

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

**Немов Алексей Сергеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ И ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ  
ЭМИССИИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ВЫСОКОДОЗНОМ ОБЛУЧЕНИИ**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007 г.

Работа выполнена в Лаборатории взаимодействия ионов с веществом Отдела физики атомного ядра Научно-исследовательского института ядерной физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Машкова Евгения Сергеевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Новиков Лев Симонович

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Сошников Илья Петрович

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет)

Защита диссертации состоится «1» ноября 2007 г. в «14» часов на заседании Диссертационного совета К 501.001.06 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова.

Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ  
им. М.В.Ломоносова, 19 корпус, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан «28» сентября 2007 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета К 501.001.06  
кандидат физ.-мат. наук



Чуманова О.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Углеродные материалы находят все большее применение в различных областях физических исследований, техники и промышленности. Изотропные поликристаллические графиты, анизотропные пирографиты, стеклоуглероды, углерод-углеродные композиционные материалы являются широко распространенными конструкционными материалами [1-15]. В связи с широким использованием углеродных материалов в ракетно-космической технике, ядерных и термоядерных реакторах, большое внимание уделяют исследованиям их поведения в радиационных полях различной природы (электромагнитные поля, потоки нейтронов и заряженных частиц) Так, в планируемом большом термоядерном реакторе ИТЭР графиты и углерод-углеродные композиты, благодаря высоким термомеханическим свойствам, являются основными кандидатными материалами для диверторных пластин.

Изучению воздействия на графитовые материалы нейтронного облучения и легких ионов уделялось и уделяется большое внимание [2,13,14,16]. Исследований воздействия на углеродные материалы высокодозного облучения относительно тяжелых ионов, в частности, ионов азота и инертных газов, недостаточно. Взаимодействие ионов с твердым телом является одним из самостоятельных разделов фундаментальной физики. Механизмы различных процессов, происходящих при облучении материалов потоками ионов, и в том числе физического (столкновительного) распыления, вызывающего эрозию и потерю материала, и ионно-электронной эмиссии, неразрывно связаны с возникновением радиационных нарушений и их влиянием на характер движения как бомбардирующих, так и вторичных (распыленных атомов и электронов) частиц, равно как и с особенностями морфологии облучаемых поверхностей [1-7]. Отличительной особенностью исследования взаимодействия ионов с твердым телом является то, что помимо самостоятельного значения для выявления механизмов, вызываемых взаимодействием явлений, использование их закономерностей является инструментом, позволяющим одновременно как изменять физические свойства твердых тел, так и проводить анализ и мониторингирование этих изменений. Вопросы эрозии, модификации морфологии и структуры поверхностных слоев углерод-углеродных материалов под действием относительно тяжелых ионов исследованы существенно менее детально, чем, например, в случае легких ионов и, в частности, это относится к роли и влиянию специфики радиационных нарушений в углеродных материалах на процессы взаимодействия ионов с поверхностями и модификацию их свойств. В частности, мало исследований взаимодействия ионов азота с углеродными материалами. Данная проблема представляет не меньший практический интерес в связи с радиационным синтезом новых материалов на основе бинарной системы C-N, разработкой радиационно-пучковых методов модифицирования углеродных материалов [14-16], использованием графитовых конструкций в плазменных ионных источниках [3].

Данная диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию физического (столкновительного) распыления и кинетической ионно-электронной эмиссии при высокодозном ионном облучении углеродных материалов и развитию методов исследования поверхностных слоев этих материалов на основе угловых и температурных зависимостей кинетической ионно-электронной эмиссии.

**Цели и задачи исследования.** Целью работы является изучение угловых и температурных закономерностей распыления и ионно-электронной эмиссии углеродных материалов при высокодозном облучении ионами молекулярного азота и аргона с энергиями в десятки кэВ, аналитических возможностей ионно-электронной эмиссии для диагностики и мониторингирования воздействия ионного облучения.

**Основные задачи работы:**

1. Экспериментальное изучение угловых зависимостей коэффициента распыления поликристаллических графитов и высокоориентированного пиролитического графита при высокодозном облучении ионами  $N_2^+$  энергии 30 кэВ при различных температурах мишени, сравнение с данными компьютерного моделирования.
2. Экспериментальное исследование угловых и температурных зависимостей коэффициента кинетической ионно-электронной эмиссии высокоориентированного пиролитического графита, поликристаллических графитов и стеклоуглеродов при непрерывном высокодозном облучении ионами  $N_2^+$  и  $Ar^+$  энергии 30 кэВ.
3. Исследование влияния радиационных нарушений и топографии поверхности, развивающейся при высокодозном облучении углеродных материалов ионами  $N_2^+$  и  $Ar^+$  энергии 30 кэВ на выход распыленных частиц и вторичных электронов.
4. Исследование возможностей применения закономерностей ионно-электронной эмиссии углеродных материалов для *in situ* контроля и диагностики процесса облучения и состояния облучаемой поверхности.

**Научная новизна работы:**

1. Впервые экспериментально измерены угловые зависимости коэффициента распыления поликристаллических графитов марок МПГ-8 (производство НИИГрафит, Москва) и РОСО-AXF-5Q (производство США) при облучении молекулярными ионами азота энергии 30 кэВ в интервале углов падения ионов от 0 до 80°. Сравнение с данными компьютерного моделирования с учетом влияния топографии поверхности, развивающейся при высокодозном облучении, показало, что угловые зависимости коэффициента распыления  $Y(\theta)$  поликристаллических графитов типичны для физического (столкновительного) распыления:  $Y(\theta) \sim 1/\cos\theta$ .
2. Впервые экспериментально определены угловые зависимости коэффициента распыления высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т (производство НИИГрафит, Москва) при облучении молекулярными ионами азота энергии 30 кэВ в интервале углов падения ионов от 0 до 80° и показано, что угловая зависимость  $Y(\theta)$ , измеренная при комнатной температуре близка к зависимостям для поликристаллических графитов, и, как и для них,

соответствует аморфизированному высокодозным облучением состоянию поверхностного слоя. Угловая зависимость, измеренная при  $T = 400^\circ\text{C}$ , соответствует поликристаллическому состоянию поверхностного слоя и, в отличие от исходно поликристаллических графитов, является немонотонной с минимумом при угле падения ионов  $\theta = 60^\circ$ . Подавление распыления в три раза по сравнению с облучением при комнатной температуре обусловлено развитием на поверхности при  $\theta = 60^\circ$  системы игольчатых конусов.

3. Впервые при воздействии высокодозного ионного облучения неграфитирующихся углеродных материалов (стеклоуглеродов) обнаружено ионно-индуцированное упорядочение материала.
4. Экспериментально и теоретически показано, что зависимости коэффициента кинетической ионно-электронной эмиссии углеродных материалов от температуры облучения  $\gamma(T)$  имеют ступенчатый характер – скачок выхода электронов при температуре  $T_a$ , связанный с увеличением длины свободного пробега вторичных электронов при отжиге радиационных нарушений.
5. Впервые в теоретическом анализе кинетической ионно-электронной эмиссии обращено внимание на влияние радиационных нарушений не только на движение бомбардирующих ионов, но и на транспорт вторичных электронов. Получено прямое экспериментальное подтверждение отличия взаимодействия вторичных электронов с аморфным веществом и с поликристаллами.

#### **Практическая ценность работы.**

Выявленные закономерности распыления углеграфитовых материалов важны для решения проблем радиационной стойкости материалов, модификации их кристаллической структуры и топографии в условиях высокодозного облучения и переменных температур как в термоядерных исследованиях, так и при решении проблем деградации покрытий и элементов космических летательных аппаратов, их необходимо учитывать при создании углерод-азотных поверхностных слоев и тонких пленок.

Обнаруженные температурные и угловые закономерности кинетической ионно-электронной эмиссии углеродных материалов, в том числе скачок выхода электронов за счет увеличения длины свободного пробега вторичных электронов дают возможность развития экспериментальных ионно-пучковых методов исследования и анализа радиационных нарушений в этих материалах, мониторинга *in situ* состояния облучаемой поверхности, в том числе диагностики радиационно-индуцированного перехода от кристаллического состояния поверхности углеродного материала к аморфизированному состоянию.

**Достоверность основных положений и выводов** обеспечивается использованием современной аппаратуры, надежных и независимых методов исследования, сравнением с результатами тестированных компьютерных программ моделирования взаимодействия атомных частиц с твердым телом, сравнением и

согласием экспериментальных результатов с литературными данными, полученными при сопоставимых условиях.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Экспериментальные результаты определения угловых зависимостей коэффициентов распыления поликристаллических графитов марок МПГ-8 и РОСО-AXF-5Q, высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при облучении при комнатной температуре ионами  $N_2^+$  энергии 30 кэВ в широком диапазоне углов падения ионов ( $0 - 80^\circ$ ), и выводы о том, что измеренные угловые зависимости соответствуют разупорядоченному (аморфизированному) состоянию поверхности, и учет ионно-индуцированной микротопографии облучаемой поверхности устраняет расхождения эксперимента и результатов компьютерного моделирования столбчатого распыления для гладкой поверхности.
2. Экспериментальные результаты измерения угловой зависимости коэффициента распыления высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при облучении при  $T = 400^\circ\text{C}$  ионами  $N_2^+$  энергии 30 кэВ в широком диапазоне углов падения ионов ( $0 - 80^\circ$ ) и выводы о том, что измеренная угловая зависимость коэффициента распыления, в отличие от зависимости, измеренной при комнатной температуре, является немонотонной с минимумом при угле падения  $\theta = 60^\circ$ , и подавление распыления в три раза связано с развитием специфического микрорельефа типа игольчатых конусов.
3. Экспериментальные исследования элементного состава, микротопографии и кристаллической структуры поверхностных слоев поликристаллических графитов, высокоориентированного пиролитического графита и стеклоуглеродов до и после высокодозного облучения ионами азота и аргона при различных температурах с энергиями в десятки кэВ.
4. Экспериментальные и теоретические исследования температурных и угловых зависимостей ионно-электронной эмиссии углеродных материалов, и выводы о том, что скачок (резкое возрастание) коэффициента ионно-электронной эмиссии при температуре  $T_a$  отжига радиационных нарушений при нормальном падении ионов на мишень обусловлен увеличением длины свободного пробега вторичных электронов при упорядочении кристаллической структуры материала. Для высокоориентированного пирографита на угловую зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии помимо изменения длины пробега вторичных электронов влияет анизотропия проводимости.
5. Возможность применения закономерностей ионно-электронной эмиссии для анализа радиационных нарушений в твердом теле, *in situ* контроля и диагностики ионного облучения и состояния облучаемой поверхности.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях, совещаниях и семинарах: XXXII – XXXVI Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2002-2006), XVI, XVII Международных

конференциях "Взаимодействие ионов с поверхностью" (Москва, 2003, 2005), VI-VII Всероссийском семинаре "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Н. Новгород, 2002, 2004), I Всероссийской конференции "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Н. Новгород, 2006), Пятой Международной конференции «УГЛЕРОД: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (Москва, 2006), 21 - 22 International Conferences on Atomic Collisions in Solids (ICACS-21 – Italy, Genova, 2004, ICACS-22 – Germany, Berlin, 2006). III Республиканской конференции по физической электронике (Ташкент, 2002), 3 и 4 Всероссийской научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2004, 2005), 7 Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (Москва, 2005), XXVIII – XXX Гагаринских чтениях (Москва, МАТИ, 2002-2004), межотраслевым семинаре по взаимодействию плазмы с поверхностью (Москва, МИФИ, 2004), научных семинарах НИИЯФ МГУ.

Выполнение работы проводилось в рамках тематики госбюджетных НИР НИИЯФ МГУ 2002-2006 г.г., грантов правительства Москвы 2003 – 2005 г.г., гранта «Ведущая научная школа» по теме «Исследования радиационной стойкости наноматериалов для космической техники», 2006 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 статей в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 170 наименований. Объем диссертации составляет 177 страниц машинописного текста, включая 94 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** приводится обоснование выбора темы диссертационной работы и ее актуальности. Сформулирована цель работы, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем диссертации. Содержатся сведения об апробации работы и публикации.

**Глава 1** состоит из трех частей. В ней дан аналитический обзор литературы по теме диссертации.

В первой части рассмотрены общие представления о механизме взаимодействия ионов с твердыми телами.

Во второй части содержится обзор работ по столкновительному (физическому) распылению твердых тел под действием ионной бомбардировки. Обращено особое внимание на те работы, в которых изучались закономерности распыления углеродных материалов.

В третьей части первой главы анализируются экспериментальные данные исследования кинетической ионно-электронной эмиссии и основные теоретические

представления. Отмечается, что в теоретическом анализе явления кинетической ионно-электронной эмиссии основное внимание уделялось процессу возбуждения электронов, тогда как проблемам транспорта электронов к поверхности и их выхода уделялось значительно меньше внимания, также как и данным о влиянии радиационных нарушений на транспорт вторичных электронов.

В **Главе 2** приведено описание экспериментальной аппаратуры и рассмотрен ряд методических вопросов. Облучение образцов проводили на Масс-монокроматоре НИИЯФ МГУ, предназначенном для изучения взаимодействия ионов средних энергий (5–35 кэВ) с поверхностью твердых тел. Плотность тока в фокусе составляла до 0.3 мА/см<sup>2</sup>. Описана камера столкновений и держатель мишени, который позволял варьировать углы падения ионов на мишень в пределах от 0 (нормальное падение) до 89° с шагом 0.5° и изменять температуру мишеней от –180°С до 1000°С.

Описана процедура подготовки мишеней к эксперименту. Были использованы мишени из поликристаллических графитов (МПП-ЛТ, МПП-8, РОСО-AXF-5Q, высокоориентированного пиролитического графита, стеклоуглеродов, а также поликристаллической меди (для сравнения).

Облучение мишеней производилось, главным образом ионами Ag<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией 30 кэВ. Дозы облучения составляли 10<sup>18</sup> – 10<sup>19</sup> ион/см<sup>2</sup>. Коэффициент ионно-электронной эмиссии  $\gamma$  определяли коллекторным методом как отношение тока электронов к току первичных ионов с приборной погрешностью 2-2.5 %. Приводимые в работе значения  $\gamma$  соответствуют динамически равновесным условиям, когда они перестают зависеть от флюенса облучения. Коэффициент распыления  $Y$  определяли по потере веса мишени и дозе облучения. Погрешность в измерении коэффициента распыления составляла 15%, в основном из-за необходимости учитывать тенденцию графита адсорбировать газы. Измерение для каждого фиксированного угла падения ионов на мишень производили несколько раз, до тех пор, пока  $Y$  (потеря веса) переставал зависеть от числа (номера) облучения, т.е. соответствовал динамически равновесным условиям.

Объемную структуру образцов исследовали с помощью рентгеновского анализа. Рентгеновский анализ проводился на дифрактометре Rigaku Rotaflex D-max/RS с фокусировкой по Брэггу-Брентано. Использовали CuK<sub>α</sub> - излучение. Структуру поверхностных слоев исследовали методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), позволяющим получать информацию о кристаллической структуре на глубинах 10–15 нм. До и после облучения топография поверхностей анализировалась при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ), сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), лазерной гониофотометрии (ЛГФ). Элементный анализ проводился при помощи резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов <sup>4</sup>He<sup>+</sup> с энергией 1.5 –1.8 МэВ на электростатическом ускорителе НИИЯФ МГУ и спектроскопии атомов отдачи (САО).

**Глава 3** посвящена исследованиям ионно-индуцированных изменений элементного состава, топографии и кристаллической структуры поверхностных слоев



в области температур от комнатной до температур  $\leq 500^\circ\text{C}$ . Установлено, что области различного поведения характеристик модифицированного слоя разделяются температурой динамического отжига радиационных нарушений  $T_a$ , которую определяли по температуре скачка коэффициента  $\gamma$  ионно-электронной эмиссии на кривых зависимости  $\gamma(T)$ .

В разделе 3.1. приведены результаты исследования методом РОР элементного состава поверхностных слоев поликристаллических графитов, облученных ионами  $\text{N}_2^+$  с энергией 30 кэВ. Обнаружено наличие азота и кислорода. Типичные спектры РОР приведены на рис.1. Найдено, что спектры обратного рассеяния хорошо описываются в предположении формирования измененного поверхностного слоя состава  $\text{C:N:O} = 76:20:4$  толщины 54 нм. При повышенных температурах ( $T > T_a$ ) наблюдается диффузионное расплывание профиля имплантированного азота, максимальная концентрация которого наполовину уменьшается, а глубина модифицированного слоя увеличивается в два раза.

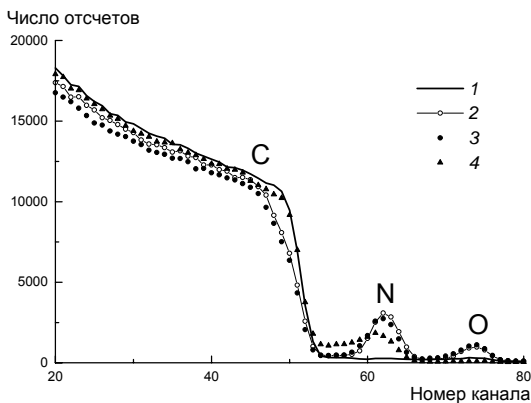


Рис.1. Спектры РОР ионов  $\text{Ne}^+$  энергии 2 МэВ для образцов графита МПГ-8 до (1) и после облучения при нормальном падении ионов  $\text{N}_2^+$  с энергией 30 кэВ при температурах 40 (2), 130 (3) и  $400^\circ\text{C}$  (4).

Высокодозное облучение стеклоглеродов ионами азота приводит к появлению поверхностного пика азота, высота которого в спектре РОР при  $T < T_a$  приблизительно в два раза больше, чем при  $T > T_a$ , причем при  $T < T_a$  концентрация азота сильно зависит от температуры их термообработки  $T_{об}$  – она возрастает от 11 ат.% в СУ-850 до 23 ат.% в СУ-2500. При  $T > T_a$  концентрация азота слабо зависит от  $T_{об}$  и составляет около 10 ат.%, как и в поликристаллических графитах при аналогичных условиях облучения. Для определения концентрации водорода при элементном анализе стеклоглеродов использовали метод спектрометрии быстрых атомов отдачи.

В разделе 3.2 приведены результаты исследования ионно-индуцированного изменения микротопографии поверхностей углеродных материалов при помощи растровой электронной микроскопии. Исходная микроструктура поверхности поликристаллических графитов является шероховатой за счет слоев чешуек и пор между ними. Эволюция топографии поверхности в результате высокодозного облучения найдена зависящей от температуры облучаемой поверхности, угла падения ионов на мишень и марки графита. Для графита марки МПГ-8 при комнатной и близких к ней температурах облучения образуются округлые ямки травления диаметром  $\sim 1$  мкм и кратеры диаметром порядка нескольких мкм с относительно гладкими стенками. При  $T > T_a$  происходит увеличение шероховатости поверхности за счет появления наноразмерной слоистой структуры ямок травления и кратеров. Топография, развивающаяся для других марок графитов, приводит к более сильному увеличению общей шероховатости – к появлению, особенно при наклонном падении, систем конусов, направления осей которых совпадают с направлением падения пучков ионов азота (аргона). На относительно гладкой до облучения поверхности высокоориентированного пиролитического углерода марки УПВ-1Т (грань (0001)) после высокодозного облучения ионами  $N_2^+$  по нормали при комнатной температуре появляется система кратеров с гладкими и пологими стенками, расстояние между которыми соответствует размерам кристаллитов в базисной плоскости (0.5 – 1 мкм). Облучение при повышенных температурах ( $T > T_a$ ) приводит к формированию острых конусов высотой в несколько мкм, которые срастаются между собой и образуют системы гребней с изъезвленными стенками. При наклонном падении ионов на базовую плоскость УПВ-1Т разница между топографией, развивающейся при  $T < T_a$  и  $T > T_a$  еще более значительна. А именно, при температуре, близкой к комнатной, развивается мелкая чешуйчатая гребневидная структура, а при  $T > T_a$  наблюдается система игольчато-столбчатых структур (рис.2).

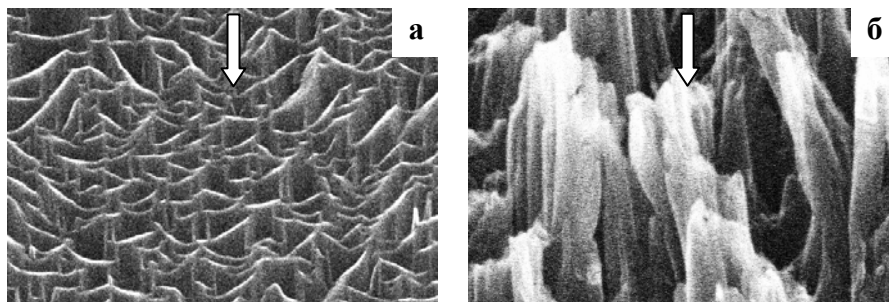


Рис.2. Микрофотографии поверхности грани (0001) высокоориентированного пирографита УПВ-1Т после облучения ионами  $N_2^+$  энергии 30 кэВ при съемке с наклоном образца  $30^\circ$ : (а) -  $\theta = 60^\circ$ , комнатная температура; (б) -  $\theta = 60^\circ$ ,  $T=400^\circ\text{C}$ . Стрелками показано направление ионного пучка.

Для стеклоуглеродов рельеф поверхности после облучения менее шероховатый, чем для графитов – формируется губчатая структура, различающаяся масштабом в зависимости от температуры облучения. При повышенных температурах структура имеет субмикронный масштаб – порядка десятков нанометров.

В разделе 3.3 рассматриваются известные из литературы особенности радиационного воздействия на углеродные материалы и изменения структуры исследованных в диссертации материалов при различных температурах облучения. Как искусственные графиты, так и другие углерод-углеродные материалы заключают в себя сложный набор компонент различных структурных состояний, с различной текстурой и свойствами, зависящими от способов их изготовления. Наиболее высокой степенью трехмерного упорядочения характеризуется высокоориентированный пиролитический графит. Поликристаллические графиты характеризуются наличием турбостратной структуры с послойным распределением атомов углерода со средним расстоянием между слоями 0.344 нм. В неграфитирующихся углеродных материалах, таких, как стеклоуглероды, считается, что первичные элементы, представляющие собой изотропные глобулы размером 10 - 30 нм с турбостратной структурой, покрыты высокоориентированной пленкой толщиной 10 - 15 нм, образующей углеродные ленты, содержащие нанокристаллиты графита. Дифрактограммы необлученных образцов стеклоуглеродов имеют вид, характерный для слабоупорядоченных веществ. Значительные изменения физических свойств, обусловленных радиационными нарушениями в углеродных материалах наблюдаются при температурах, близких к комнатной. При повышении температуры, при которой происходит облучение, увеличивается подвижность дефектов, приводящая к сложным процессам динамического отжига. Анализ при помощи дифракции быстрых электронов на отражение кристаллической структуры поверхностных слоев показал, что для поликристаллических графитов облучение при комнатной температуре приводит к появлению диффузного гало, типичного для разупорядоченных поверхностей. При повышенных температурах ( $T > T_a$ ) наблюдаются три размытых кольца, соответствующих трем наиболее интенсивным кольцам на электронограмме исходного графита, свидетельствующие о восстановлении трехмерной кристаллической структуры в поверхностном слое графита. Для необлученных образцов картина электронной дифракции грани (0001) УПВ-1Т содержит точечные рефлексы типа (002l), которые типичны для монокристалла графита с ориентацией оси c, близкой к нормали к поверхности образца. Облучение при температурах, близких к комнатной, приводит как при нормальном, так и при наклонном падении ионов к аморфному гало, свидетельствующему о сильном разупорядочении. Для образцов, облученных при повышенных температурах, дифракционная картина отличается как от исходной, так и от случая облучения при комнатной температуре. При нормальном и близком к нормальному падении ионов на электронограммах наблюдаются три размытых кольца, соответствующих трем наиболее интенсивным кольцам на электронограммах поликристаллических графитов. Наибольшее восстановление исходной структуры материала при непрерывном облучении при

повышенных температурах мишени наблюдается при скользящем падении ионов, когда дифракционная картина соответствует текстурированному состоянию поверхностного слоя УПВ-1Г. Поверхностные слои высокотемпературных стеклоуглеродов при высокодозном облучении при  $T < T_a$  испытывают разупорядочение. Структура низкотемпературных стеклоуглеродов испытывает слабое упорядочение во всем исследованном диапазоне температур по сравнению с исходными образцами.

**Глава 4** посвящена исследованиям угловых и температурных зависимостей коэффициентов распыления поликристаллических графитов и высокоориентированного пирографита при высокодозном облучении молекулярными ионами азота с энергией 30 кэВ

В разделе 4.1 приведены и сопоставляются данные об угловых зависимостях коэффициентов распыления ряда поликристаллических графитов и результаты сравнения эксперимента и компьютерного моделирования. Основные измерения были проведены при температурах мишеней, близких к комнатной, когда поверхностный слой исходно поликристаллических графитов аморфизуется. Установлено, что зависимости коэффициента распыления  $Y$  от угла  $\theta$  падения ионов азота в исследованном диапазоне углов ( $0 - 80^\circ$ ) близки к зависимости вида  $1/\cos\theta$ , т.е. являются типичными для механизма столкновительного распыления. По мере увеличения угла  $\theta$  падения ионов на мишень коэффициент распыления  $Y$  для графита марки РОСО-AXF-5Q возрастает от 0.6 при нормальном падении, до значений  $Y \approx 3$  ат./ат.ион при  $\theta = 80^\circ$ . Коэффициенты распыления для РОСО-AXF-5Q оказались более чем в полтора раза более высокими, чем для МПГ-ЛТ как при нормальном падении, так и больших углах падения, тогда как для угла падения  $\theta = 70^\circ$  значения  $Y$  близки для исследованных сортов графитов, включая графит марки МПГ-8. Измерения коэффициентов распыления графита марки РОСО-AXF-5Q при температуре  $T \cong 400^\circ\text{C}$  показали значения, близкие к измеренным при температурах, близких к комнатным. Это связано в основном с тем, что расхождения находятся в пределах ошибок измерения, что подтверждают и данные компьютерного моделирования распыления материала в поликристаллической и аморфизированной фазе, выполненные В.И.Шульгой в НИИЯФ МГУ [17].

Сравнение полученных экспериментально угловых зависимостей коэффициента распыления  $Y(\theta)$  с данными компьютерного распыления, выполненного для гладкой поверхности В.Экштайном (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany) по программе TRIM.SP, в которой полагается, что мишень имеет неупорядоченную структуру, показало, что расчетная зависимость вплоть до  $\theta \leq 80^\circ$  является несколько более сильной, чем  $1/\cos\theta$ , при  $\theta = 82^\circ$  расчетная кривая проходит через максимум. Такой вид угловой зависимости коэффициента распыления типичен для столкновительного распыления и отражает наблюдаемый в эксперименте ход зависимости  $Y(\theta)$ . Варьирование плотности мишени, энергии связи поверхностных атомов, потенциала взаимодействия, учет наличия в мишени имплантированного азота

не приводит к устранению количественных расхождений между результатами моделирования и эксперимента. Расхождения как между экспериментальными данными для разных марок графитов, так и этих данных с результатами компьютерного моделирования для гладкой поверхности могли быть связаны с различием как в исходной, так и при развивающейся при высокодозном облучении топографии поверхности. Были использованы два подхода учета шероховатости облучаемой мишени в расчетах коэффициента распыления. В первом подходе, измеряли распределения локальных углов падения ионов на микроплощадки шероховатой поверхности при помощи лазерной гониофотометрии и использовали данные моделирования для гладкой поверхности, полученные с помощью программы TRIM.SP. Во втором подходе учет шероховатости на образцах, облученных при выполнении диссертационной работы, производился нашими коллегами в МИФИ (Камнева С.А., Курнаев В.А., Трифионов Н.Н.) непосредственным моделированием распыления с помощью программы SCATTER-R, в которой статистическое моделирование парных атомных взаимодействий включало в себя цифровые данные о рельефе реальной поверхности, получаемые с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ-2000М).

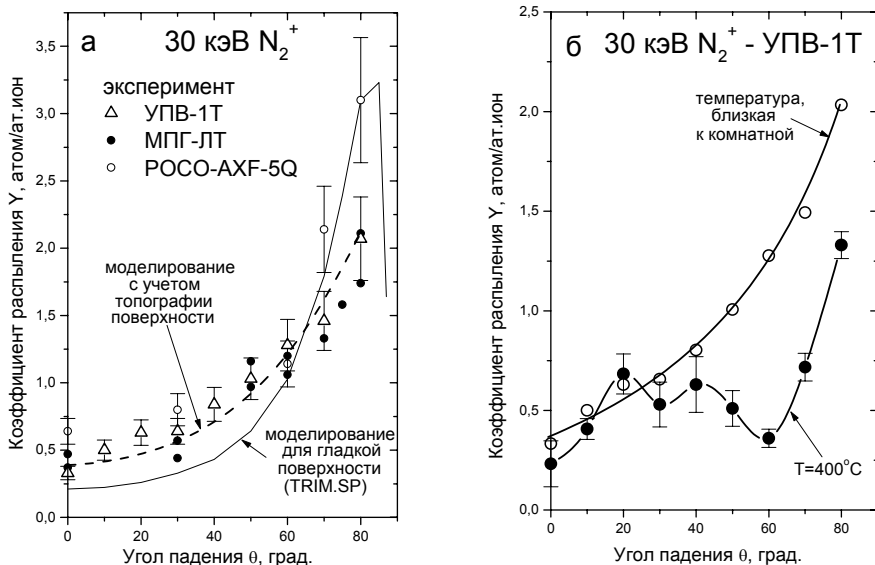


Рис.3. Сравнение экспериментальных угловых зависимостей коэффициента распыления поликристаллических графитов и высокоориентированного пирографита, измеренных при облучении ионами  $N_2^+$  с энергией 30 кэВ при комнатной температуре (а) и угловые зависимости коэффициента распыления высокоориентированного пирографита при разных температурах облучения (б).

Результат расчета коэффициента распыления с помощью программы SCATTER-R при  $\theta = 50^\circ$ , показал, что результат близок как к рассчитанному с использованием ЛГФ, так и в пределах погрешности экспериментальному значению  $Y$  (рис.3а).

В разделе 4.2 приводятся результаты исследования влияния радиационных нарушений и топографии поверхности на угловые зависимости коэффициента распыления высокоориентированного пирографита марки УПВ-1Т при облучении ионами  $N_2^+$  энергии 30 кэВ от угла падения ионов  $\theta$  в диапазоне от 0 до  $80^\circ$  относительно нормали к поверхности грани (0001). Установлено, что топография, развивающаяся на поверхности образцов УПВ-1Т, сильно различается в случаях облучения при температурах, близких к комнатной и при повышенных температурах – при повышенных температурах рельеф более развитый: наблюдаются системы конусообразных структур. При нормальном и близком к нормальному падению образуются сростки конусообразных образований с острыми вершинами. По мере перехода к наклонному и скользящему падению образуются более длинные, так называемые игольчатые конусы с тупыми вершинами. В этой связи, при исследовании дифракции при наклонном и скользящем падении принимали во внимание, что поверхность игольчатых конусообразных структур и их торцевые части облучаются при существенно различных локальных углах падения ионов. В случае, когда проводили съемку электронограмм вдоль ионного пучка, т.е. при анализе торцевых граней топографических элементов, картина дифракции оказалась аналогична случаю нормального падения ионов, т.е. картина дифракции характерна для поликристаллической фазы. Когда же зондирующий электронный луч направляли навстречу ионному пучку, т.е. анализировали структуру верхних пологих граней топографических элементов, то при увеличении угла падения ионов наблюдается переход от поликристаллической фазы к исходной кристаллической фазе поверхности УПВ-1Т. Сравнение измеренной при комнатной температуре угловой зависимости  $Y(\theta)$  для УПВ-1Т с соответствующими угловыми зависимостями для поликристаллических графитов показывает совпадение в пределах погрешности эксперимента в диапазоне углов  $\theta = 0 - 60^\circ$ , что обусловлено, как показывают результаты ДБЭО, разупорядочением поверхностных слоев всех этих графитов в результате высокодозной ионной бомбардировки. При  $\theta > 60^\circ$  коэффициенты распыления УПВ-1Т продолжают оставаться в хорошем согласии с соответствующими значениями  $Y$  для графита марки МПГ-ЛТ. Что касается сравнения с данными для РОСО, то видно, что значения  $Y$  для РОСО выше соответствующих значений для УПВ-1Т. Эти различия могут быть связаны с различием в топографии поверхностей. В отличие от поликристаллических графитов (раздел 4.1), для которых угловые зависимости коэффициента распыления практически не зависят от температуры, при которой происходит облучение, для высокоориентированного пиролитического графита зависимость от температуры найдена очень сильной, хотя анализ при помощи дифракции быстрых электронов на отражение показал практически во всем диапазоне углов падения ионов на мишень,

кроме таких скользящих углов, как  $\theta = 80^\circ$ , что полного восстановления кристаллической структуры не происходит – состояние поверхностного слоя ближе к поликристаллическому. Тем не менее, в отличие от измерений при комнатной температуре, когда в исследованном диапазоне углов падения ионов  $Y(\theta)$  растет монотонно, зависимость, измеренная при  $T = 400^\circ\text{C}$ , является немонотонной и имеет глубокий минимум при  $\theta = 60^\circ$ , показывая подавление распыления в три раза по сравнению со случаем облучения при комнатной температуре (рис.3а). Можно полагать, что основной причиной обнаруженной немонотонной зависимости  $Y(\theta)$  является развитие структуры игольчатых конусов при  $\theta \cong 60^\circ$ . В такой геометрии облучения атомы, распыленные при попадании бомбардирующих ионов на неидеальные стенки игольчатых структур, имеют такие траектории, что происходит захват распыленных частиц вертикальными стенками игольчатых структур, что приводит к трехкратному уменьшению коэффициента распыления по сравнению с распылением при комнатной температуре.

**В Главе 5** анализируются результаты измерений температурных и угловых зависимостей коэффициента кинетической ионно-электронной эмиссии при высокодозном облучении углеродных материалов молекулярными ионами азота и аргона энергии 30 кэВ. Известно, что процессы, происходящие при взаимодействии ионов с твердым телом чувствительны к степени упорядоченности твердого тела. В частности, измерение температурных зависимостей  $\gamma(T)$  используют для контроля отжига радиационных нарушений в полупроводниковых материалах. К тому же известно, что величина  $\gamma$  для металлов практически не зависит от температуры мишени, если только в исследованном температурном интервале не происходит какой-либо структурно-фазовый переход. Исследование температурных зависимостей  $\gamma(T)$  для изученных типов углеродных материалов при высокодозном облучении их по нормали к поверхности мишени молекулярными ионами азота и аргона показали, что с ростом температуры наблюдается ступенчатое увеличение  $\gamma$  при некотором значении  $T_a$ , зависящем от сорта и марки материала.

**В разделе 5.1** рассмотрены экспериментальные температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии поликристаллических графитов. Систематическое экспериментальное исследование температурных зависимостей коэффициента ионно-электронной эмиссии поликристаллических графитов (как и других углеродных материалов – высокоориентированного пиролитического графита и стеклоглеродов (разделы 5.3 и 5.4)) при непрерывной ионной бомбардировке по нормали к поверхности образца показало, что с ростом температуры при некотором значении  $T_a$ , зависящем от сорта материала происходит скачок выхода вторичных электронов (рис.4). Характер температурных зависимостей  $\gamma$  представлялся типичным для кривых динамического отжига радиационных нарушений. Результаты дифракции быстрых электронов на отражение подтвердили наличие структурного перехода в поверхностном слое графитов. При  $T < T_a$  наблюдаются диффузные гало, типичные

для аморфизированных поверхностей, при  $T > T_a$  структура близка к структуре необлученных графитов.

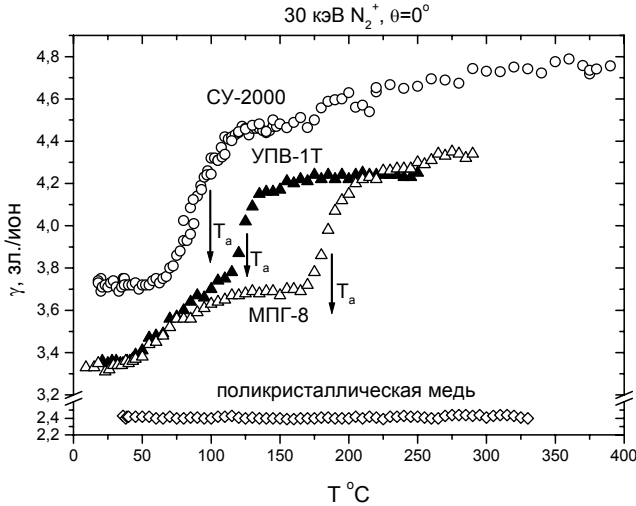


Рис.4. Температурные зависимости  $\gamma$  для высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т (темные треугольники), поликристаллического графита марки МПП-8 (светлые треугольники) и стеклоглнера SU-2000 и поликристаллической медной мишени при облучении по нормали ионами  $N_2^+$  с энергией 30 кэВ.

Таким образом, экспериментальные данные показали, что температурные зависимости коэффициента  $\gamma(T)$  отражают ионно-индуцированные структурные изменения в поликристаллических графитах.

Раздел 5.2 посвящен анализу влияния радиационных нарушений на закономерности ионно-электронной эмиссии углеродных материалов. Анализ проведен на основе теории кинетической ионно-электронной эмиссии Парилуса и Кишиневского. Исходно теория была развита для неупорядоченных сред, ее обычно применяли для описания закономерностей эмиссии электронов из металлов, и проблема влияния радиационных нарушений ни на характер движения бомбардирующих ионов, ни на транспорт вторичных электронов, не обсуждалась. Согласно теории кинетической ионно-электронной эмиссии коэффициент  $\gamma$  эмиссии определяется выражением

$$\gamma(\theta) = \int_0^{R_c} \rho \sigma(v) w \exp(-l \cos \theta / \lambda) dl, \quad (1)$$



где  $R_e$  – путь, на котором ион способен производить ионизацию,  $\rho$  – атомная плотность мишени,  $\lambda$  – длина свободного пробега вторичных электронов в твёрдом теле,  $w$  – вероятность выхода электронов,  $\sigma(v)$  – сечение ионизации в парных атомных столкновениях, определяемое энергией, передаваемой электронным оболочкам налетающей частицы и атома-мишени. При энергиях ионов порядка десятков кэВ и не слишком больших углах падения ионов на мишень

$$\gamma(\theta) \approx \rho\sigma(v_0)\lambda w/\cos\theta, \quad (2)$$

где  $v_0$  – скорость налетающего иона. Анализ угловых зависимостей  $\gamma\cos\theta$ , в которых значения  $\gamma$  взяты из результатов измерений  $\gamma(T)$  графитов марок МПГ-8 и РОСО-АХФ-5Q при различных температурах облучения как для ионов азота, так и аргона показал, что форма зависимостей  $\gamma\cos\theta$ , а именно – слабая зависимость  $\gamma\cos\theta$  при углах падения ионов вплоть до некоторого критического значения  $\theta_c$ , переходящая при  $\theta > \theta_c$  к быстрому уменьшению, является характерной для кинетической ионно-электронной эмиссии при энергиях ионов порядка десятков кэВ. Это связано, в частности, с тем что глубина  $R_e\cos\theta$ , на которой происходит возбуждение электронов в столкновении бомбардирующей частицы с атомами мишени, становится меньше длины пробега вторичных электронов  $\lambda$ . При  $R_e\cos\theta < \lambda$  значение  $\gamma$  стремится к предельному значению  $\gamma_{\text{lim}} \approx \rho\sigma(v_0)R_e w$ . Для качественного сопоставления с экспериментом использовали аппроксимацию угловой зависимости  $\gamma\cos\theta$

$$\gamma(\theta)\cos\theta = \begin{cases} \rho\sigma(v_0)\lambda w & \text{при } \theta \leq \theta_c \\ \rho\sigma(v_0)R_e w \cos\theta & \text{при } \theta \geq \theta_c \end{cases}, \quad (3)$$

где угол  $\theta_c$  определяется равенством  $R_e \cos\theta_c = \lambda$ .

Экспериментально найденный ход зависимостей  $\gamma\cos\theta$  качественно соответствует аппроксимации (3), если предположить, что при увеличении температуры  $T$ , при которой производится облучение, в области  $T = T_a$  увеличивается длина пробега вторичных электронов  $\lambda$ , а глубина  $R_e$  слабо зависит от температуры. Таким образом, ступенчатые изменения зависимости  $\gamma(T)$  можно связывать с изменением длины пробега вторичных электронов  $\lambda$ . Увеличение  $\lambda$  с температурой обуславливается уменьшением эффективного сечения рассеяния вторичных электронов на атомных остовах при упорядочении кристаллической структуры твердого тела в результате отжига радиационных нарушений, создаваемых высокодозным ионным облучением.

В разделе 5.3 рассматривается влияние анизотропии проводимости высокоориентированного пиролитического графита на температурные и угловые зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии. Характер изменений зависимостей  $\gamma(T)$  для УПВ-1Т по мере увеличения угла падения ионов отличается от случая поликристаллических графитов. Для поликристаллических графитов увеличение угла падения ионов приводит к появлению максимума на зависимостях  $\gamma(T)$ . При температурах, близких к комнатной и  $T > T_a$  фиксируются участки слабой температурной зависимости  $\gamma(T)$ . Для УПВ-1Т по мере увеличения угла падения

ионов наблюдается переход от ступенчатого возрастания к ступенчатому уменьшению при  $T \sim T_a$ . Трансформация зависимостей  $\gamma(T)$  с ростом угла  $\theta$  падения ионов для УПВ-1Т связана с уменьшением длины свободного пробега электронов  $\lambda$  по отношению к  $\lambda_{\text{poly}}$  для ионно-индуцированной поликристаллической фазы поверхностного слоя УПВ-1Т при  $T > T_a$ . Высокоориентированный пирографит УПВ-1Т, как таковой, имеет почти совершенную структуру монокристаллического графита и обладает сильно различающимися физическими свойствами в направлениях осей  $c$  и  $a$ . Электропроводность в направлении оси  $c$  (т.е. перпендикулярно слоям гексагонов) примерно в 1000 раз меньше, чем в направлениях, перпендикулярных оси  $c$ . Поскольку транспорт вторичных электронов в твердых телах коррелирует с проводимостью, то при повышенных температурах ( $T > T_a$ ) увеличение угла падения ионов  $\theta$  и восстановление структуры поверхностного слоя высокоориентированного пирографита из-за уменьшения степени первичных радиационных нарушений приводит к уменьшению эффективной длины  $\lambda_{\text{cr}}$  пробега вторичных электронов в направлении выхода из поверхности (т.е. в направлении оси  $c$ ). Можно предположить, что соответствующая длина свободного пробега электронов  $\lambda_{\text{cr}}$  меньше  $\lambda_{\text{poly}}$  для поликристаллической фазы и разница возрастает с ростом угла падения ионов, поскольку  $\lambda_{\text{poly}}$  является величиной, усредненной по многим кристаллитам, расположенным хаотическим образом. Отметим, что  $\lambda_{\text{cr}}$  становится меньше  $\lambda_{\text{poly}}$  и разница  $\Delta\lambda = \lambda_{\text{poly}} - \lambda_{\text{cr}}$  растет по мере увеличения угла падения ионов. Это следует из поведения зависимости  $\gamma\cos\theta$  от  $\theta$  при повышенных температурах:  $\gamma\cos\theta$  монотонно убывает с увеличением угла падения ионов. Как отмечалось в разделе 5.2, если длина свободного пробега электронов не изменяется, то и  $\gamma\cos\theta = r\sigma\lambda\omega$  есть также константа при  $\theta \leq \theta_c$ . Такое поведение наблюдалось для поликристаллических графитов при всех исследованных температурах облучения и для УПВ-1Т при комнатной температуре.

В разделе 5.4 рассмотрены температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии стеклоглеродов. Ионно-индуцированное упорядочение стеклоглеродов привело к наличию температурных зависимостей  $\gamma(T)$  при нормальном падении ионов, типичных для поликристаллических графитов и высокоориентированного пиролитического углерода. Различия носят количественный характер. А именно, для стеклоглерода величина  $T_a$  меньше, чем для УПВ-1Т, для которого  $T_a$  в свою очередь меньше, чем для поликристаллических графитов при прочих равных условиях, рис.4. Абсолютные значения коэффициента ионно-электронной эмиссии для стеклоглерода во всем исследованном диапазоне температур найдены более высокими, чем для графитов.

**Заключение** содержит перечень основных результатов и выводов, полученных в диссертации.

1. Впервые экспериментально определены угловые зависимости коэффициента распыления поликристаллических графитов марок РОСО-AXF-5Q и МПГ-8 при облучении молекулярными ионами  $N_2^+$  с энергией 30 кэВ в интервале углов

падения ионов от 0 до 80°. Показано, что в случае облучения при температурах, близких к комнатным, измеренные угловые зависимости  $Y(\theta)$  соответствуют разупорядоченному (аморфизированному) состоянию поверхности. Сравнение с данными компьютерного моделирования с учетом влияния топографии поверхности, развивающейся при высокодозном облучении, показало, что угловые зависимости коэффициента распыления  $Y(\theta)$  поликристаллических графитов типичны для физического распыления.

2. Впервые измерены угловые зависимости высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при облучении молекулярными ионами  $N_2^+$  с энергией 30 кэВ в интервале углов падения ионов от 0 до 80° при комнатной температуре и  $T = 400^\circ\text{C}$ . Показано, что угловая зависимость  $Y(\theta)$ , измеренная при комнатной температуре близка к зависимостям, измеренным для поликристаллических графитов, и, как и для них, соответствует аморфизированному высокодозному облучением состоянию поверхностного слоя. Угловая зависимость, измеренная при  $T = 400^\circ\text{C}$ , соответствует поликристаллическому состоянию поверхностного слоя и, в отличие от исходно поликристаллических графитов является немонотонной с минимумом при угле падения ионов  $\theta = 60^\circ$ . Подавление распыления в три раза по сравнению с облучением при комнатной температуре обусловлено развитием на поверхности при  $\theta = 60^\circ$  системы игольчатых конусов.
3. Исследованы ионно-индуцированные структурные изменения в углеродных материалах (высокоориентированный пиролитический графит, поликристаллические графиты, стеклоглероды) при высокодозном облучении ионами  $N_2^+$  и  $Ag^+$  с энергией 30 кэВ. при помощи дифракции быстрых электронов на отражение. Показано, что облучение при температурах, близких к комнатной, приводит к разупорядочению кристаллической структуры материалов, при повышенных температурах ( $T > T_a$ ) облучения для поликристаллических графитов структура близка к исходной, для высокоориентированного пирографита – к поликристаллической, в высокотемпературных стеклоглеродах обнаружено ионно-индуцированное упорядочение материала относительно их исходного состояния.
4. Экспериментально и теоретически показано, что зависимости коэффициента кинетической ионно-электронной эмиссии углеродных материалов от температуры облучения  $\gamma(T)$  имеют ступенчатый характер – скачок выхода электронов при температуре  $T_a$ , связанный с увеличением длины свободного пробега вторичных электронов при отжиге радиационных нарушений.
5. Впервые в теоретическом анализе кинетической ионно-электронной эмиссии обращено внимание на влияние радиационных нарушений не только на движение бомбардирующих ионов, но и на транспорт вторичных электронов. Получено прямое экспериментальное подтверждение отличия взаимодействия вторичных электронов с аморфным веществом и с поликристаллами.

6. Установлено, что состав, топография и кристаллографическая структура ионно-индуцированного измененного слоя существенно различаются вблизи комнатной и повышенной температурах облучения образцов. Области различного поведения характеристик модифицированного слоя разделяются температурой динамического отжига радиационных нарушений  $T_d$ , которую в настоящей работе определяли по температуре скачка коэффициента  $\gamma$  ионно-электронной эмиссии на кривых зависимости  $\gamma(T)$ .
7. Обнаруженные температурные и угловые закономерности кинетической ионно-электронной эмиссии углеродных материалов, в том числе скачок выхода электронов за счет увеличения длины свободного пробега вторичных электронов дают возможность развития экспериментальных ионно-пучковых методов исследования и анализа радиационных нарушений в этих материалах, мониторинга *in situ* состояния облучаемой поверхности, в том числе диагностики радиационно-индуцированного перехода от кристаллического состояния поверхности углеродного материала к аморфизированному состоянию.

#### **Список цитируемой литературы.**

1. Бор Н. Прохождение атомных частиц через вещество. - М.: ИЛ, 1950. -149 с.
2. Динс Дж., Винйард Дж., Радиационные эффекты в твердых телах. - М.: Изд-во иностр. лит., 1960. - 243 с.
3. Барченко В.Т., Колгин Е.А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / Под ред. Быстрова Ю.А. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. - 332с.
4. Лейман К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов. - М.: Атомиздат, 1979. - 296 с.
5. Williams J.S., Poate J.M. Ion Implantation and Beam Processing. Eds. New-York: Academic Press, 1984. - 438 p.
6. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физ. распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Р. Бериша. - М.: Мир, 1984. - 336 с.
7. Parilis E.S., Kishinevsky L.M., Turaev N.Yu., Baklitzky B.E., Umarov F.F., Verleger V.Kh., Nizhnaya S.L., Bitensky I.S. Atomic Collisions on Solid Surfaces. - Elsevier, North-Holland, 1993. - Chap.11. - 663 p.
8. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. - М.: Аспект Пресс, 1997. - 718с.
9. Novikov L.S., Solovyev G.G., Vasil'ev V.N., Grigorevskiy A.V., Kiseleva L.V. Degradation of thermal control coatings under influence of proton irradiation. // Journal of Spacecraft and Rockets. - 2006. - v. 43, №. 3. - p. 518-519.
10. Платонов П.А., Штромбах Я.И., Карпухин В.И., Виргильев Ю.С., Чугунов О.К., Трофимчук Е.И. Действие излучения на графит высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. / В кн.: Атомноводородная энергетика и технология: Сб статей. Вып. 6. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - с. 77-128.

11. Калинин Б.А., Скоров Д.М., Якушин В.Л. Проблемы выбора материалов для термоядерных реакторов: Радиационная эрозия. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 184с.
12. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Взаимодействие частиц плазмы с поверхностью // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы. Т. 11. - М.: ВИНТИ, 1989. - с. 150-190.
13. Машкова Е.С. Современные тенденции в исследовании распыления твердых тел. / В кн.: Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: Сб. статей 1986 – 1987гг.: Пер. с англ./ Сост. Е.С.Машкова. – М.: Мир, 1989. - с. 5-45.
14. Виргильев Ю.С. Конструкционные углеродные материалы для установок термоядерного синтеза // Неорганические материалы. - 1994. - т. 30. - с. 903-916.
15. Burchell T.D. Radiation Effects in Graphite and Carbon-Based Materials // MRS Bulletin. - 1997. - v. 22, № 4. - p. 29-34.
16. Federichi G., Skinner C.H., Brooks J.N. Coad J.P., Grisolia C., Haasz A.A., Hassanein A., Philipps V., Pitcher C.S., Roth J., Wampler W.R., Whyte D.G. Plasma-Material Interactions in Current Tokamaks and their Implications for Next-Step Fusion Reactors // IPP – Report. - 2001. - 9/128. p. 1-336.
17. Shulga V.I. Sputtering of platinum by argon ions: A simulation study. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. - 2001. - v. 174. - p. 423-432.

**Основные публикации по теме диссертации.**

1. Bogomolova L.D., Borisov A.M., Krasil'nikova N.A., Mashkova E.S., Nemov A.S., Tarasova V.V. Study of near surface layer of graphite produced by nitrogen ion bombardment at high doses. // Radiation Effects and Defects in Solids. - 2002. - v. 157. - p. 493-508.
2. Борисов А.М., Крылова Е.А., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А., Хохлов А.Ф. Исследования изменения кристаллической структуры поверхностных слоев графита при интенсивной ионной бомбардировке. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - № 4. - с. 92-96.
3. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А., Хохлов А.Ф. Ионно-индуцированные структурные изменения в стеклоуглероде. // Вопросы атомной науки и техники, серия “Термоядерный синтез”. - 2003. - вып. 1. - с. 8-14.
4. Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S. Angular and temperature dependencies of ion induced electron emission of polycrystalline graphite. // VACUUM. - 2004. - v. 73/1. - p. 65-72.
5. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Затекин В.В., Куликаускас В.С., Машкова Е.С., Немов А.С. Температурные эффекты при распылении стеклоуглерода молекулярными ионами азота. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2004. - № 4. - с. 6-12.
6. Виргильев Ю.С., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А., Хохлов А.Ф. Ионно-индуцированные структурные изменения в

- высокоориентированном пирографите. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2004. - № 4. - с. 13-17.
7. Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С., Камнева С.А., Курнаев В.А., Трифонов Н.Н. Влияние ионно-индуцированного рельефа на высокодозное распыление графита. Вопросы атомной науки и техники // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. - 2004. - вып.2. - с. 65-72.
  8. Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Parilis E.S. Ion-induced electron emission – monitoring the structure transitions in graphite. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. - 2005. - v. 230/1-4. - p. 443-448.
  9. Богомолова Л.Д., Борисов А.М., Куликаускас В.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Тарасова В.В. Исследование ионно-индуцированных структурных состояний в поликристаллическом графите. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - № 3. - с. 64-69.
  10. Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А. Особенности ионно-электронной эмиссии графита. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - № 3. - с. 70-76.
  11. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Сорокин А.И. Влияние индуцированных ионным облучением структурных изменений в стеклоуглеродах на температурные зависимости ионно-электронной эмиссии. // Физика и химия обработки материалов. - 2005. - № 1. - с. 27-30.
  12. Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Parilis E.S. Effect of radiation damage on ion-induced electron emission from highly oriented pyrolytic graphite. // VACUUM - 2005. - v. 80. - p. 295-301.
  13. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А. Угловые и температурные зависимости ионно-электронной эмиссии высокоориентированного пирографита. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2006. - № 1. - с. 7-13.
  14. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Дьячковский А.П., Машкова Е.С., Немов А.С., Сорокин А.И. Влияние температуры термообработки стеклоуглерода на ионно-индуцированные процессы. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2006. - № 4. - с. 9-13.
  15. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С. Распыление высокоориентированного пирографита при высокодозной бомбардировке молекулярными ионами азота. // Известия РАН. Серия Физическая. - 2006. - т. 70, № 6. - с. 820-824.
  16. Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Virgiliev Yu.S. Sputtering of HOPG under high-dose ion irradiation. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. - 2007. - v. 256. - p. 363-367.

Отпечатано в ООО «ГРАФ экс»  
Золоторожский вал, дом 11

---

Подписано к печати 26.09.2007.  
Заказ №-

Объем 1 п.л.  
Тираж 70 экз.

---