механизмы перемотки последних обычно находятся под потенциалом земли.

Повышение энергии ионов, падающих на заземленную подложку, возможно либо при использовании ионно-оптических систем, либо за счет повышения потенциала плазмы. По мнению некоторых технологов, увеличение потенциала плазмы можно осуществить, при погружении в плазму электрода с поданным на него положительным относительно земли потенциалом. Работа посвящена экспериментальной проверке реализации данной идеи.

Эксперименты проводились на установки фирмы ИНАКОТЕК[1]. В качестве плазмообразующей ступени для доработки заземленных образцов был выбран безэлектродный высокочастотных индуктивный (ВЧИ) разряд вследствие более высокой плотности плазмы, получаемой при одинаковых ВЧ мощностях и изолированности от заземленных элементов конструкции. При погружении проводящего материала в плазму ВЧИ разряда процессы, происходящие в слое объемного заряда у его поверхности, идентичны происходящим в плазме высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда.

Для исключения контакта между плазмой и заземленными частями установки использовался фторопластовый цилиндр диаметра 19 см и длиной 14 см, который крепился непосредственно перед антенной (рис. 1). Открытый торец закрывался фторопластовой пластиной толщиной 1 см, которая служила так же для крепления и ввода зонда для измерений параметров плазмы на различных расстояниях от поверхности антенны. Размер пластины подобран так, чтобы между её краями и цилиндром оставались небольшие незакрытые щели для обеспечения откачки объема внутри цилиндра до давления всей камеры. В качества электрода использовался лист медной фольги шириной 130 мм и толщиной 1 мм, закрепленный непосредственно в диэлектрическом цилиндре.



Рис.1. Диэлектрический экран, закрепленный непосредственно перед антенной



Рис.2. ВАХ одиночного зонда на различных расстояниях от антенны с диэлектрическим экраном: (2) со смещением V = 60 B на электроде и (1) без

Были проведены измерения параметров плазмы на различных расстояниях от индукционной антенны без напряжения на электроде, а так же при подаче на электрод постоянного положительного относительно земли напряжения V = 60 В. Результаты измерения представлены на рис. 2. Как видно из представленных распределений параметров плазмы, при наличии смещения на электроде, ионная плотность и ток ионного насыщения больше, нежели без смещения. Потенциал плазмы, по всей видимости, так же сдвигается на эту величину. Однако, проведенные тестовые эксперименты по облучению поверхности образца, закрепленного на торце диэлектрического цилиндра и с положительным относительно земли напряжением на электроде, не привели к изменению в структуре образца после облучения. Это связано, возможно, с влиянием площади заземленного образца в плазме на формирование усредненного потенциала вблизи поверхности этого образца, т.к. в отличие от зонда, специально изготавливаемым малым (~ 0,1 см²), чтобы свести к минимуму возмущение плазмы, облучаемые образцы были площадью ~ 5 см².

3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ОБСКУРОГРАММ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ «ЗОНА-2»

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

Плазма микропинчевого разряда является интенсивным источником рентгеновского излучения (РИ) с широким спектральным составом, охватывающим диапазон энергий рентгеновских квантов от сотен электронвольт до сотен килоэлектронвольт. Такое РИ несет богатую информацию о плазме, а различные методы рентгеновской диагностики давно стали надежным инструментом для исследования физических процессов, протекающих в разрядном промежутке. Важную информацию дает исследование РИ с пространственным разрешением. Для формирования рентгеновского изображения широко применяются камеры-обскуры. При этом изображение либо регистрируется на фотослой, либо записывается с помощью цифрового регистратора в электронную память ПК. Основные недостатки регистрации на фотослой – трудоемкий и длительный процесс обработки фотоматериалов, сложность воспроизведения идентичных условий проявки в различных сериях экспериментов, невозможность получения экспериментальных результатов в реальном времени. Фотоэлектронные методы записи рентгеновского изображения свободны от этих недостатков, но их активное применение в исследовательских лабораториях ограничивает высокая стоимость регистрирующей аппаратуры.

На установке «Зона-2» разработана методика получения обскурограмм в режиме реального времени, основанная на визуализации рентгеновского излучения с помощью специального экрана, покрытого люминофором. Затем, уже в видимом диапазоне, изображение регистрируется стандартной цифровой камерой Видеоскан-205. Для выделения нескольких энергетических диапазонов РИ применена 3-х канальная камера-обскура с диаметром каждого отверстия ~ 100 мкм. Перед передним и задним отверстиями установлены фильтры из алюминиевой фольги толщиной 210 и 420 мкм соответственно. Схема эксперимента представлена на рис.1





Puc.1

Puc.2

Рентгеновские лучи проходят через отверстие в камере-обскуре и формируют изображение плазмы. Для визуализации этого изображения использовался рентгеновский экран УС, на котором была удалена подложка из бумаги, а оставшаяся пленка из люминофора (состав ZnS-CdS-Ag, толщина слоя ~150 мкм) устанавливалась непосредственно на входное окно электронно-оптического преобразователя (ЭОП), работающего в режиме усилителя яркости. Применялся ЭОП типа ЭПВ-20 с мультищелочным катодом, для которого наибольшая спектральная чувствительность совпадала с диапазоном излучения рентгеновского экрана (~500 нм). Изображение с выходного экрана ЭОП регистрировалось с помощью высокочувствительной цифровой камеры Видеоскан-205, передающей изображение непосредственно в персональный компьютер РС, и выводилось на экран монитора с последующей записью на жесткий диск компьютера. Выбор параметров и запуск камеры осуществлялись программно, что значительно упростило управление регистрирующей аппаратурой и её синхронизацию с импульсным разрядом.

Исследуемое излучение выводилось из вакуумной камеры через диагностическое окно, закрытое лавсановой пленкой толщиной 50 мкм. При этом нижний порог регистрируемых энергий составил величину hv ~ 3 кэВ. Одновременно с регистрацией обскурограмм (рис. 2) использовались и другие диагностики. Получены осциллограммы рентгеновского излучения (*pin*-диод) и разрядного тока (пояс Роговского). Постоянство условий регистрации и контроль режимов позволяет проводить корректные сравнения не только локализации источников рентгеновского излучения, но и интенсивности их излучения.

ОБРАЗОВАНИЕ СШИВОК ДНК ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АЗОТНОГО ЛАЗЕРА В ПРОБЕ С 8-МОП

<u>Д.А. ЖЕСТИЛЕВСКИЙ, С.А. РУМЯНЦЕВ, С.А. СОЛОМАТИН, Н.М.СУХОВ</u>, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.С. САВЕЛОВ, М.В. МОШНИН

Для лечения псориаза и других распространённых кожных заболеваний широко применяется метод ультрафиолетовой ПУФА-терапии. Кроме того, в лечебную практику активно внедряются новые методики лечения, основанные на использовании излучения эксимерного XeCL лазера ($\lambda = 308$ нм). В данной работе показана возможность разработки более простой и относительно недорогой медицинской аппаратуры на основе азотного лазера с длиной волны 337 нм и обсуждаются преимущества применения излучения в этом спектральном диапазоне. Исследовалось образование сшивок ДНК по наличию гиперхромного эффекта в образцах проб с 8-МОП, которые облучались азотным лазером. Гиперхромный эффект проявляется в повышение оптической плотности раствора, содержащего двуспиральные ДНК и, как ожидалось, должен наблюдаться в молекулах нуклеиновых кислот при разрушении водородных связей под действием излучения.

Основу всех образцов, которые использовались в экспериментах, составил 0.1% раствор ДНК спермы лосося (Sigma, Германия), приготовленный в 2 ммоль NaCl. В рабочий образец к первоначальному раствору добавили 8-МОП (Sigma, Германия) до концентрации **5** · **10**⁻⁵ Моль. В контрольный образец вместо 8-МОП добавлен этанол. Получившиеся растворы разлили в 4 пробирки: 2 (ДНК + 8-МОП) + 2 (ДНК + этанол). Схема эксперимента по облучению проб представлена на рис.1. Применялся азотный лазера ЛГИ-501 с энергией в импульсе 30 мкДж и частотой следования импульсов 50 Гц. Время облучения – 30минут, что соответствует дозе облучения ~ 50 мДж/см².



Puc. 1

Для определения величины гиперхромного эффекта часть раствора в исследуемых образцах нагрели (кипячение при температуре 100°С в течение 10 минут), а потом резко охладили до температуры 0°С. Затем, на пике поглощения ДНК (длина волны 260 нм), с помощью спектрофотометра были измерены коэффициенты D_1 и D_2 , определяющие величину гиперхромного эффекта. Результаты некоторых измерений, в качестве иллюстрации, представлены в таблице:

Проба	<i>D</i> ₁ (без нагрева)	<i>D</i> ₂ (нагрев + охлаждение)	Гиперхромный эффект, G
ДНК + этанол, без облучения	0,475	0,535	12,5%
ДНК + 8-МОП, с облучением	0,514	0,532	3,5%

Величина гиперхромного эффекта вычисляется по формуле $G = (D_2 - D_1) / D_1$. Как видно, величина *G* для облучения ДНК с 8-МОП уменьшается по сравнению с контрольным образцом. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что облучение клеток в пробе с 8-МОП приводит к образованию прочных сшивок между нитями ДНК. Из-за них клетка не сможет делиться и погибнет.

Заметим также, что, основные преимущества ПУФА-терапии с применением азотного лазера перед существующими методиками следующие:

1.Область λ = 337 нм лежит вне спектра поглощения ДНК, а, следовательно, воздействие будет оказываться исключительно на псоралены. Это выгодно отличает предложенную методику от эксимерного лазера, поскольку исключает угрозу возникновения рака кожи и ее преждевременное старение.

2.В связи с высокой интенсивностью лазерного излучения и возможностью точной фокусировки луча, возможно эффективное лечение локальных очагов болезней в труднодоступных местах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТРИГГЕРНОГО ПОДЖИГА С ПОМОЩЬЮ ГОМОДИННОГО КВАДРАТУРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА УСТАНОВКЕ «ПИОН»

О.А. БЯЛКОВСКИЙ, А.П. КУЗНЕЦОВ, А.С. САВЁЛОВ, С.А. САРАНЦЕВ

В работе приведены результаты исследований плазмы, образуемой триггерными поджигами на основе поверхностного скользящего разряда, на микропинчевой (МПР) установке «Пион» [1].

Исследования проводились с помощью лазерного гомодинного квадратурного интерферометра, принципиальная оптическая схема которого (рис.1) аналогична примененному для определения параметров периферийной плазмы на МПР установке «Зона-2». В качестве излучателя использован газовый **He-Ne** лазер ГH-25-1 мощностью 25 мВт на длине волны 633 нм. Лазерный луч, при помощи зеркал M_1 и M_2 направляется в интерферометр Маха-Цандера, образованный зеркалами M_3 - M_6 . С помощью зеркала M_7 интерферирующие лучи направляются на линзу **2**, фокусирующую излучение на диафрагмах расположенных перед фотодетекторами. Делительное зеркало **3** пространственно разводит сигналы по измерительным каналам. Для уменьшения диаметра пучка лазера в области разряда использовалась система кварцевых линз **1**. За счет того, что время существования плазмы $\tau << 1/f$, где *f*-характерная частота механических смещений зеркал интерферометра из-за вибраций, фазовый сдвиг из-за вибропомех за время измерений можно считать постоянным. Необходимая жесткость конструкции, устраняющая угловую разъюстировку интерферометра, обеспечивается размещением оптических элементов на общей массивной плите, механически развязанной с вакуумной камерой.



Рис. 1. Принципиальная схема лазерного гомодинного квадратурного интерферометра

Были проведены исследования нескольких вариантов триггеров, различающихся значением площади плазмообразующей поверхности диэлектрика. Эксперименты проводились для следующих диэлектриков: фторопласт, фторопласт с внедренной в объем солью LiF, фторопласт с внедренной в объем солью LiP, фторопласт с

Зондирование плазмы осуществлялось на расстоянии 1 мм от поверхности диэлектрика, и сбоку от центрального электрода (рис.2) через диагностические окна вакуумной камеры. Исследования проводились для двух полярностей на центральном триггерном электроде при напряжении 10 кВ. Давление в вакуумной камере (6-8)×10⁻⁵ торр.





Рис. 2. Внешний вид исследуемой триггерной системы (а) и направление зондирования лазерным лучом (б)

Рис. 3. Значения линейной электронной плотности для различных триггерных диэлектриков.

Приведенные на рис.3 результаты показали отсутствие существенного различия в значении линейной электронной плотности (не более чем в 4 раза) для всех четырех типов диэлектриков и различной полярности электродов. Максимальные значения были получены для фторопласта с положительной полярностью центрального электрода. Добавка в разряд легкоионизируемого лития не привела к увеличению электронной концентрации.

- 1. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Саранцев С.А. и др. // Сборник докладов «Второй Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям», Саров. 2008. С. 27-31.
- 2. А.П. Кузнецов, О.А. Башутин, О.А. Бялковский и др. // Физика плазмы. Т.34. № 3. С. 219–225.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В ЭРОЗИОННОМ КАПИЛЛЯРНОМ РАЗРЯДЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСИЛИТЕЛЯ ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ

А.П. КУЗНЕЦОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, И.Ф. РАЕВСКИЙ, А.С. САВЁЛОВ, С.А САРАНЦЕВ

Теневые методы являются одними из наиболее успешно применяемых методов получения изображения прозрачных объектов, имеющих оптическую неоднородность – изменение в пространстве или во времени показателя преломления [1].

В представленной работе лазер на парах меди был применен для теневого фотографирования динамических процессов плазмообразования в традиционной оптической схеме, когда лазер использовался в качестве внешнего осветителя (рис. 2). За счет достаточно короткой длительности импульсов (30 нс) с помощью Си-лазера можно регистрировать контрастные изображения быстропротекающих процессов, а относительно высокая частота повторения (14 кГц) позволяет проводить многокадровую съемку и получать информацию о пространственно-временной динамике плазменного образования.

Для изучения структуры плазменной струи на всей стадии развития факела в интервале 100 мкс -10 мс использовался шлирен-метод. Излучение Си-лазера коллимировалось линзой 1 в параллельный пучок диаметром 6 см. В отсутствие оптической неоднородности световой пучок беспрепятственно проходит через диафрагму с диаметром отверстия 0,4 мм, расположенной в фокальной плоскости приемного объектива 2. С помощью второй линзы (визуализирующего объектива) 3 изображение объекта проецируется на экран 4 (рис. 1). Отклонение лучей в исследуемом объекте приводит к смещению лучей и перераспределению освещенности в изображении объекта на экране. Освещенность экрана при этом изменяется пропорционально угловому отклонению луча є. В то же время угол отклонения є пропорционален градиенту показателя преломления *n*, проинтегрированному по линии наблюдения (вдоль оптической оси z). Изменение освещенности экрана описывается выражением

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \int_{Z_1}^{Z_2} \left(\frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y}\right) dz$$

Роль диафрагмы состоит в том, что лучи света, идущие под углами к оси большими некоторого, определяемого размерами отверстия в фокусе линзы 2, отсекаются и, соответственно, вклад в изображение будут давать только те области объекта, в которых поперечные градиенты показателя преломления не?превышают некоторую заданную величину.





Ha рис.2 представлены теневые фотографии факела эрозионного капиллярного разряда в разные моменты времени. Как видно, развитие плазмы сопровождается значительным увеличением турбулентности оптической плотности из-за того, что изменение показателя преломления в факеле определяется как изменением электронной компоненты в плазме разряда, так и сильным изменением

показателя преломления в шубе – нагретом воздухе, окружающем плазменный керн. Объяснить наблюдаемый эффект можно, если предположить, что токовая структура

сформировавшегося капиллярного разряда представляет из себя аксиально-симметричную петлю токов выноса.



Рис. 2. Теневые фотографии факела эрозионного капиллярного разряда в различные моменты времени

Литература

1. Вовченко Е.Д., Кузнецов А.П., Савёлов А.С. Лазерные методы диагностики плазмы // Учебная книга инженера-физика, М.: МИФИ, 2008

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ВИСКЕРОВ ОКСИДА(VI) ВОЛЬФРАМА ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ ОСАЖДЕНИИ

<u>М.С.ПОЛЯНСКИЙ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ</u>, А.А. РУСИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, С.Л. КАНАШЕНКО¹⁾

¹⁾ ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина

В работе были получены покрытия на вольфраме, полученные методом физического осаждения с нагретого до температур 1500-2000 °С вольфрамового нагревателя на более холодный вольфрамовый

образец, разогревающийся в процессе осаждения до температур 500-700 °С. Визуально покрытия были бархатно черными. При увеличении от 5000 и выше в электронном растровом микроскопе наблюдалась игольчатая структура покрытий.

Покрытие вырастает на первоначально сформировавшемся нанокристаллическом слое оксида толщиной $0,2 \div 0,5$ мкм. Диапазон размеров иголок: в длину от 1 до 100 мкм, и в толщину от 0,1 до 1 нм. Также на поверхности встречаются неоднородности, связанные с тем, что до осаждения на вольфраме были примеси. Предварительный отжиг образцов не влияет на рост покрытий. Покрытие испаряется при температурах 900–1100 °С. До 800 °С пленка сохраняет свою морфологию.

На основе проведенных исследований был предположен следующий механизм роста покрытия. Первоначально, осаждаемый окисел растет как сплошное нанокристаллическое покрытие. По мере его формирования создаются условия для роста вискеров с поверхности отдельных нанокристаллов. Поскольку нанокристаллы плотно расположены, то вполне возможно, что вискеры растут плотно друг к другу, объединяясь в более крупные «травинки». Наличие на поверхности как длинные, так и коротких пучков вискеров, может быть связано с тем, что по мере роста в силу статистических флуктуаций потока осаждаемых частиц некоторые вискеры растут быстрее. При этом они начинают затенять своих соседей, рост которых замедляется. Этот процесс усугубляется по мере роста более длинных вискеров.

Было отмечено, что рост вискеров происходит не за счет материала подложки, а за счет материала, осаждаемого при испарении нагревателя. Этим материалом является молекулы WO_3 . Молекулы осаждаются как на торце, так и на боковых стенках вискеров. Часть из них испаряется, а часть диффундирует к торцу и прилипает там, приводя к росту вискера.

Полученная структурированнная поверхность обладает большой площадью и может быть использована для улучшения поглощающих свойств поверхности.

Были исследованы эмиссионные свойства образцов. При напряженности 45 кВ/см начинается резкое увеличение тока эмиссии. С чистого вольфрама эмиссия зарегистрирована не была.



TM-1000_0524 2010.01.26 19:05 D3.2 x5.0k 20 ur Puc.1. РЭМ изображения поверхности: а – отдельная «травинка», б - торец образца на сколе, в – вид поверхности сверху

ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В УГЛЕРОДНЫЕ ПЛЕНКИ, РАСТУЩИЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ **ЛЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ**

В. И. БУРЛАКА, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, А.А. РУСИНОВ, С.А. КРАТ

Одним из ограничивающих факторов использования углерода применительно к ITER, является его химическое распыление, в результате которого возможно переосаждение углеводородов, что часто приводит к образованию углеродных пленок с большим содержанием изотопов водорода, в том числе радиоактивного трития. В данной работе был проведен эксперимент по облучению графита МПГ-8 ионами дейтерия в плазме магнетронного разряда (рабочий газ - дейтерий). Энергия ионов была порядка 450 эВ. Образцы располагались на поверхности катода в зоне максимального ионного тока и облучались через отверстия в маске из графитовой бумаги (Раруех), которая закрывала остальные подверженные распылению участки катода. Помимо графитовых образцов на катод были установлены тестовые образцы из вольфрама.

Поверхность вольфрамовых образцов после облучения имела черный цвет и была покрыта слоем напыленного углерода толщиной несколько микрометров. Таким же слоем, видимо, был покрыт и графитовый образец. В этих экспериментах углерод распылялся с графитового катода и осаждался на поверхность образцов в процессе облучения ионами дейтерия.

На рис. 1,2 представлены спектры термодесорбции из вольфрамового и графитового образцов, которые одновременно облучались до дозы 5.4×10²⁴ ион/м². Температура образцов в ходе облучения не превышала 400 К. Сравнение показало, что ТДС для обоих образцов похожи как качественно, так и количественно. Это обусловлено тем, что накопление дейтерия в обоих случаях происходило в результате захвата ионно-имплантируемого дейтерия в непрерывно растущую пленку углерода на поверхности образцов. Материал подложки в данном случае имел слабое влияние. Количество дейтерия, захваченного в образцы, в этой серии экспериментов было в десятки раз больше, по сравнению с другими экспериментами, в которых использовалась молибденовая маска, и роста пленок не наблюдалось. По всей видимости, это обусловлено большой толщиной пленки углерода, которая составляла 5-6 мкм. На рис.3 представлена поверхность вольфрамового образца после ТДС анализа. После прогрева образца пленка растрескалась и частично отслоилась от подложки. На рис. 3 показан край черной углеродной пленки и светлая поверхность вольфрама после прогрева.



содержащих масс (D_2 , HD, HDO/CD₃H,

D₂O/CD₄) из графитового образца.

3,5 ----- M3 3,0 - M4 - M19 2,5 - M20 2.0 1,5 1,0 0,5 0,0 800 1000 1200 Температура, К 600 1400 1600 ТДС выхола



дейтерийсодержащих масс (D_2 , HD, HDO/CD₃H, D₂O/CD₄) из W с перенапыленной

Рис.3 Углеродная пленка на W образце, после ТДС анализа

Основное выделение дейтерия из образцов происходит в виде молекул D₂. Его ТДС спектр лежит в широком диапазоне температур от 700 К до 1600 К и имеет максимум при 1100 К. При температурах 800-900 К можно видеть газовыделение углеводородов, а также слабое плечо на спектре D₂. Такое расположение максимумов типично для термодесорбции С-D пленок. В [1] предполагается, что пик 800-900 К соответствует дейтерию, связанному с углеродом в sp³ гибридизации, а пик 1100 К – с углеродом в sp² гибридизации. Таким образом, можно предположить, что в образованных пленках преобладает sp² гибридизация. Концентрация дейтерия в пленке была оценена равной D/C≈0.2. Пленки с большой концентрацией sp² связей и относительно малым количеством водорода относят к классу графитоподобных пленок [2].

Литература

Schenk A., Winter B., Biener J. et al. // J. Appl. Phys., 1995, V. 77, P. 2462-2473 1

пленкой

Fanchini G., Tagliaferro A. // Carbon, The Future Material for Advanced Technology Applications, Topics 2 Appl. Phys., 2006, V.100, P. 95-105

ЗАВИСИМОСТЬ ЗАХВАТА ВОДОРОДА В УГЛЕРОДНЫЕ СЛОИ ОТ МАТЕРИАЛА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КУЗНЕЦОВ, П.А. ШИГИН

Исследования, проведенные на токамаках, указывает на то, что до 50 % изотопов водорода [1], захватываемых в материалы первой стенки во время работы установки, аккумулируется в перенапыленных углеродных слоях. В настоящее время имеются лишь разрозненные и часто противоречивые данные по захвату изотопов водорода в подобные слои, что делает затруднительным оценки накопления трития в первой стенке реактора, кроме того, подобные сведения необходимы для разработки эффективных методов обезгаживания и удаления подобных слоев.

В работе исследовались закономерности захвата водорода в углеродные слои в зависимости от материала и температуры подложки. Количество захваченного водорода и особенности его удержания определялись методом термодесорбционной спектроскопии. Скорость нагрева пленок при анализе составляла 3 К/с.

Напыление углеродных слоев проводилось методом осаждения испаренного углерода в специальном стенде в атмосфере водорода при давлении 0,15 Па на подложки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (SS) и пиролитического графита (PG) со скоростью 0,18 нм/с. Температура подложек варьировалась от 370 до 1000 К. Давление остаточных газов не превышало 10⁻³ Па.

Видно, что до температур \approx 700 К концентрация водорода в пленках, осажденных на PG, в два раза меньше, чем на SS (рис.1). Этот факт, а также появление в спектрах ТДС пленок (рис. 2) на графите пика на 1250 К, свидетельствующего о десорбции водорода из комплексов sp²-CH [2], позволили сделать заключение о более высокой степени упорядоченности структуры (графитизации) пленок, сформированных на PG. В свою очередь, большая степень графитизации могла быть следствием существования зародышей кристаллизации на поверхности графитовой подложки.

Основная часть захваченного при осаждении углеродных слоев кислорода десорбируется при T > 1150 K (рис. 1), в то время как увеличение температуры подложки в процессе напыления от 370 K до 500 K понижает захват примерно в 10 раз.

Резкое уменьшение захвата кислорода в пленках, напыленных при T > 370 K, объяснено значительным уменьшением сорбции молекул воды с ростом температуры в области 370 - 500 K. Действительно, оценка, проведенная с помощью соотношения Ленгмюра $\tau = \tau_0 \cdot \exp(E/kT)$, $E_{\rm H2O} \approx 1$ эВ [3], показывает, что



Рис.1. График зависимости концентрации водорода Н:С и кислорода O:С в пленках, осажденных на подложки из нержавеющей стали (SS) и пиролитического графитов (PG), от температуры подложек.



Рис.2. ТДС спектры водорода из пленок, осажденных на подложки из нержавеющей стали и пиролитического графитов при различных температурах подложек.

в диапазоне температур 370-500 K время жизни τ молекулы воды на поверхности графита, имеющей дефекты, меняется на 4 порядка величины от ~10 до ~10⁻³ с. Соответственно, при T ~ 500 K, захват водорода из молекул воды может быть существенно ниже, чем при 370 K.

От 5 до 15 % захваченного в пленки водорода десорбировалось в виде углеводородных молекул, преимущественно (до 90%) в составе метана. С ростом температуры подложек десорбция водорода в составе углеводородных молекул понижалась и при 900 К не наблюдалась. По-видимому, это связано с температурным отжигом центров захвата sp³-CH, который происходит при $T \ge 800$ K [2].

Таким образом: (1) углеродные слои, осаждаемые на подложку из пиролитического графита, имеют более высокую степень графитизации, чем пленки на нержавеющей стали; (2) повышение температуры подложки до 500 К понижает захват кислорода из молекул воды более, чем в 10 раз.

- 1. T. Loarer. Fuel retention in tokamaks // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390-391. P. 20.
- A. Schenk, B. Winter, J. Biener et al. Growth and thermal decomposition of ultrathin ion-beam deposited C:H films // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. P. 2462.
- 3. A. Allouche, Y. Ferro. Dissociative adsorption of small molecules at vacancies on the graphite (0001) surface // Carbon. 2006. V. 44. P. 3320.

ОСАЖДЕНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ В ПЛАЗМЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Л.Б БЕГРАМБЕКОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, А.А МАКАРОВ

Работа посвящена исследованию двухфазных тонких пленок Cu-W, осаждаемых при повышенных температурах, и их сравнительному анализу со слоями Cu-Fe, осажденными при аналогичных условиях. Исследовалась зависимость плазмоассистированного напыления пленок из потока распыленных атомов от взаимной концентрации напыляемых компонентов и количества осажденного материала. Также рассматривалось влияние дефектов на поверхности субстрата и температуры осаждения на морфологию напыленного слоя.

Исследовались следующие особенности формирующегося слоя:

- 1. Миграция компонентов по поверхности напыляемого слоя.
- 2. Зависимость среднего размера глобул от температуры.
- 3. Влияние материала подложки на формирование осажденного слоя.
- 4. Влияние дефектов подложки на формирование осажденного слоя.

Эксперименты показали, что для слоев Cu-W так же, как и для Cu-Fe [1] средний размер медных кристаллов растет с ростом температуры. Однако, средний размер медных кристаллов (глобул) для слоев Cu-W меньше чем для слоев Cu-Fe, напыленных в аналогичных условиях.

В ходе экспериментов было обнаружено существенное влияние материала подложки на морфологию напыленного слоя. В частности, в слоях, напыленных на молибденовую подложку, наблюдаются многочисленные нитевидные кристаллы-вискеры, а в слоях напыленных на нержавеющую сталь при аналогичных условиях, вискеры не наблюдались. В работе [2] было показано, что вискеры состоят из менее тугоплавкого компонента (в данном случае – меди) и растут, благодаря работе дислокационных источников, на участках с дефектной структурой, где формируется высокий уровень сжимающих напряжений. Поэтому, основываясь на полученных результатах, можно считать, что при близких параметрах кристаллической решётки Мо и W подвижность атомов тугоплавкого компонента – W уменьшалась, а это, в свою очередь, затрудняло формирование медных кристаллитов. В результате, на поверхности увеличивалось количество слабоструктурированных участков, на которых развивался высокий уровень напряжений и создавались условия для роста вискеров. Также обнаружено существенное влияние структурных дефектов поверхности подложки на структуру напыленного на них слоя. В частности, при напылении на дефектные участки

подложки из нержавеющей стали обнаруживались вискеры, в то же время на регулярной поверхности они не наблюдались (рис1).

Следует отметить, что вискеры растут между глобулами и их развитие происходит существенно быстрее, чем глобул. Вискеры начинают расти в начале дифференциации кристаллов меди по размерам и прекращают рост задолго до образования второго поколения зародышей на медных кристаллах. Скорость роста вискеров можно оценить как 100 нм/мин.

В целом эксперименты показали, что существенное влияние на структуру напыленного слоя оказывают материал подложки и его структурные дефекты, а также позволили выявить общие черты формирования двухфазных Cu-W и Cu-Fe слоев, напыляемых при повышенных температурах.



Рис.1. Си90%-W10%, толщина пленки 0.7 мкм.Т=600°С на нержавеющей стали

- 1. Л. Б. Беграмбеков, А. А. Гордеев, Я. А. Садовский, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные иссл. № 5, Май, 2008, С. 109.
- 2. Л.Б.Беграмбеков, Модификация поверхности твёрдых тел при ионном и плазменном облучении. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 3. Под ред. В.Е.Фортова. М: Наука, 2000, С. 126.

ХОЛОДНАЯ ЭМИССИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ГРАФИТА

<u>Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ</u>, В.А. КУРНАЕВ

Исследована зависимость холодной низкополевой эмиссии из образца графита МПГ-8. Исследуемый образец представлял собой параллелепипед с размерами 12x10x15мм. Его эмитирующая поверхность получена в результате разлома и из-за этого имеет повышенную пористость. Эта поверхность служила катодом в плоском диоде с зазором между электродами 2 мм.

Эксперимент длился в течение недели с постоянным подогревом образца до 400 °C от встроенного в образец вольфрамового нагревателя и периодическим прогревом стенок экспериментальной установки для снижения возможного влияния остаточных газов. Давление при разогретых стенках камеры не опускалось ниже 10^{-7} мбар. Несколько раз (около 10) образец разогревался до 750 °C. Первоначально (сразу после напуска атмосферы) давление при прогреве возрастало до $5 \cdot 10^{-5}$ мбар, затем с каждым разом прогревом уменьшалось до $9 \cdot 10^{-8}$ мбар, после чего подогрев образца был полностью отключен. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) измерялась спустя 5 мин, за которые образец успел остыть до комнатной температуры, (вакуум сразу после отключения прогрева опустился до 10^{-9} мбар). По сравнению с измерением сразу после атмосферы заметные токи стали возникать при вдвое больших напряженностях внешнего поля и характеризовались гораздо большей стабильностью (до обезгаживания эмиссия начиналась при 1.5 · 10^6 В/м).

При одних и тех же напряжениях со временем токи возрастают (рис.1), что вероятно, связано с адсорбцией газов на поверхности.





Рис. 1. Изменение BAX от времени нахождения в вакууме после прогрева образца

Рис. 2. Характеристики в зависимости от давления инертного газа (гелий)

Серия измерений, проведенная в гелии при различных его давлениях с временным интервалом между измерениями в 5 мин с последующим прогревом до 750 °C в вакууме 10^{-8} тор (рис. 2), показывает, что прогрев приводит к уменьшению эмитируемых токов. Также можно заключить, что эмиссия не зависит от давления в вакуумном промежутке (можно сравнить вольт амперные характеристики, полученные при давлениях 10^{-9} и 10^{-5} мбар на рис.2) и, по видимому, зависит не только от работы выхода (атомы гелия, адсорбируясь, почти не изменяют работу выхода). Согласно расчету по формуле Фаулера-Нордгейма для полевой эмиссии, экспериментально полученные токи совпадают с расчетными только при коэффициенте усиления внешнего поля $\beta \approx 230$. Серия расчетов для различных соотношений длин острий на плоскости к длине межэлектродного промежутка проведенная с помощью кода SIMION 7 показала невозможность существования такого большого коэффициента усиления для реально измеренного с помощью микроскопа рельефа поверхности данного образца графита.

Аналогичный результат был получен при насыщении образца водородом. Процедура насыщения включала в себя следующие этапы:

- многократный прогрев образца в вакууме до тех пока давление при прогреве не превысит 9.10⁻⁸ мбар
- напуск водорода до давления в несколько мбар и выдержка при этом давлении в течении суток
- откачку образца до давления 10⁻⁸ мбар.

Таким образом, проведенные эксперименты по зависимости тока эмиссии от напряжения в межэлектродном промежутке в сверхвысоковакуумных условиях (низком парциальном давлении активных газов) указывают на то, что ни гелий, ни водород практически не влияют на эмиссионные характеристики графита МПГ-8.

ДИССОЦИАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ВОЛЬФРАМА

К.А. МОШКУНОВ, В.А. КУРНАЕВ

Нейтральные и ионизированные молекулы водорода являются важной компонентой плазмы дивертора. Расчет баланса компонент и энергий в пристеночной плазме токамака требует данных о фрагментации молекулярных ионов водорода при отражении от поверхности в широком диапазоне энергий и для разных комбинаций поверхностей и падающих частиц. Исследование процесса диссоциации энергетичных молекул при отражении является важным с точки зрения фундаментальной науки, а вклады различных предложенных механизмов в процесс диссоциации вблизи поверхности твердого тела до сих не определены.

На кафедре физики плазмы при НИЯУ МИФИ на ионном монохроматоре [1] был проведен эксперимент, где в качестве подложки была использована поликристаллическая вольфрамовая мишень, которая бомбардировалась молекулярными ионами водорода с различным изотопным составом. Спектры отраженных на 6° ионов регистрировались магнитным спектрометром. Угол падения составлял 3°. Мишень перед облучением была отполирована и очищена пучком ионов аргона.

На основе измеренных спектров были посчитаны фракции выживших молекулярных ионов, как отношение площади соответствующего пика на спектре к площади всего спектра. Полученные зависимости от начальной энергии долей $D_2^+/(D_2^++D^+)$, $HD^+/(HD^++H^++D^+)$, $D_3^+/(D_3^++D_2^++D^+)$ и $D_2H^+/(D_2H^++D_2^++D^++HD^++H^+)$ представлены на рис.1. Фракции двухатомных фрагментов трехатомных ионов $HD^+/(D_2H^++D_2^++D^++HD^++H^+)$, $D_2^+/(D_2H^++D_2^++D^++HD^++H^+)$ и $D_2^+/(D_3^++D_2^++D^+)$ представлены на рис.2.





Рис.1. Доли в спектре выживших при отражении от вольфрама молекулярных ионов

и ис.2. доли в спектре обухатомных ионизированных фрагментов трехатомных молекулярных ионов, отраженных от вольфрама

Энергетические зависимости хорошо аппроксимируются функцией вида: $Y(E)=A \cdot \exp\{-E_n/B\}$, где E_n начальная энергия частиц, а A и B - подгоночные коэффициенты. Такая же аппроксимация подходит и для вероятности образования иона D_2^+ из D_2H^+ (рис.2). При отсутствии изотопных эффектов вероятность образования, посчитанная на основе комбинаторики, то есть вероятность выбрать два атома из трех, для HD⁺ из D₂H⁺ в 2 раза больше, а для D_2^+ из D₃⁺ - в 3, чем для D_2^+ из D₂H⁺. Это соответствует эксперименту – рис.2. Что касается выживших молекул (рис.1), то из приведенных зависимостей видно, что вероятность выживания зависит от количества атомов в молекуле, но не от ее изотопного состава.

Для трехатомных ионов показатель экспоненты B в 4.8 раза меньше, чем для двухатомных, то есть диссоциация трехатомных ионов требует гораздо меньших затрат энергии и более чувствительна к скорости молекулы. Доля выживших трехатомных ионов гораздо меньше доли получившихся ионизированных молекул, и основными компонентами спектра отраженных ионов являются одноатомные и двухатомные фрагменты. Для выживших двухатомных ионов и для двухатомных фрагментов трехатомных ионов зависимость от энергии, то есть B, оказывается одинаковой. Это позволяет заключить, что диссоциация трехатомных ионов происходит ступенчато: сначала от трехатомной молекулы отсоединяется атом, а затем двухатомная молекула продолжает полет, и по прошествии некоего времени диссоциирует независимо от отсоединившегося атома. То есть доминирующим процессом, приводящим к образованию одноатомных ионизированных фрагментов, является диссоциация двухатомных ионов, происходящая так же, как и для изначально двухатомных молекулярных ионов.

Литература

1. Мошкунов К.А., Курнаев В.А., Синельников Д.Н., Смирнов С.В.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. №3. С.3-6.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ

УСТАНОВКА МАГНЕТРОННОГО ТИПА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И ИОННОГО ВНЕДРЕНИЯ

<u>В. И. БУРЛАКА,</u> Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, А.А. РУСИНОВ, И.В. ВИЗГАЛОВ, С.Ф. ПЕРЕЛЫГИН

Экспериментальная установка «Магнетрон» была создана для изучения процессов захвата дейтерия в различные материалы, транспорта распыленного материала в плазме с магнитным полем и последующего переосаждения материала, в том числе соосаждения с дейтерием. Общая схема установки представлена на рис.1. Для откачки вакуумной системы используется турбомолекулярный Pfeiffer TPU 082 (10) с форвакуумным HBP - 4.5Д (13). Между насосами стоит адсорбционная ловушка (12), которая позволяет минимизировать попадание паров масла из форвакуумного насоса в вакуумный объем камеры. Предельное остаточное давление в камере не хуже 1×10⁻⁵ мбар.

Основным элементом установки является планарный магнетрон (16), в котором плазма генерируется вблизи катода (20). Он устанавливается на отдельном фланце и изолируется от камеры при помощи фторопластового изолятора (7), который является также и вакуумным уплотнением. Для охлаждения катода в процессе облучения предусмотрено водяное охлаждение (17). В качестве основного рабочего газа используется дейтерий, подаваемый в камеру из баллона (18) через натекатель (19).

Магнетрон изготовлен по классической схеме с [9] постоянным кольцевым магнитом, расположенным под катодом (20). Магнит в промежутке между собой и магнитопроводом создает магнитное поле арочного типа. Силовые линии электрического поля вблизи катода направлены по нормали к его поверхности. Таким образом, в приповерхностном слое катода. образуются скрещенные электрическое и магнитное поля. После напуска дейтерия при приложении напряжения между катодом и анодом происходит пробой газа и зажигается магнетронный разряд. Разряд имеет форму кольца, прижатого к катоду в области, где электрическое поле И магнитное поле перпендикулярны. Анодом являются стенки вакуумной камеры (4). Напряжение зажигания разряда 550 В, напряжение горения разряда 450-500 В.

На верхнем фланце вакуумной камеры установлено окошко (6) для визуального наблюдения за процессом облучения, а также съемный вакуумный ввод со столиком, который также может быть приспособлен для облучения и нанесения различных покрытий. На рис.2 представлен вид вакуумной камеры в разрезе.

Конструкция катода позволяет облучать одновременно большое количество образцов, находящихся как в сходных, так и различных условиях. Образцы могут устанавливаться как в разных местах на катоде, так и вне катода. В первом случае образцы облучаются плазмой в различных условиях, а во втором могут находиться либо под нулевым потенциалом и не облучаться ионами плазмы, либо



Рис. 1. Схема установки "Магнетрон": 1область разряда, 2-маска, 3- образцы, 4камера, 5- ввод движения, 6-окошко, 7изолятор, 8-магнитный электроразрядный преобразователь, 9- проходной клапан, 10 -ТМН, 11- проходной клапан, 12- ловушка, 13форнасос, 14-блок питание, 15- вольтметр, 16магнетронный узел, 17- водяное охлаждение, 18-баллон D₂ с редуктором, 19-натекатель, 20катод



Рис. 2. Вид вакуумной камеры в разрезе

под потенциалом смещения и облучаться ионами плазмы. Таким образом, возможно изучение захвата дейтерия и соосаждения дейтерия и материала катода в различных условиях.

Отработана методика работы с установкой и подобраны необходимые рабочие параметры. Проведена серия экспериментов по плазменному облучению графита МПГ-8.

6. ОБЗОРЫ О РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ НАНОИНДУСТРИИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ДО 2015 ГОДА

А.В. ХЛУНОВ¹, А.В. НАУМОВ², В.Ф. ФЕДОРКОВ², С.Ф. ОСТАПЮК², А.А. ШМАКОВ², В.В. КОНДАКОВ², Л.И. БУГАЙЧЕНКО², О.Д. АНАШИНА², А.Г. САВЧЕНКО³

¹Аппарат Правительства Российской Федерации ²Министерство образования и науки Российской Федерации ³Федеральное агентство по науке и инновациям

За прошедшие несколько лет руководством страны принят ряд системных решений и базовых документов по развитию наноиндустрии. Ключевым документом в этом плане является президентская инициатива «Стратегия развития наноиндустрии» (утверждена 24 апреля 2007 г. № Пр-688), согласно которой в ближайшие годы на основе нанотехнологий в России должен быть сформирован принципиально новый базис экономики.

Для реализации президентской инициативы в июне 2007 года был создан Правительственный совет по нанотехнологиям, преобразованный затем в Правительственную комиссию по высоким технологиям и инновациям (постановление Правительства Российской Федерации от 22 мая 2008 г. № 379). В целях оперативного рассмотрения конкретных вопросов по наиболее важным направлениям развития наноиндустрии при Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям были созданы четыре рабочие группы: по координации развития нанотехнологий и наноиндустрии, по разработке нормативно-правовой базы наноиндустрии, по повышению эффективности энергопотребления на основе применения функциональных наноматериалов в топливно-энергетическом комплексе и по медико-санитарному обеспечению безопасности наноиндустрии.

В целях содействия реализации государственной политики в сфере нанотехнологий в соответствии с Федеральным законом от 19 июля 2007 г. № 139-ФЗ была организована государственная корпорация «Российская корпорация нанотехнологий» (ГК «Роснанотех»).

В мае 2008 года в соответствии с поручением Правительства Российской Федерации была принята к исполнению Программа развития наноиндустрии в Российской Федерации до 2015 года (далее – Программа). Стратегическая цель Программы состоит в том, чтобы сформировать в России сектор наноиндустрии, способный конкурировать с наиболее экономически развитыми странами мира по всем направлениям, влияющим на технологическую и экономическую безопасность, обороноспособность России, а также на качество жизни ее населения.

В Программе обозначены инструменты и конкретные шаги по реализации президентской инициативы «Стратегия развития наноиндустрии», а также индикаторы, позволяющие контролировать выполнение поставленных задач. Основными участниками Программы являются федеральные органы исполнительной власти, государственные академии наук (РАН, РАМН, РАСХН), государственные корпорации «Росатом» и «Роснанотех», РНЦ «Курчатовский институт» и специализированные фонды. Координатором Программы в целом определено Минобрнауки России, техническим координатором – Федеральное агентство по науке и инновациям (Роснаука), научным координатором – РНЦ «Курчатовский институт».

Программа определяет следующие приоритетные виды деятельности в сфере нанотехнологий:

- фундаментальные исследования нанообъектов и наносистем;
- разработка нанотехнологий и наносистем (включая наноматериалы и наноустройства) для нужд медицины, экологии, энергетики и машиностроения;
- производство нанотехнологической продукции;
- метрология и стандартизация;
- обеспечение наноиндустрии кадрами и оборудованием.

Финансирование Программы предусмотрено по следующим трем направлениям: «научные исследования и разработки», «создание инфраструктуры наноиндустрии» и «инновационные проекты развития наноиндустрии». Основными инструментами финансирования Программы являются: по направлению «научные исследования и разработки» – федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (запланированный объем финансирования составляет порядка 68 млрд. рублей), по направлению «создание инфраструктуры наноиндустрии» – федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры наноиндустрии» и в Российской Федерации на 2008-2010 годы» (объем финансирования – порядка 31 млрд.

рублей), по направлению «инновационные проекты развития наноиндустрии» – средства ГК «Роснанотех» (запланированный объем инвестиционных вложений корпорации составляет порядка 217,5 млрд. рублей).

Общий объем финансирования работ по реализации Программы (с учетом задействованных федеральных, ведомственных и иных целевых программ, а также средств, выделяемых специализированными фондами) должен составить не менее 318 млрд. рублей. При этом предполагается поддержка всего инновационного цикла - от фундаментальных исследований до непосредственного производства нанотехнологической продукции. Основные ожидаемые результаты реализации Программы к 2015 году: объем продаж российской продукции наноиндустрии должен составить не менее 900 млрд. рублей; доля российской продукции в общем объеме продукции наноиндустрии, реализованной на мировом рынке, должна быть не менее 3%. Важно отметить, что речь идет, в первую очередь, о продукции массового потребления, ориентированной на население.

Запланированные на 2008 год значения основных показателей решения задач Программы были достигнуты: объем продаж российской продукции наноиндустрии составил 20 млрд. рублей, объем экспорта продукции наноиндустрии – 4 млрд. рублей. Кроме того, было создано 1750 новых рабочих мест и выдано 237 патентов на изобретения в сфере нанотехнологий. По итогам анализа информационного поля общее количество опубликованных в российских средствах массовой информации материалов, имеющих непосредственное отношение к Программе, составило 1080 единиц (при этом доля негативных публикаций оказалась менее 2%). Таким образом, в обществе сформировалось в целом положительное отношение к идее и процессу формирования и развития отечественной наноиндустрии.

Одной из главных задач Программы является создание национальной нанотехнологической сети (далее – ННС), которая формируется как совокупность организаций различных форм собственности, обеспечивающих и (или) осуществляющих скоординированную деятельность по разработке и (или) коммерциализации нанотехнологий, включая проведение фундаментальных и прикладных исследований, подготовку, переподготовку и повышение квалификации кадров, развитие инфраструктуры наноиндустрии, организацию производства и непосредственное производство нанотехнологической продукции. Главная цель создания ННС – обеспечить в сфере нанотехнологий межотраслевую координацию, концентрацию ресурсов на приоритетных направлениях исследований и разработок, повышение эффективности работ и благоприятные условия для ускоренного введения в хозяйственный оборот новой конкурентоспособной продукции.

В настоящее время в состав ННС входят 50 организаций, в том числе 40 вузов. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 2 августа 2007 г. № 498 определены головные организации отраслей по тематическим направлениям деятельности ННС (далее – головные организации ННС): «наноэлектроника» – НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина, «наноинженерия» – МИЭТ, «функциональные наноматериалы для энергетики» – ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, «функциональные наноматериалы для космической техники» – Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, «нанобиотехнологии» – РНЦ «Курчатовский институт», «конструкционные наноматериалы» – ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» и Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ), «композитные наноматериалы» – ВИАМ, «нанотехнологии для систем безопасности» – ЦНИИ химии и механики, «функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» – ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН.

Следует отметить, что на долю головных организаций ННС в 2008 году пришлось почти 25% патентов, при их участии было произведено почти 50% российской нанотехнологической продукции. Это свидетельствует о том, что ННС действительно становится ядром отечественной наноиндустрии.

Среди основных результатов реализации Программы в 2008 - 2009 годах можно отметить следующие:

- завершаются работы по реконструкции, переоснащению и техническому перевооружению головных организаций ННС (в настоящее время степень технической готовности большинства объектов составляет 60 - 80%);
- реконструирован и введен в эксплуатацию научно-технологический центр нано- и микросистемной техники на базе МИЭТ;
- оснащены современным научным оборудованием 12 научно-образовательных центров по направлению «нанотехнологии»;
- создана инфраструктура и обеспечено функционирование опорной высокоскоростной сети (ГРИДсистема) для передачи данных между центрами ННС;
- запущен в эксплуатацию федеральный Интернет-портал «Нанотехнологии и наноматериалы» (www.portalnano.ru), который в настоящее время является основным официальным источником информирования широкой общественности о ходе и результатах реализации Программы (ежедневно портал посещают порядка 3 тысяч пользователей);

- в рамках проекта «Создание системы мониторинга исследований и разработок в области нанотехнологий и наноматериалов» сформированы специализированные базы данных, содержащие информацию о почти 1300 организациях, осуществляющих деятельность в сфере нанотехнологий;
- созданы 7 региональных и 9 отраслевых отделений инфраструктуры Центра метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологий и продукции наноиндустрии;
- сформирована система консультационной и методической поддержки патентно-лицензионной деятельности региональных организаций ННС (более 80 действующих консультационных пунктов в 52 регионах России);
- разработаны отраслевые и межотраслевая технологические дорожные карты развития отечественной наноиндустрии;
- осуществляется закупка учебно-методического обеспечения программ высшего и среднего профессионального образования по тематическим направлениям деятельности ННС;
- доступ к различным составляющим инфраструктуры наноиндустрии уже получили почти 400 организаций, в том числе не являющихся участниками ННС (общая стоимость предоставленных им услуг составила более 600 млн. рублей).

О КРИТЕРИЯХ ОТНЕСЕНИЯ ПРОДУКЦИИ К КАТЕГОРИИ «ПРОДУКЦИЯ НАНОИНДУСТРИИ»

С.Ф. ОСТАПЮК¹, А.А. ШМАКОВ¹, В.В. КОНДАКОВ¹, О.Д. АНАШИНА¹, О.С. НАРАЙКИН², М.В. ПОПОВ²

¹Министерство образования и науки Российской Федерации ²РНЦ «Курчатовский институт»

Основным фактором, препятствующим формированию адекватного перечня продукции отечественной наноиндустрии по видам экономической деятельности, является отсутствие в аналитическом обеспечении сферы нанотехнологий критериев, позволяющих однозначно отнести ту или иную продукцию (товары, работы, услуги) к категории «продукция наноиндустрии». В настоящей работе предложен алгоритм выявления и классификации продукции наноиндустрии.

Основа понятийного аппарата в сфере нанотехнологий заложена в Программе развития наноиндустрии в Российской Федерации до 2015 года:

нанообъект – объект, линейный размер которого хотя бы в одном измерении имеет величину порядка 1 – 100 нм;

наносистема (в том числе наноматериал) – система, содержащая структурные элементы – нанообъекты, определяющие ее основные свойства и характеристики в целом;

нанотехнологии – технологии, направленные на создание и эффективное практическое использование нанообъектов и наносистем с заданными свойствами и характеристиками;

наноиндустрия – межотраслевой и междисциплинарный комплекс бизнес-структур, промышленных, научных, образовательных, финансовых и иных организаций различных форм собственности, обеспечивающих и (или) осуществляющих целенаправленную деятельность по разработке и (или) коммерциализации нанотехнологий;

продукция наноиндустрии (нанотехнологическая продукция) – продукция (товары, работы, услуги), произведенная с использованием нанотехнологий и обладающая вследствие этого ранее недостижимыми технико-экономическими показателями.

Для упрощения процедуры выявления и классификации нанотехнологической продукции целесообразно ввести дополнительное понятие – коэффициент проникновения нанотехнологий, характеризующий долю нанотехнологической составляющей в себестоимости продукции наноиндустрии.

В целях классификации и осуществления статистического наблюдения в сфере нанотехнологий предлагается выделить 3 группы нанотехнологической продукции: первичная нанотехнологическая продукция, наносодержащая продукция и нанотехнологические услуги.

Нанотехнологическая продукция группы 1 (первичная нанотехнологическая продукция) – продукция наноиндустрии, созданная непосредственно с применением нанотехнологий, включая базовое сырье для наноиндустрии (например, нанопорошки, наноматериалы и особо чистые вещества).

Нанотехнологическая продукция группы 2 (наносодержащая продукция) – продукция, содержащая нанотехнологические компоненты (нанообъекты, наносистемы). Нанотехнологические компоненты могут представлять собой первичную нанотехнологическую продукцию или наносодержащую продукцию с более высоким коэффициентом проникновения нанотехнологий.

Нанотехнологическая продукция группы 3 (нанотехнологические услуги) – услуги, оказание которых связано с использованием нанотехнологий или технологий применения первичной нанотехнологической и (или) наносодержащей продукции.

Для отнесения продукции (товаров, работ, услуг) к категории «продукция наноиндустрии» необходимо ее соответствие одновременно качественным (основному и, по меньшей мере, одному из дополнительных), а также количественному критериям.

Основным качественным критерием отнесения продукции к категории «продукция наноиндустрии» является наличие принципиально нового потребительского качества, полученного за счет применения наноматериалов и нанотехнологий.

Для выделенных групп нанотехнологической продукции предлагается установить следующие дополнительные (уточняющие) качественные критерии соответствия.

Для нанотехнологической продукции группы 1 (первичная нанотехнологическая продукция):

размер изделия или его структурных составляющих, определяющих функциональные свойства и потребительские характеристики изделия, хотя бы в одном измерении составляет порядка 1 - 100 нм (исключение – продукция нанобиотехнологий, для которой верхняя граница определяется размерами белков, ДНК, биологических молекул и пр., составляя величину порядка 300 нм);

изделие создано путем манипулирования отдельными атомами и молекулами или его функциональные свойства определяются проявлением квантовых эффектов;

продукция произведена с использованием биохимических технологий геномики, протеомики и системной биологии, используется для манипуляции живой материей на молекулярном уровне или обеспечивает возможности для такой манипуляции.

Первичная нанотехнологическая продукция может являться как самостоятельным товаром, так и компонентом наносодержащей продукции.

Для нанотехнологической продукции группы 2 (наносодержащая продукция):

нанотехнологические компоненты (нанообъекты, наносистемы) наносодержащей продукции должны определять ее функциональные свойства и потребительские характеристики.

Для нанотехнологической продукции группы 3 (нанотехнологические услуги) дополнительным (уточняющим) качественным критерием соответствия является принадлежность к категориям услуг:

по метрологическому обеспечению наноиндустрии (включая контроль, оценку соответствия, стандартизацию и сертификацию качества продукции наноиндустрии);

по осуществлению контроля с применением нанодатчиков (включая экологический контроль, обеспечение ядерной безопасности, выявление наличия биологически и химически опасных веществ, включая наркосодержащие, взрывчатые и отравляющие вещества);

по нанесению наноструктурных покрытий (функциональных, декоративных и пр.);

медицинского назначения.

В качестве количественного критерия отнесения продукции к категории «продукция наноиндустрии» предлагается установить критерий: КПН ≥ КПН_{min}, где КПН – коэффициент проникновения нанотехнологий в продукцию, КПН_{min} – нормативно установленное минимальное значение КПН для данного вида продукции.

Рассмотренный алгоритм отнесения продукции к категории «продукция наноиндустрии» сочетает качественный подход к определению категории «продукция наноиндустрии» с количественным подходом, основанным на использовании понятия «коэффициент проникновения нанотехнологий». Сочетание «качественных» и «количественного» критериев позволяет минимизировать субъективную составляющую при выявлении нанотехнологической продукции.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПЕРЕЧЕНЬ ТРУДОВ КАФЕДРЫ ЗА 2009 ГОД

Международные журналы

- 1. A. Pisarev, T. Tanabe, B. Emmoth, N. Trifonov, A. Rusinov, S. Stepanov, Yu. Gasparyan, A. Spitsyn, B. Khripunov. Deuterium accumulation in carbon materials at high fluencies // Journal of Nuclear Materials, 390-391 (2009) 677-680.
- 2. A.V.Golubeva, M.Mayer, Yu.M. Gasparyan, J.Roth, V.A.Kurnaev. The ion-driven permeation experiment PERMEX // Review of Scientific Instruments, 80 (2009) 073501.
- A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, J.P. Gunn, C. Grisolia, A. Kuzmin, T. Loarer, M. Lipa, P. Monier-Garbet, P. Shigin, E. Tsitrone, A. Zakharov. Deuterium trapping in carbon fiber composites exposed to D plasma // Journal of Nuclear Materials, 390-391 (2009) 589-592.
- 4. L.B. Begrambekov, A.S. Kuznetsov, P.A. Shigin. Hydrogen trapping in depositing carbon films // Journal of Nuclear Materials, 390-391 (2009) 678- 685.
- 5. Yu.M. Gasparyan, A.V. Golubeva, M. Mayer, A.A. Pisarev, J.Roth. Ion-driven deuterium permeation through tungsten at high temperatures // Journal of Nuclear Materials, 390-391 (2009) 606-609.
- 6. *A.Pisarev.* Hydrogen gas driven permeation through asymmetric membranes // Journal of Membrane Science 335 (2009) 51-57.

Отечественные журналы

- 7. *А.А. Русинов, Ю.М. Гаспарян, С.Ф. Перелыгин, А.А. Писарев, С.О. Степанов, Н.Н. Трифонов.* Стенд для термодесорбционных измерений // Приборы и техника эксперимента, 2009, №6, С. 116-121.
- 8. Айрапетов А.А., Беграмбеков Л. Б., Захаров А. М., Кузьмин А. А., Садовский Я.А., Шигин П.А. Захват и удержание кислорода и дейтерия в углеграфитовом композите при облучении в дейтериевой плазме с примесью кислорода // ВАНТ серия термоядерный синтез, 2009, вып.3, С.25-30.
- 9. Гуторов К.М., Визгалов И.В., Курнаев В.А. Генератор интенсивного плазменного потока на основе геликоннного разряда // Прикладная физика, 2009, №5, С.73-75.
- 10. Кузьмин А. А., Айрапетов А.А., Беграмбеков Л. Б. Исследование захвата и удержания изотопов водорода в тайлах токамака TORE SUPRA // ВАНТ. Серия «Термоядерный синтез», 2009, вып.3, С.30-35.
- 11. Мошкунов К.А., Курнаев В.А., Русинов А.А., Шмид К., Вильтнер А., Якоб В. Характеристики пленок, полученных при боронизации стенок в токамаке ASDEX Upgrade, и их влияние на захват дейтерия вольфрамом // ВАНТ. Серия «Термоядерный синтез», 2009, вып.4, С.24-29.
- 12. Ю.М. Гаспарян, С.О. Степанов, А.А.Русинов, Н.Н.Трифонов, А.А.Писарев. Термодесорбция ионноимплантированного дейтерия из вольфрама // ВАНТ, серия «Теоретическая и прикладная физика», 2009, №1, С.26-31.
- 13. Ярко С.С., Цветков И.В., Писарев А.А. Расчетные исследования термодесорбции ионноимплантированного водорода в вольфрам // ВАНТ. серия «Теоретическая и прикладная физика», 2009, №1, С.39-48.
- 14. *Цвентух М.М.* Применение внутренних витков в длинных замкнутых магнитных ловушках // Физика плазмы, 2009, Т. 35, №4, С. 381-384.
- 15. Башутин О.А., Савёлов А.С., Вовченко Е.Д. Пространственное распределение рентгеновского излучения низкоиндуктивной вакуумной искры // Физика плазмы, 2009, Т. 35, №10, С. 883-888.
- 16. Колтунов М.В., Лемешко Б.Д., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х., Юрков Д.И., Сидоров П.П. Исследование импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса в широком энергетическом диапазоне // Препринт НИЯУ МИФИ, №002, 2009, 14 стр.

Международные конференции

- 1. *V.M.Zhdanov, V.I.Roldugin.* Asymmetry of separation effect in gas mixture flows through composite membranes // Book of Abstracts XXIY International Symposium on Physicochemical Methods of Separation "ARS Separatoria-2009", Poland, 2009, P.12
- V.M.Zhdanov, V.I.Roldugin. Effect of surface forces on gas mixture separation in nanoporous bodies // Book of Abstracts Intern.. Conference PERMEA 2009, Prague 2009, P.104
- 3. *A.Rusinov, Yu.Gasparyan, P.Pyankov, N.Trifonov, A.Pisarev.* Radiation defects in tungsten bombarded with low flux 10 keV D3+ ions // 12th International Workshop on Plasma Facing Materials and Components for Fusion Applications, Juelich, Germany, 2009.

- 4. *Yu.Gasparyan, M.Mayer, A.Pisarev, J.Roth, A.Wiltner, C.Adelhelm, M.Rasinski.* Deuterium ion-driven permeation through carbon coated tungsten // Book of abstracts of 12th International Workshop on Plasma Facing Materials and Components for Fusion Applications, Juelich, Germany, 2009.
- A. Rusinov, N.Trifonov, Yu.Gasparyan, B.Khripunov, M.Mayer, J.Roth, A.Pisarev. Deuterium retention in graphite, exposed to high flux plasma ions at high temperatures // Book of abstracts of 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, ICFRM-14, Sapporo, Japan, September 7-12, 2009.
- 6. Yu. Gasparyan, M. Mayer, A. Pisarev, J. Roth, A. Wiltner, C. Adelhelm, M. Rasinski. Deuterium ion-driven permeation through tungsten at elevated temperatures // Book of abstracts of 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, ICFRM-14, Sapporo, Japan, September 7-12, 2009.
- 7. *M.M. Tsventoukh*. Plasma MHD equilibrium consistent with convective stability // Proc, 36th European Physical Society (EPS) conference on Plasma Physics, June 29 July 3, 2009, Sofia, Bulgaria, P1.107.
- 8. *M.M. Tsventoukh*. Closed magnetic confinement system with internal current rings // Proc, 36th European Physical Society (EPS) conference on Plasma Physics, June 29 July 3, 2009, Sofia, Bulgaria, P1.108.
- M.M. Tsventoukh. Self-consistent modeling of a convective stability and MHD-equilibrium of collisionless plasmas // 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, Lisboa, Portugal Oct. 6-9 2009, P1.040.
- 10. Беграмбеков Л. Б., Айрапетов А. А., Вергазов С.В., Кузьмин А.А., Шигин П.А. Закономерности и механизмы захвата дейтерия в углеграфитовые материалы при облучении в плазме // Международная школа молодых ученых и специалистов им.А.А.Курдюмова "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'09-Junior. 5-9 июля 2009 г., г. Саров
- 11. Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Кузьмин А.А., Шигин П.А. Удаление кислорода из СFC, облученного в дейтериевой плазме с примесью кислорода // // Международная школа молодых ученых и специалистов им.А.А.Курдюмова "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'09-Junior. 5-9 июля 2009 г., г. Саров
- 12. Л. Б. Беграмбеков, А. А. Айрапетов, С.В. Вергазов, А.А. Кузьмин, П. А. Шигин. Захват и удержание дейтерия в углеграфитовых материалах, облучаемых в плазме // XIX Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью, Звенигород, 2009.
- A.A. Rusinov, Yu.M. Gasparyan, P.D. Pyankov, S.F. Perelygin, N.N. Trifonov, A.A. Pisarev, S. Lindig, J. Roth, M. Mayer. Pores creation in tungsten under 10 keV D3+ bombardment // Труды XIX Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью, Звенигород, 2009, T.2, C.139-141.
- 14. Yu.M. Gasparyan, M.S. Polyanskiy, A.A. Rusinov, S.S. Yarko, S.F. Perelygin, N.N. Trifonov, A.A. Pisarev. Deuterium retention in intrinsic defects of polycrystalline tungsten // Труды XIX Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью, Звенигород, 2009, T.1, C.338-340
- 15. И.А. Щелканов, Г.В. Ходаченко, Г.В. Крашевская, И.Е. Орлов, М.В. Атаманов, А.А. Юрченко, К.А. Купцов. Модификация поверхности титанового покрытия в плазме ВЧ разряда // Труды XIX международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». Звенигород, 2009. Т.2, С. 410-413.
- 16. *Когут Д.К., Трифонов Н.Н.* Моделирование изменения микрорельефа поверхности мишени при ионном облучении // Труды XIX международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». Звенигород, 2009.
- 17. 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 взаимосвязь с условиями имплантации и удержания // Труды XIX Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью, Звенигород, 2009.
- 18. Цвентух М.М. Параметры плазмы в ловушках со спадающим полем в зависимости от анизотропии // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 9-13 февраля 2009. С.53.
- 19. Бойко С.А., Крашевская Г.В., Курнаев В.А., Салахутдинов Г.Х., Цвентух М.М. Быстрые электроны в ЭЦР плазме низкого давления удерживаемой в двухдипольной ловушке Магнетор // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 9-13 февраля 2009. С.54.

Отечественные конференции

20. В.М.Жданов, В.И. Ролдугин. Об эффекте анизотропии разделительных свойств многослойных пористых мембран // Сб. тезисов докл. XII Международной научной конференции "Физикохимические процессы при селекции атомов и молекул", Звенигород 2009, С.16

- 21. Беграмбеков Л. Б., Гордеев А.А., Макаров А.А. Осаждение двухфазных металлических слоев при высоких температурах // Сборник трудов 8-ой Всероссийской с международным участием научнотехническая конференция быстрозакаленные материаллы и покрытия, 2009, С.189-197
- 22. В.А.Курнаев, И.В.Егоров, Е.А.Гриднева. Сверхвысоковакуумный зонд Ленгмюра // Труды 13-ой конференции по диагностике высокотемпературной плазмы, 2009
- 23. Г.В. Крашевская, А.Ю. Соколов, Г.В. Ходаченко, И.А. Щелканов, Т.В.Шукшин. Распад плазмы импульсного магнетронного разряда большой мощности // Тезисы докладов 3-й Всероссийской молодежной школы-семинара с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», 2009
- 24. Писарев А.А., Бурлака В.И., Крашевская Г.В., Русинов А.А., Ходаченко Г.В., Мисожников Л.В., Юркевич И.Н. Диагностика свойств конденсаторной фольги с развитой наноструктурированной поверхностью // Тезисы докладов 3-й Всероссийской молодежной школы-семинара с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», 2009
- 25. Бужинский Р.О., Козин Г.И., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Терёхин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционным микроскопом с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Тезизы докладов 13 Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Троицк, июнь 2009 г.
- 26. Губский К.Л., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Мокрецов М.О., Антонов А.С. Двухволновый гетеродинный интерферометр для измерения электронной плотности в слабоионизованном газе атмосферного давления // Тезизы докладов 13 Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Троицк, июнь 2009 г.
- 27. Башутин О.А., Бялковский О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Автономная импульсная плазменная установка для исследования разряда типа Zпинч // Тез. докл. 3 Всероссийской молодежной школы-семинара «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», Москва – Технопарк ФИАН, октябрь 2009 г.
- 28. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Экспериментальная установка и диагностические средства для исследования микропинчевого разряда // Тез. докл. VII Курчатовской молодежной научной школы, Москва, ноябрь 2009 г.
- 29. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Экспериментальное наблюдение взаимосвязи процессов на электродах и в межэлектродном промежутке микропинчевого разряда // Сб. докл. Второй Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, г.Саров, 2009 г.
- 30. Башутин О.А., Бялковский О.А., Кузнецов А.П., Равлина Е.А., Савёлов А.С. Интерферометрические исследования плотности плазмы в периферийной относительно оси микропинчевого разряда области // Сб. докл. Второй Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, г.Саров, 2009 г.
- 31. Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Терёхин А.Н., Бужинский Р.О. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционным микроскопом с усилителем яркости на основе лазера на парах меди" // Сб. научных трудов научной сессии МИФИ – 2009, т.4, с.187-190.

Монографии

1. В.М.Жданов. Процессы переноса в многокомпонентной плазме, М.: Физматлит, 2009, 278 с.

Издания кафедры

1. Годовой отчет по НИР за 2008 год (ISBN 978-5-7262-1178-7) Ред .В.А.Курнаев М.МИФИ 2009, 56с. +22 докладов были представлены на научной сессии МИФИ 2009 и опубликованы в ее трудах.

Научно-организационные мероприятия, проведенные кафедрой в 2009г.

- 1. Секция "Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез" на научной сессии МИФИ-2009, Москва, 27-29 января 2009 г.
- 2. XII Межотраслевой семинар "Взаимодействие плазмы с поверхностью", Москва, 30 января 2009г. (выпущен CD диск).
- 3. XIX Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» 21-25 августа 2009г., Звенигород

ДИПЛОМНЫЕ ПРОЕКТЫ, ЗАЩИЩЕННЫЕ СТУДЕНТАМИ КАФЕДРЫ В 2009 ГОДУ	С
ПРИСВОЕНИЕМ КВАЛИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕР-ФИЗИК	

N⁰	Фамилия И.О.	Руководитель	Тема дипломного проекта		
	T11-21				
1	1 Абраменко Д.Б. Афонин О.Н., ФИАН Создание установки «Течь» для				
			исследования спектроскопического		
			метода диагностики микротечей при		
			помощи разряда в полом катоде		
2.	Бойко С.А.	Ходаченко Г.В., НИЯУ	Исследование высокоэнергетичной		
		МИФИ	группы электронов на установке		
			Магнетор		
3.	Быков И.О.	Курнаев В.А., НИЯУ	Установка для исследования		
		МИФИ	электродинамических воздействий на		
			плазменно-пылевые структуры в ВЧ		
4	Deven UD		разряде		
4.	Вислов И.В.	Акишев Ю.С.,	получение гидрофооности на		
		ТРИНИТИ	поверхности пленок и ткани с		
			барьериого разряна		
5	Вородзера И В	Косцирев Ф.К	Получение нанотрубок нитрила бора		
5.	Боропасва И.Б.	тринити	путем дазерной аблящии		
6	Лодудад Э И	Савелов А.С. НИЯУ	Лиагностика процессов в плазме		
0.	Hodyshud O.I.I.	МИФИ	микропинчевого разряда и на		
			поверхности электролов		
7.	Маркина Е.А.	Визгалов И.В., НИЯУ	Вторично-эмиссионная неустойчивость		
		МИФИ	плазменно-поверхностного контакта при		
			наличии тонких диэлектрических слоев		
8.	Мишуровский А.К.	Красюков А.Г.,	Исследование физических процессов при		
		ТРИНИТИ	дистанционной двулучевой лазерной		
			резке		
9.	Ощепков П.В.	Голубев А.А., ИТЭФ	Экспериментальное исследование		
			параметров линейного сильноточного		
			разряда Z –пинч для установки ТВН-		
10			ИТЭФ		
10.	Петров Д.Б.	Мозгрин Д.В., НИЯУ	Получение и исследование режимов СДР		
		МИФИ	в системе с профилированными Аг		
			электродами в смеси инертных и		
11		Писарев А А НИЯУ	Изуление заувата иснов лейтерия в		
11.	пвликов п.д.	МИФИ	вольфрам методом термолесорбнионной		
			спектроскопии		
12	Сараннар С Л	Capedon A.C. HIARV			
12	Саранцев С.А.	МИФИ	Автономная импульсная плазменная		
10					
13	Степаненко А.М.	Крауз В.И, РНЦ КИ	Спектроскопические исследования		
			рентгеновского излучения установок типа		
			«плазменный фокус»		
-		E11-04			
1.	ьалакирев А.А.	Акишев Ю.С.,	Динамика формирования электрических		
		ТРИНИТИ	разрядов в гетерофазной среде газ –		
L			жидкии аэрозоль		
2.	Крутиков В.В.	Беграмбеков Л.Б.,	Разработка масс-спектрометрического		
		нияу мифи	зонда для токамака Т-11М		
3.	Мамедов Н.В.	Курнаев В.А., РНЦ КИ	Исследование характеристик		
			импульсного разряда в магнетроне с		
			управляемым магнитным полем		

6.	Пшенов А.А.	Морозов Д.Х., НИЯУ МИФИ	Использование модуляции мощности ЭЦР-нагрева для облегчения преодоления радиационного барьера в термоядерных установках
7.	Пиняева И.А.	Салахутдинов Г.Х., НИЯУ МИФИ	Методы восстановления спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы



В день защиты дипломов 20.02.2009 в первом ряду (слева направо): В.А. Иванов, Г.С.Воронов, А.С.Савелов, Б.А.Трубников, Н.Г.Ковальский, В.П.Смирнов, В.С.Стрелков, В.А.Курнаев, Л.Б.Беграмбеков, Г.В.Крашевская

Защищенные диссертации

- 1. М.М. Цвентух. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. «Магнитное удержание плазмы в ловушках со спадающим полем при самосогласованном поддержании конвективно-устойчивого распределения давления»
- 2. Ю.М. Гаспарян. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. «Захват и газовыделение дейтерия при ионном внедрении в вольфрам»
- 3. П.А. Шигин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. «Захват водорода в осаждаемые в плазме углеродные слои»

СПИСОК СОТРУДНИКОВ И АСПИРАНТОВ КАФЕДРЫ

Штатные преподаватели

Беграмбеков Л.Б.	проф.
Визгалов И.В.	доцент
Дудкина Т.Д.	доцент
Жданов В.М.	проф.
Жданов С.К.	доцент
Захаров А.М.	ст. преп.
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
Фетисов И.К.	проф.
Цветков И.В.	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.	доцент (ИЯС РНЦ)
Кирнева Н.А.	доцент (ИЯС РНЦ)
Ковыльникова В.Н.	инженер
Кутеев Б.В.	проф. (ИЯС РНЦ)
Мирнов С.В.	проф. (ТРИНИТИ)
Мозгрин Д.В.	доцент (Минобрнауки)
Морозов Д.Х.	проф. (ИЯС РНЦ)
Наумов В.Г.	проф. (ТРИНИТИ)
Стрелков В.С.	проф. (ИЯС РНЦ)
Трубников Б.А.	проф. (ИЯС РНЦ)
Черковец В.Е.	проф. (ТРИНИТИ)

Учебно-вспомогательный персонал

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

Аспиранты

Айрапетов А. Быков И.О. Гаспарян Ю.М. Гуторов К.М. 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. Ярко С.С.

Докторанты

Саенко В.В.

Научный сектор

-	-
Башутин О.А.	H.C.
Бердникова М.М.	инж. 1 кат.
Борисюк Ю.В.	инж. 1 кат.
Вайтонис В.В.	M.H.C.
Вергазов С.В.	H.C.
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.	M.H.C.
Коборов Н.Н.	M.H.C.
Кондаков В.В.	н.с., к.ф.м.н.
Королев Л.В.	вед. инж
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.	H.C.
Ходаченко Г.В.	с.н.с., к.ф.м.н.
Шигин П.А.	инж.
Шукшина Т.В.	инж. 1 кат.
Голубева А.В.	совм. к.ф.м.н.
Спицын А.В.	совм. к.ф.м.н.
Цвентух М.М.	совм. к.ф.м.н.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ РАБОТ

Анашина О Л	27.28
	16
	22.22
	22,23
	0
Бугаиченко С.И.	27
<u>Бурлака В.И.</u>	21,26
Бялковский О.А.	18
Визгалов И.В.	10,26
Вовченко Е.Д.	16,17
Гаспарян Ю.М.	20,21,26
Губский К.Л.	19
Гордеев А.А.	23
Гуторов К.М.	10
Лодупад Э.И.	16
Жданов В М	5
Жестпиевский П А	17
Kazuna A B	12 11
Kauauauka C II	13,14
	20
Коноаков В.В.	27,28
<u>Kpam C.A.</u>	21
Крашевская Г.В.	6,13,15
Кузнецов А.П.	18,19
Кузнецов А.С.	22
<u>Макаров А.А.</u>	23
Маренков Е.Д.	9
Мошнин М.В.	17
Мошкунов К.А.	25
Нарайкин О С	28
Havmor A R	27
ODDOR // E	15
$O_{\text{стаплок}} C \Phi$	27.28
	27,20
$\Pi e p e \pi b e u H C. \Psi$.	20
Писарев А.А.	9,20,21,26
<u>Полянский М.С.</u>	20
Попов М.В.	28
<u>Раевский И.Ф.</u>	19
<u>Румянцев С.А.</u>	17
Русинов А.А.	20,21,26
Савелов А.С.	11,16,17,18,19
Савченко А.Г.	27
Сараниев С.А.	11.16.18.19
Синельников Л Н	20.24
Сопоматин С А	17
Coronoe A M	10
	17
$\underline{Oy}_{\lambda O B} \overline{\Pi}_{INI}$	17
<i>чеоорюк</i> в. <i>Ф</i> .	21
хлунов А.В.	27

Ходаченко Г.В.12,13,14,15Цвентух М.М.6,7Цветков И.В.8,9Шигин П.А.22Шмаков А.А.27,28Щелканов И.А.12,13,14,15

Подчеркнуты фамилии студентов

ГОДОВОЙ ОТЧЕТ ПО НИР КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ЗА 2009 г.

Под редакцией В.А. Курнаева

Подписано в печать 26.07.10	Формат 60×84 1/8	
Учизд. л. 5,0	Печ. л. 5,0	Тираж 100 экз.
Изд. № 020-2	Заказ	

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