

На правах рукописи

Севостьянова Варвара Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ
ИЗМЕНЕНИЙ И ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ
ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА
ПРИ ВЫСОКОДОЗОВОМ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012 г.

Работа выполнена на кафедре «Технология обработки материалов потоками высоких энергий» ФГБОУ ВПО «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского» (МАТИ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Борисов Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: Афанасьев Виктор Петрович,
доктор физико-математических наук,
профессор Национального
исследовательского университета «МЭИ»

Залавутдинов Ринад Харисович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Института
физической химии и электрохимии имени
А.Н. Фрумкина РАН

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», Москва

Защита состоится 10 октября 2012 г. в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 5 (19-й корпус Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан «05» сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.45 на базе Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова

кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Процессы взаимодействия частиц плазмы с поверхностью материалов являются предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований, связанных с актуальными задачами ионно-плазменных технологий модифицирования поверхностного слоя материалов и синтеза новых материалов, обеспечения радиационной стойкости материалов, применяемых в космических аппаратах и термоядерных установках, применения ионных пучков для анализа поверхностного слоя материалов [1-4]. Бомбардирующие ионы и смещенные атомы твердого тела при торможении в упругих и неупругих взаимодействиях приводят к ряду явлений, среди которых накопление и отжиг радиационных дефектов, распыление атомов, эмиссия электронов и фотонов, радиационно-индуцированная диффузия и механические напряжения. Модифицирование структуры и морфологии поверхностного слоя материала приводит к значительным изменениям его физико-химических свойств.

Углеродные материалы (искусственные поликристаллические графиты, пиро- и стеклоуглероды, углерод-углеродные композиционные материалы) обеспечивают широкий диапазон функциональных свойств, и в радиационных исследованиях они выделяются в отдельный класс материалов [4,5]. Накопленные результаты исследований ионно-индуцированных процессов для углеродных материалов свидетельствуют о необходимости проведения систематических исследований по выявлению роли специфической слоистой структуры и анизотропии этих материалов [6]. Особое место среди углеродных материалов занимает высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ), который по своим свойствам является наиболее близким к монокристаллическому графиту. Наряду с известными его применениями в качестве высококачественных монохроматоров рентгеновского излучения и эталонов атомногладкой поверхности для зондовой микроскопии, ВОПГ часто используют в качестве наиболее анизотропного и слоистого углеродного материала при синтезе и исследовании ионно-индуцированных наноструктур, модифицировании физико-химических свойств поверхности, в исследованиях поведения углеродных материалов в радиационных полях различной природы. В частности, известными являются применения ВОПГ при изучении физики треков ионов высоких энергий в материалах, наноструктурирования поверхности

многозарядными ионами, поведения углеродных материалов в плазме изотопов водорода и гелия в термоядерных установках.

Изучению процессов ионно-лучевого модифицирования структуры и морфологии поверхностного слоя, их влиянию на эмиссионные характеристики ВОПГ, влияния анизотропии свойств на ионно-индуцированные процессы в углеродных материалах посвящена данная диссертационная работа.

Цель и основные задачи работы

Целью работы является установление закономерностей и механизмов изменения структуры и морфологии поверхностного слоя ВОПГ при высоких флюенсах и различных температурах облучения ионами средних масс (Ar^+ , Ne^+ , N^+) с энергией порядка десятков кэВ, влияния ионного облучения на автоэмиссионные характеристики ВОПГ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Разработка методик и экспериментальное исследование закономерностей изменения структуры и морфологии поверхности ВОПГ при варьировании геометрии облучения, сорта и энергии ионов, температуры мишени.

2. Аналитические и компьютерные расчеты уровня первичных радиационных нарушений углеродных материалов, характеризующего стационарные условия высокодозового ионного облучения.

3. Экспериментальное исследование влияния ионного облучения на автоэмиссионные характеристики поверхности ВОПГ при различных температурах и углах падения ионов на мишень. Выявление возможностей получения путем ионно-лучевой обработки низковольтной полевой эмиссии ВОПГ и других углеродных материалов

4. Анализ экспериментально найденных структурно-морфологических изменений и эмиссионных свойств ВОПГ в рамках существующих механизмов и моделей ионно-индуцированных процессов с учетом анизотропии свойств материалов.

Научная новизна работы

В работе впервые получены следующие результаты.

1. Экспериментально обнаружен эффект глубокого модифицирования ВОПГ высокодозовым облучением ионами аргона при комнатной температуре, который проявляется в виде дефектного кристаллического слоя толщиной, многократно превышающей пробег ионов. Его образование приводит в процессе нагрева ВОПГ

к пику на температурной зависимости ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ при температуре ионно-индуцированного текстурного перехода $T_t \approx 150$ °С.

2. Экспериментально обнаружен, в отличие от других углеродных материалов, эффект глубокого модифицирования ВОПГ при высокодозовом облучении ионами аргона в локальной области температур при $T \approx 250$ °С. Эффект проявляется в виде развитой морфологии поверхности со столбчато-игольчатыми элементами высотой $\sim 10^3$ нм и с таким же по глубине проникновением внедрённого аргона. Предполагается, что этот эффект связан с анизотропным диффузионным массопереносом междоузельных атомов углерода.
3. Оба ионно-индуцированных эффекта глубокого модифицирования имеют пороги по энергии ионов. Экспериментально измеренные пороговые значения энергий для ионов аргона использованы для оценки пороговых уровней радиационных нарушений, вызывающих соответствующие эффекты.
4. Исследовано влияние облучения ионами аргона энергии 30 кэВ на полевою эмиссию ВОПГ. Найдено, что к появлению низковольтной автоэлектронной эмиссии приводит ионное облучение при повышенных ($T \approx 250$ и 400 °С) температурах мишени. Спектры комбинационного рассеяния света показывают влияние на них температуры и геометрии, при которой производилось облучение, и проявляют особенности, коррелирующие с появлением низковольтной полевою эмиссии.

Научная и практическая ценность работы

1. Выявленные закономерности изменения структуры и морфологии поверхностного слоя ВОПГ важны для решения проблем радиационной стойкости углеродных материалов в условиях высокодозового облучения и переменных температур в термоядерных исследованиях, при решении проблем деградации покрытий и элементов космических летательных аппаратов.
2. Установленные корреляции изменения выхода вторичных электронов со структурно-морфологическими изменениями в материалах, вызываемыми ионным облучением, расширяют возможности ионно-пучковых методов исследования радиационных нарушений и мониторинга состояния облучаемой поверхности.

3. Экспериментально найденные эффекты глубокого ионно-лучевого модифицирования ВОПГ существенно расширяют понимание радиационных процессов в углеродных материалах. Методика и сами значения измеренных пороговых значений энергий эффектов глубокого модифицирования могут быть использованы в исследованиях стойкости углеродных материалов к ионному воздействию.
4. Результаты исследования влияния ионного облучения на автоэмиссионные характеристики поверхности ВОПГ могут быть использованы для получения низковольтных полевых эмиттеров.
5. Разработанный планшетный стенд лазерной гониофотометрии (ЛГФ) с возможностью регистрации пространственных распределений отраженного света расширяет возможности метода ЛГФ для исследования микрогеометрии поверхностей.

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 и расчетных данных с литературными, полученными при сопоставимых условиях.

На защиту выносятся следующие положения

1. Результаты экспериментального исследования структурных и морфологических изменений поверхностного слоя базисной грани (001) высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т при высоких флюенсах 10^{18} - 10^{19} ион/см² облучения ионами аргона с энергиями от 8 до 30 кэВ в интервале температур мишени от комнатной до 400 °С. Вывод о том, что отражающие ионно-индуцированные структурно-морфологические изменения в поверхностном слое ВОПГ температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$, в отличие от соответствующих данных для поликристаллических графитов, могут различаться при измерении в процессе нагрева и охлаждения.
2. Основным различием зависимостей $\gamma(T)$ при нагреве и охлаждении ВОПГ является наличие характерного пика при температуре $T_t \approx 150$ °С ионно-индуцированного текстурного перехода в процессе нагрева и его отсутствие на зависимости $\gamma(T)$ при охлаждении. В

условиях облучения при достаточно малых энергиях или достаточно большом угле падения ионов зависимости $\gamma(T)$ при нагреве и охлаждении становятся близкими.

3. Сравнительный анализ структуры и морфологии измененного поверхностного слоя после высокодозового облучения ВОПГ ионами аргона различных энергий при фиксированных температурах мишени из интервала 20 – 400 °С, выбранных по данным мониторинга ионно-индуцированных изменений с помощью измерений зависимостей $\gamma(T)$. Вывод о том, что определяемая методами спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (РОР) глубина измененного слоя может на порядок величины превышать характерный пробег ионов в мишени, составляющий в зависимости от энергии ионов 10 - 40 нм. Эффекты глубокого модифицирования проявляются в узкой области температур при $T \approx 250$ °С и при температурах, близких к комнатной ($T < T_t$). Оба эффекта имеют порог по энергии ионов.
4. Глубокое модифицирование при облучении при $T \approx 250$ °С приводит к развитой морфологии поверхности со столбчато-игольчатыми элементами высотой, соответствующей глубине внедренного аргона $\sim 10^3$ нм по данным спектрометрии РОР, и может быть связан с анизотропным диффузионным массопереносом междуузельных атомов углерода.
5. Глубокое модифицирование при облучении при комнатной температуре приводит по данным спектрометрии РОР в геометрии каналирования к дефектному кристаллическому слою толщиной, многократно превышающей пробег ионов. Его образование приводит в процессе нагрева ВОПГ к пику на температурной зависимости ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ при температуре ионно-индуцированного текстурного перехода $T_t \approx 150$ °С.
6. Компьютерные и аналитические расчеты энергетической зависимости уровня первичных радиационных нарушений ν в числе смещений на атом (СНА) при высокодозовом облучении и их использование для оценки пороговых уровней радиационных нарушений для эффектов глубокого модифицирования ВОПГ при комнатной температуре и $T \approx 250$ °С.
7. Результаты экспериментального исследования влияния облучения ионами аргона энергии 30 кэВ на автоэмиссионные характеристики поверхности ВОПГ и стеклоуглерода. Выводы о том, что к появлению низковольтной автоэлектронной эмиссии приводит облучение при

повышенных ($T \approx 250$ и 400 °С) температурах мишени. Спектры комбинационного рассеяния света показывают влияние на них температуры и геометрии, при которой производилось облучение, и проявляют особенности, коррелирующие с появлением низковольтной полевой эмиссии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях, совещаниях и семинарах: 9-ом Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (Москва, 2009); XL и XLII Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2010, 2012), XIX и XX Международных конференциях «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Москва, 2010, 2011); III Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Н. Новгород, 2010); 24 International Conferences on Atomic Collisions in Solids (ICACS-24, Krakow, Poland, 2010); 20 International Conference on Ion Beam Analysis (IBA 20, Itapema, Brasil, 2011); 9–10 Всероссийских научно-технических конференциях «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, МАТИ, 2010 – 2011); XXXV – XXXVIII Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2009-2012), 16-18 Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2010-2012), XV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, МИФИ, 2012), научных семинарах отдела ОФАЯ НИИЯФ МГУ.

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертации получены при определяющем вкладе автора, при личном участии в планировании и проведении экспериментов и обсуждении полученных результатов. Автором разработан планшетный стенд лазерной гониофотометрии, проведены компьютерные и аналитические расчеты уровня первичных радиационных нарушений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 7 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 164 наименования. Объем диссертации составляет 148 страниц, включая 79 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Глава 1 содержит обзор литературы по теме диссертации, на основании выводов которого сформулированы задачи исследования. Рассмотрены вопросы экспериментального и теоретического изучения закономерностей изменения морфологии и структуры поверхности при ионном облучении, учета накопления радиационных нарушений и развивающегося на поверхности материалов при ионно-лучевом воздействии рельефа, оказывающего значительное влияние на коэффициенты физического распыления и ионно-электронной эмиссии. Особое внимание обращено на работы, в которых изучались вопросы взаимосвязи эмиссионных процессов, изменения структуры и морфологии поверхностного слоя ВОПГ, обусловленные бомбардировкой атомарными и молекулярными ионами азота и ионами инертных газов с энергиями в десятки килоэлектронвольт.

В **главе 2** дано описание экспериментальной аппаратуры, стандартных и разработанных методов исследования, аналитического и компьютерного методов оценки уровня первичных радиационных повреждений в материале с учетом движения границы поверхности при ее распылении.

В **разделе 2.1** приводятся характеристики масс-монохроматора НИИЯФ МГУ, на котором получали сепарированные по массам пучки ионов инертных газов и азота энергии от 10 до 30 кэВ с сечением 0.3 см^2 и плотностью потока ионов $\varphi \sim 10^{15} \text{ ион}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (плотность ионного тока до $1 \text{ мА}/\text{см}^2$). Откачка высоковакуумной камеры ионного облучения производилась с помощью безмасляной турбомолекулярной системы фирмы Leibold. Держатель мишени позволяет варьировать угол падения ионов и температуру образцов. Для охлаждения использовали проточную воду, для нагрева – плоский танталовый нагреватель. При мониторинговании процесса облучения периодически с интервалом $\Delta t = 1 - 3 \text{ мин.}$ (по флюенсу $\varphi \cdot \Delta t \sim 10^{16} - 10^{17} \text{ ион}/\text{см}^2$) фиксировали ионный ток на мишень I_i , ток коллектора вторичных электронов I_e , температуру мишени и давление в камере. По данным мониторинга определяли флюенс облучения φt и зависимости коэффициента ионно-

электронной эмиссии $\gamma = I_e/I_i$ от флюенса и температуры мишени. Приборная погрешность измерения γ не превышала 3%. Длительность ионного облучения варьировали от нескольких минут до нескольких часов (по флюенсу $10^{18} - 10^{19}$ ион/см²).

В **разделе 2.2** приводится описание образцов углеродных материалов и их подготовка к эксперименту. В работе использовали пластинки высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т производства «НИИГрафит». Его мозаичная структура характеризуется осевой текстурой в направлении [001], нормальном к поверхности пластинок, разориентировка базисных плоскостей в образцах не превышает 50'. Перед каждой серией облучения проводили съем предшествующего измененного слоя с помощью скотча до получения зеркальной поверхности образцов УПВ -1Т.

В **разделе 2.3** описываются оборудование и методы исследования морфологии, структуры, элементного состава и автоэмиссионных свойств поверхности. Морфологию поверхности до и после облучения исследовали на оптическом микроскопе *Axiostar plus*, зондовом микроскопе ФЕМТОСКАН, растровом электронном микроскопе TESCAN LYRA3 FEG XMU. Для количественного анализа микрогеометрии использовали метод гониофотометрии отраженного света шероховатой поверхностью на экспериментальном стенде лазерной гониофотометрии (ЛГФ) с использованием лазерного модуля S10. Метод ЛГФ применяли для получения распределений локальных углов наклона микрограней шероховатой поверхности. Для расширения возможностей метода разработан планшетный стенд лазерной гониофотометрии с возможностью регистрации пространственных распределений отраженного света. Поверхность образцов исследовали также широко применяемым для углеродных материалов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света на установке NT-MDT NTEGRA-Spectra.

Кристаллическую структуру образцов исследовали методами дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) и спектрометрии РОР в геометрии каналирования. Исследования методом ДБЭО, позволяющим получать информацию от 1 - 2 монослоев поверхности, проводили на электронографе ЭМР-102 при ускоряющем напряжении 50 кВ и токе пучка 50 мкА. Использовали также анализ профилей линий Косселя рентгеновского K_{α} излучения аргона, генерируемое протонами в мишени.

Элементный анализ поверхностного слоя проводили методом спектрометрии РОР ионов гелия энергии 1.5 – 2 МэВ. Использовали также метод спектрометрии индуцированного протонами рентгеновского излучения (ИПРИ). Исследования методами РОР и ИПРИ проводили на спектрометрических комплексах на ускорителях АН-2500 и ЭГ-8 НИИЯФ МГУ. Профили концентрации внедренных ионов по глубине определяли как путем моделирования, так и путем прямого преобразования спектров РОР.

Автоэмиссионные свойства поверхности изучали с помощью широкоапертурного диодного тестера низковольтной полевой эмиссии в режимах измерения вольтамперных характеристик и визуализации полевой эмиссии с помощью стеклянной пластинки с металлизированной пленкой и нанесенным на неё люминофором.

Раздел 2.4 посвящен аналитическим и компьютерным методам исследования. Компьютерное моделирование взаимодействия ионов с материалами проводили с помощью программы SRIM. Дозовой характеристикой радиационного воздействия на материалы является уровень первичных радиационных повреждений, количественная мера которого – среднее число смещенных атомов (СНА) на атом материала $\nu = \sigma_{\text{dam}} \cdot \phi t$. При ионном облучении сечение дефектообразования $\sigma_{\text{dam}} \approx 0.4 S_n / E_d$ определяется сечением ядерного торможения S_n и пороговой энергией дефектообразования E_d . Распыление поверхности и, соответственно, ее движение при ионном облучении приводит к ограничению накопления радиационных нарушений. При высоких флюенсах ионного облучения после распыления слоя порядка глубины образования дефектов $x = R_d$ устанавливается стационарный профиль уровня радиационных нарушений

$$\nu(x) = \frac{n_0}{Y} \int_x^{R_d} dx' \cdot \sigma_{\text{dam}}(x'), \quad (1)$$

где n_0 – атомная концентрация мишени, Y - коэффициент распыления.

В расчетах $\nu(x)$ использовали как аналитические оценки, так и компьютерное моделирование. Аналитические оценки проводили для обратноквадратичного потенциала межатомного взаимодействия, когда величина S_n от энергии иона практически не зависит и величину σ_{dam} можно полагать одинаковой на всей глубине дефектообразования R_d . Коэффициент распыления определяли по формуле Зигмунда, см., например [1]. Расчеты профилей $\nu(x)$ проводили также с использованием данных моделирования по программе SRIM. Движения границы

поверхности в результате распыления программа не учитывает, ее учет проводили путем численного интегрирования профилей $\sigma_{\text{dam}} \cdot n_0$, смещенных относительно друг друга на достаточно малый шаг по глубине $\delta = Y \cdot (\varphi \cdot t)_{\delta} / n_0$.

Глава 3 посвящена исследованиям ионно-индуцированных процессов, изменяющих морфологию и кристаллическую структуру поверхностного слоя ВОПГ. Экспериментально исследуются температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии ВОПГ и поликристаллического графита в циклах нагрев-охлаждение мишени при различных энергиях и углах падения ионов. Рассматривается влияние температуры облучаемой мишени и энергии ионов на морфологию поверхности и структуру поверхностного слоя ВОПГ. Методом спектрометрии Резерфордского обратного рассеяния исследуются профили внедрения ионов по глубине при различных температурах облучения и энергии бомбардирующих ионов, а также в геометрии каналирования оценивается глубина разупорядоченного слоя ВОПГ для различных условий облучения.

Измерения температурных зависимостей коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ (**раздел 3.1**), отражающих структурно-морфологические изменения в поверхностном слое, проводили при облучении ионами Ar^+ и Ne^+ в циклах нагрев - охлаждение в интервале температур от комнатной до $T \approx 400$ °С при варьировании энергии и угла падения бомбардирующих ионов. Найдено, что температурные зависимости $\gamma(T)$ для ВОПГ, в отличие от соответствующих данных для поликристаллических графитов, могут различаться при измерении в процессе нагрева и охлаждения, рис.1. Если при облучении в процессе нагрева на зависимости $\gamma(T)$ наблюдается характерный пик при температуре текстурного перехода ($T_t \approx 150$ °С для ионов Ar^+) [7], то в процессе охлаждения он отсутствует, выход электронов в целом ниже, чем при нагреве. Сравнение зависимостей $\gamma(T)$ в циклах нагрев – охлаждение при облучении ионами с энергиями от 8 до 30 кэВ показало пороговый характер по энергии E наличия пика на зависимости $\gamma(T)$ при нагреве. Пороговое значение появления пика при облучении ионами Ar^+ составляет $E_1 \geq 10$ кэВ. Анализ воспроизводимости кривых $\gamma(T)$ в циклах нагрев – охлаждение позволяет предположить существование эффекта образования глубокого измененного слоя при повышенных температурах с порогом по энергии ионов. Пороговое значение для ионов аргона $E_2 \geq 15$ кэВ.

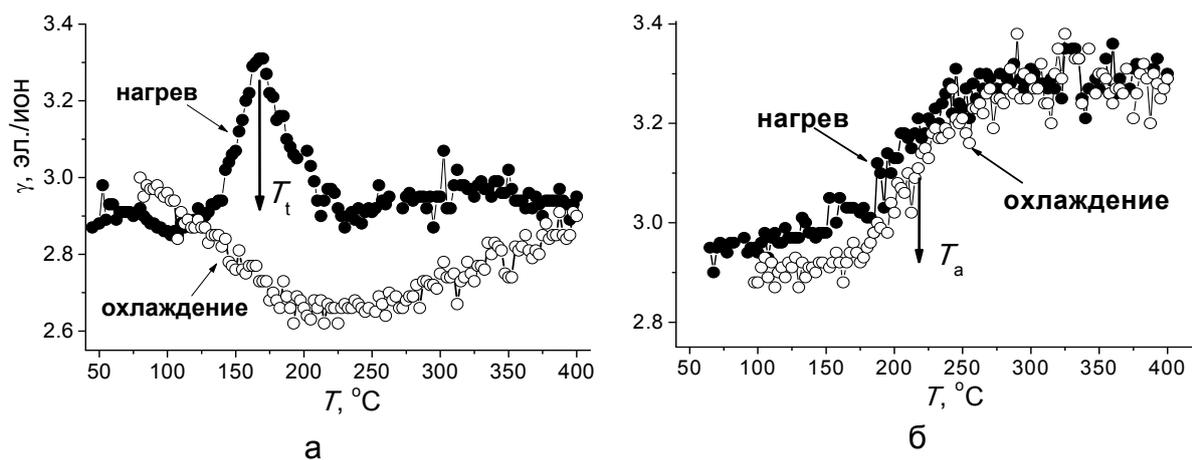


Рис.1. Температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии при облучении ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ базисной грани ВОПГ (а) и поликристаллического графита МПГ–8 (б) при непрерывном облучении в процессе нагрева и охлаждения образца

В разделе 3.2 приводятся результаты исследования ионно-индуцированной морфологии поверхности ВОПГ с помощью РЭМ и лазерной гониофотометрии. Найдено, что морфология поверхности образцов в результате облучения ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ при нагреве от комнатной до температуры $150\text{ }^\circ\text{C}$ и в результате облучения после цикла нагрева от комнатной температуры до $400\text{ }^\circ\text{C}$ и последующем охлаждении до $150\text{ }^\circ\text{C}$ отличаются. В первом случае морфология характеризуется сеткой тонкостенных хребтов, которые, срастаясь, образуют колонии конусов нанометрического масштаба. Во втором случае наблюдаются хребты толщиной в сотни нанометров с большими размерами по высоте и с большей поверхностной плотностью. Лазерная гониофотометрия показала, что только в первом случае облучение приводит к немонотонному распределению локальных углов наклона $F(\beta)$ микрограней шероховатой поверхности с дополнительным относительно базисной поверхности ВОПГ максимумом при $\beta \approx 40^\circ$ и его полушириной $\Delta\beta \sim 20^\circ$. Полученное различие микрогеометрии поверхности подтверждает предположенную ранее топографическую причину образования пика на зависимости $\gamma(T)$ при температуре $T = T_t$ за счет развития морфологии облучаемой поверхности.

Морфология поверхности ВОПГ, облученного ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ по нормали при фиксированных температурах, выбранных по результатам мониторинга ионно-индуцированных изменений с помощью температурных зависимостей $\gamma(T)$ из интервала от комнатной до $T \approx 400\text{ }^\circ\text{C}$, исследовали для флюенса облучения $\phi t \approx 10^{18}$ ион/см²

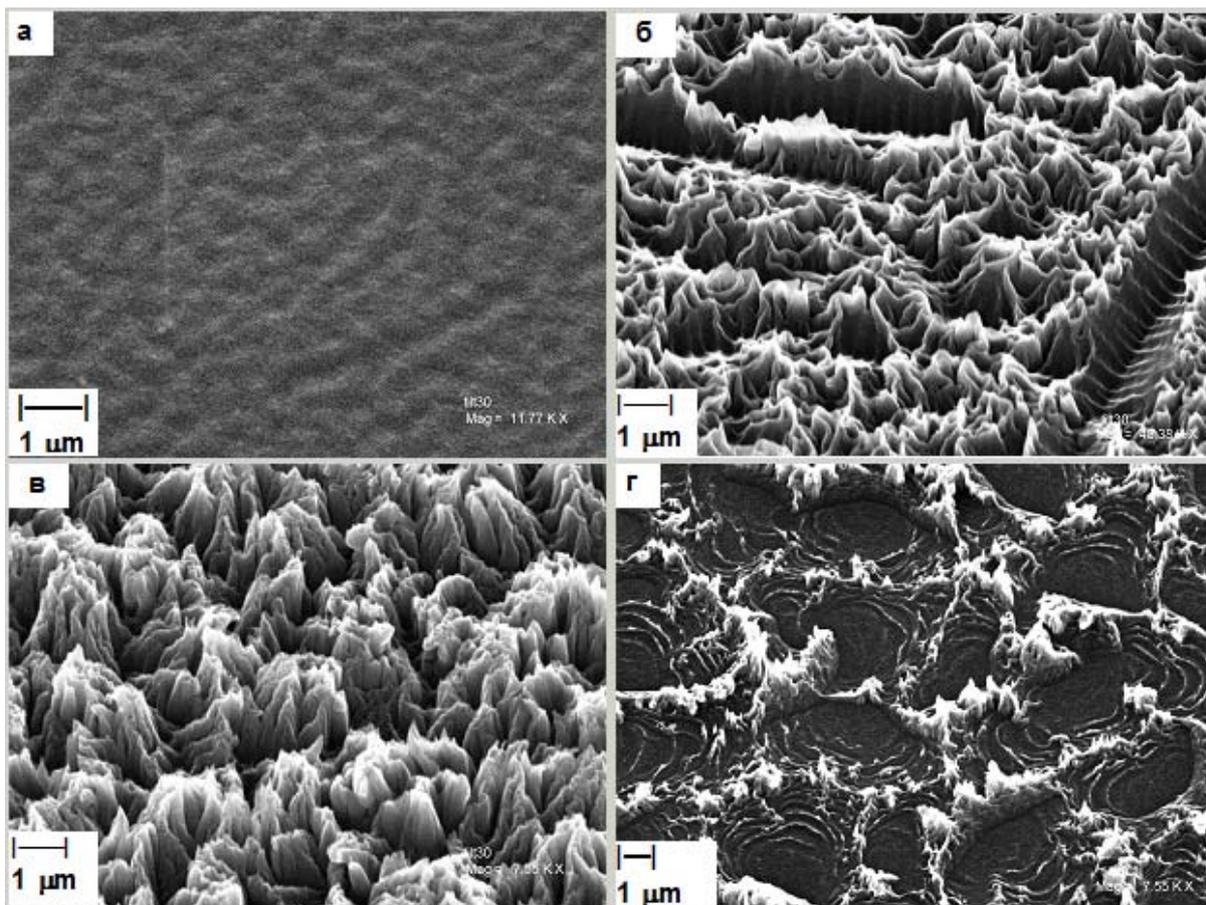


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности базисной плоскости ВОПГ УПВ–1Т после облучения при нормальном падении ионов Ag^+ с энергией 30 кэВ с флюенсом $\phi t \approx 10^{18}$ ион/см² при комнатной температуре (а), $T \approx 150$ °С (б), 250 °С (в) и 400 °С (г). Наклон образцов в РЭМ 30°

(рис. 2). Исходная зеркальная поверхность УПВ-1Т остается при ионном облучении относительно гладкой лишь при температурах, меньших температуры ионно-индуцированного текстурного перехода $T_t \approx 150$ °С (рис. 2а). На поверхности при этом образуются системы наноразмерных холмов и впадин. При $T_t = 150$ °С морфология поверхности базисной плоскости ВОПГ представляет собой сетку тонкостенных хребтов (рис.2б), которые, срастаясь, образуют колонии наноразмерных конусов. Ионное облучение при $T \approx 250$ °С приводит к развитию столбчато-игольчатой морфологии с высотой топографических элементов порядка тысячи нанометров (рис. 2в). При температурах $T > 250$ °С происходит уменьшение высоты ионно–индуцированных топографических элементов и при температуре 400 °С наблюдаются мозаичная структура из кратеров с уплощенным дном диаметром 1.5 - 3 мкм, окруженных стенками сросшихся конусов (рис. 2г).

Анализ кристаллической структуры поверхностного слоя ВОПГ дифракционными методами содержится в **разделе 3.3**. Метод дифракции быстрых электронов на отражение поверхностей образцов ВОПГ, необлученного и облученных с флюенсом $\phi t \approx 10^{18}$ ион/см² при фиксированных температурах образца $T \approx 60, 120, 150, 200$ и 400 °С, показал значительные изменения кристаллической структуры поверхностного слоя в зависимости от температуры мишени. Исходный образец ВОПГ характеризуется текстурированным состоянием, а структура облученного образца изменяется от поликристаллического при комнатной температуре облучения (на дифракционных картинах наблюдаются характерные кольца) до текстурированного при температуре облучения $T > T_t$.

Известно, что особенностью кристаллической структуры ВОПГ по данным рентгеноструктурного анализа образцов УПВ-1Т является наличие наряду с основной текстурной компонентой с осью [001], нормальной к базисной поверхности ВОПГ, также и дополнительной с осью [001], направленной под углом 32° к нормали к поверхности [6]. Экспериментальное исследование профилей линий Косселя при возбуждении протонами с энергией 1.5 МэВ характеристического K_α -излучения атомов аргона, внедренных в образцы УПВ-1Т, подтвердило наличие в ВОПГ и основной и дополнительной текстурных компонент. Контрастность линий Косселя зависят от условий ионного облучения. Облучение ионами аргона энергии 30 кэВ при температуре 150 °С дает более выраженные профили линий текстурных компонент, чем при температуре 200 °С.

В **разделе 3.4** анализируются результаты спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния по определению профилей внедрения аргона в поверхностном слое ВОПГ, облученного ионами Ar^+ с энергиями от 10 до 30 кэВ при различных температурах мишени. Для сравнения использовали образцы поликристаллического графита МПГ-8 и стеклоуглерода СУ-2500, облученных при тех же условиях. Найдено, что в результате цикла облучения ионами аргона энергии 30 кэВ при нагреве ВОПГ от комнатной температуры до 400 °С и последующего охлаждения до $T_t \approx 150$ °С профиль внедрения аргона является широким с шириной на полувысоте $h > 10^3$ нм, в то время как после облучения при нагреве от комнатной температуры до $T_t \approx 150$ °С $h \leq 200$ нм. Была также проведена серия экспериментов с облучением образцов ВОПГ с флюенсом $\phi t \approx 10^{18}$ ион/см² при фиксированных температурах облучаемого образца $T \approx 60, 150, 200, 250, 315$ и 390 °С. При комнатной

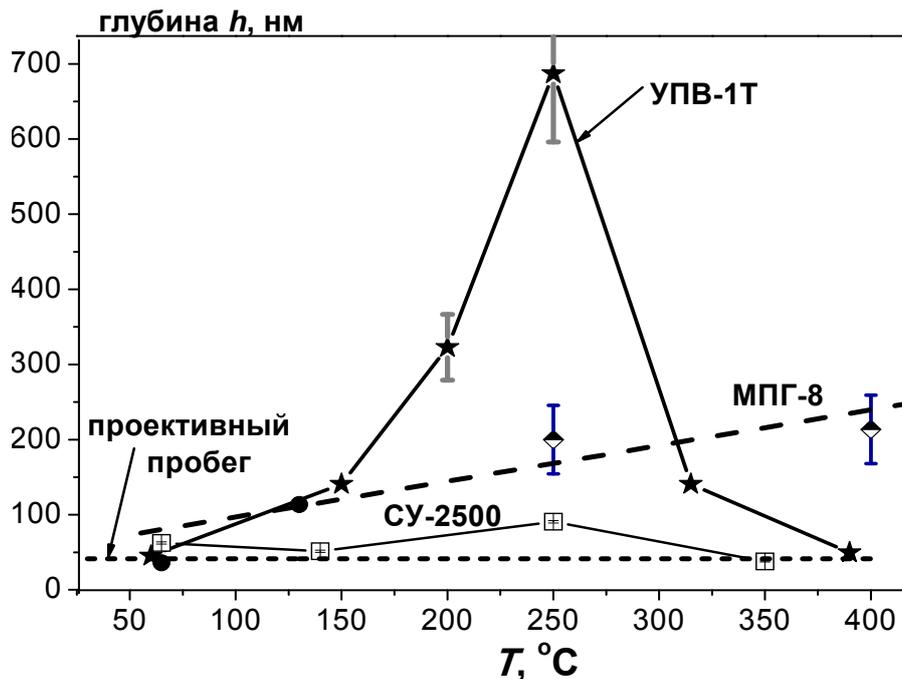


Рис. 3. Температурная зависимость глубины внедрения аргона в виде ширины h концентрационных профилей на полувысоте по данным спектрометрии РОР при облучении ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ с флюенсом $\phi t \approx 10^{18}$ ион/см² ВОПГ УПВ-1Т, поликристаллического графита МПГ-8 и стеклоглелерода СУ-2500

температуре глубина внедрения аргона соответствует проективному пробегу частиц ~ 40 нм (рис. 3). С ростом температуры глубина внедрения сильно увеличивается, $h \approx 700$ нм при 250°C . Затем глубина внедрения уменьшается так, что при $T = 400^\circ\text{C}$ она опять соответствует проективному пробегу. Этот эффект не наблюдается для поликристаллического графита и стеклоглелерода, глубина внедрения аргона в последних близка к расчетному проективному пробегу.

Глубина внедрения аргона характеризует толщину ионномодифицированного слоя. При толщинах порядка величины пробега распыление такого слоя требует флюенса облучения порядка величины 10^{17} ион/см² и обычно реализуется в эксперименте. Большая толщина измененного слоя ($>10^3$ нм) при облучении при температуре $T \approx 250^\circ\text{C}$ требует для своего распыления флюенс $\geq 10^{19}$ ион/см², что практически не позволяет измерять квазистатические зависимости $\gamma(T)$, которые могут отличаться и действительно различаются при нагреве и охлаждении (рис. 1). Главным отличием зависимостей $\gamma(T)$ является наличие пика на зависимостях при нагреве, который проявляется лишь при достаточно больших энергиях ионов. Это может служить критерием наличия или отсутствия эффекта глубокого модифицирования ВОПГ и быть использовано для определения энергетического порога эффекта.

Метод спектрометрии РОР в геометрии каналирования позволил получить дополнительные сведения о кристаллической структуре модифицированного слоя. Найдено, что облучение ионами аргона энергии 30 кэВ при температуре, близкой к комнатной ($T \approx 60^\circ\text{C}$), приводит к разупорядочению кристаллической структуры поверхностного слоя ВОПГ на глубину не менее 10^3 нм, что проявляется на спектрах РОР как отсутствие эффекта каналирования при направленной ориентации [001] по сравнению с типичным для каналирования уменьшением выхода РОР для необлученной зоны. При облучении ВОПГ с повышением температуры от комнатной до $T_t \approx 150^\circ\text{C}$ глубина модифицированного слоя сильно уменьшается и становится сопоставимой с длиной проективного пробега. На углеродной составляющей спектра РОР это проявляется в виде поверхностного пика для направленной ориентации [001] по сравнению со спектром для случайной ориентации кристалла относительно зондирующего пучка ионов гелия. Соответственно на температурной зависимости ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ при температуре $T_t \approx 150^\circ\text{C}$ появляется характерный пик. При достаточно малой энергии ионов аргона $E \leq 10$ кэВ этот пик на зависимостях $\gamma(T)$ исчезает. Энергия $E_1 \approx 10$ кэВ может быть принята за пороговую эффекта глубокого модифицирования ВОПГ при облучении при комнатной температуре. Это подтверждают соответствующие измерения спектров РОР при $E = 10$ кэВ в геометрии каналирования. Аналогом процесса разупорядочения кристаллов на большую глубину, наблюдаемого для других кристаллов, является генерация и движение вглубь кристалла дислокаций за счет радиационно-индуцированных напряжений в облучаемом слое.

При промежуточных температурах облучения 200 – 350 °С образуется глубокий модифицированный слой с максимумом при температуре $T \approx 250^\circ\text{C}$. В отличие от ситуации облучения при температуре, близкой к комнатной, аргон после такого облучения внедряется на глубину, на порядок величины превышающую проективный пробег. Этот эффект не наблюдается для менее упорядоченных углеродных материалов, что показывает приведенное на рис. 3 сравнение глубин внедрения аргона в результате облучения ВОПГ УПВ-1Т, поликристаллического графита МПГ-8 и стеклоуглерода СУ-2500. Отсутствие при этом каналирования при направленной ориентации ВОПГ относительно анализирующего пучка ионов гелия для

облученной зоны говорит о разупорядоченном, поликристаллическом по данным ДБЭО состоянии модифицированного слоя.

Образование глубокого измененного слоя при температуре ВОПГ $T \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$ может быть связано с ионно-индуцированным анизотропным диффузионным массопереносом междуузельных атомов углерода, приводящим к развитию столбчато-игольчатой морфологии с высотой топографических элементов $\sim 10^3$ нм. Измерения глубины внедрения аргона от его энергии показывает наличие энергетического порога этого эффекта глубокого модифицирования с $E_2 \approx 15$ кэВ (рис. 4).

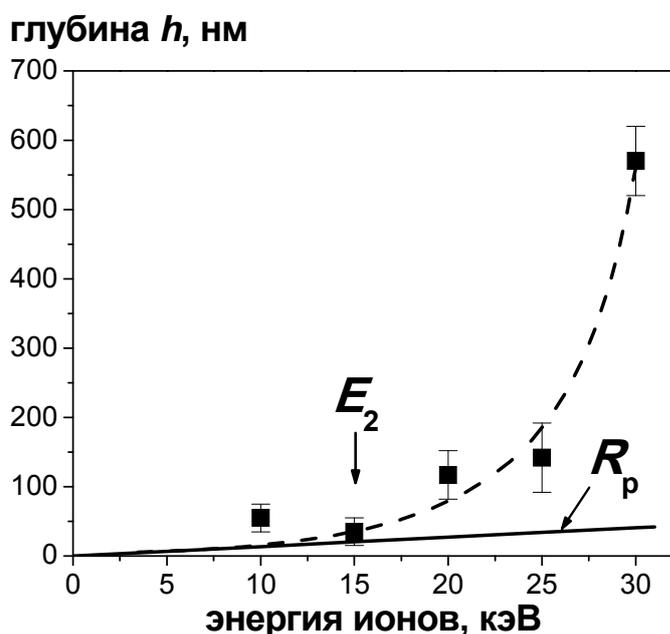
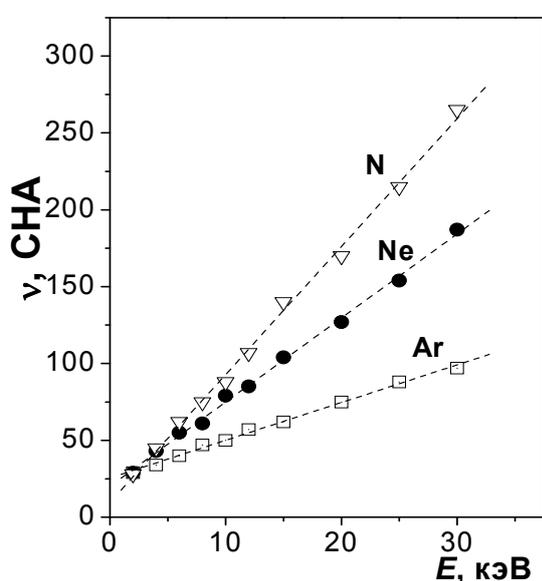


Рис. 4. Энергетическая зависимость глубины внедрения аргона. Температура облучаемого образца ВОПГ УПВ–1Т $T \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$

Таким образом, глубокое модифицирование при температурах, не превышающих температуру ионно-индуцированного текстурного перехода $T_t \approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$, проявляется в разупорядочении кристаллической структуры, а при $T > T_t$ в виде формирования столбчато-игольчатой морфологии. Оба эффекта проявляют пороговый характер по энергии бомбардирующих ионов аргона.

В главе 4 устанавливается связь экспериментально найденных энергетических порогов глубокого модифицирования E_1 и E_2 со стационарным уровнем первичных радиационных нарушений ν , вносимых высокодозовым ионным облучением и определяемых формулой (1). Приводятся результаты аналитических и компьютерных расчетов с использованием моделирования с помощью программы SRIM стационарного профиля $\nu(x)$ в углеродных материалах для различных бомбардирующих ионов – аргона, неона и азота – различных энергий.

Показано, что с увеличением массы иона максимальное сечение дефектообразования $\sigma_{\text{dam,max}}$ растёт, а глубина дефектообразования уменьшается в последовательности N – Ne – Ar. С учетом движения границы поверхности при распылении стационарные уровни повреждений в материале являются спадающими кривыми с максимальным значением смещений v_0 на поверхности. Зависимость v_0 от массы иона становится обратной по сравнению с зависимостью от массы максимальных значений $\sigma_{\text{dam,max}}$. Значения v_0 тем больше, чем больше глубина проникновения ионов. Расчетные энергетические зависимости средних значений $v = v_0/2$ приведены на рис. 5. Видно, что они близки к линейным зависимостям, отражающим близкие к линейным энергетические зависимости проективного пробега ионов в кэВном интервале энергий.



Экспериментальные пороговые уровни эффектов глубокого модифицирования ионами аргона ВОПГ при комнатной температуре и $T \approx 250$ °C составляют соответственно $E_1 = 10$ и $E_2 = 15$ кэВ. Это соответствует, согласно зависимости $v(E)$, пороговым уровням радиационных нарушений $v \sim 50$ и ~ 65 СНА.

Рис. 5. Зависимость среднего стационарного уровня повреждений в графите $v = v_0/2$ от энергии ионов

Глава 5 посвящена исследованию автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) с развитой морфологией поверхности ВОПГ УПВ-1Т в результате облучения ионами аргона при температурах $T \approx 150, 250, 400$ °C при нормальном и наклонном падении ионов. Показано, что поверхность, облученная при температуре $T_t \approx 150$ °C, на которой образуются наноразмерные конусы, практически не изменяет характерную низкую полевую эмиссию базисной плоскости ВОПГ. Найдено, что к появлению низковольтной автоэлектронной эмиссии ВОПГ приводит облучение при повышенных, $T \approx 250$ и 400 °C температурах. Пороговые значения напряженности поля АЭЭ без учета форм-фактора варьируются от 3 до 17 В/мкм в зависимости от температуры и геометрии облучения.

Наименьший порог полевой эмиссии наблюдается после облучения при $T \approx 250$ °С и нормальном падении ионов. Найдено также, что ионное облучения при $T \approx 250$ °С и наклонном падении приводит к низковольтной автоэлектронной эмиссии стеклоуглерода СУ-2000. Спектры комбинационного рассеяния света, полученные для ВОПГ до и после ионного модифицирования, показывают влияние на них температуры и геометрии, при которой производилось облучение, и проявляют особенности, коррелирующие с появлением низковольтной полевой эмиссии.

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

1. Экспериментально исследованы структурные и морфологические изменения поверхностного слоя базисной грани высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т (ВОПГ) при высоких флюенсах 10^{18} - 10^{19} ион/см² облучения ионами аргона с энергиями от 10 до 30 кэВ при температуре мишени из интервала от комнатной до 400 °С. Найдено, что отражающие ионно-индуцированные структурно-морфологические изменения в поверхностном слое ВОПГ температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$, в отличие от соответствующих данных для поликристаллических графитов, могут различаться при измерении в процессе нагрева и охлаждения.

2. Основным различием зависимостей $\gamma(T)$ при нагреве и охлаждении ВОПГ является проявление характерного пика при температуре $T_t \approx 150$ °С ионно-индуцированного текстурного перехода в процессе нагрева и его отсутствие на зависимости $\gamma(T)$ при охлаждении. В условиях облучения при достаточно малых энергиях и больших углах падения зависимости $\gamma(T)$ при нагреве и охлаждении становятся близкими.

3. По данным мониторинга ионно-индуцированных изменений с помощью измерений зависимостей $\gamma(T)$ проведен анализ структуры и морфологии измененного поверхностного слоя после облучения ВОПГ ионами аргона с флюенсом 10^{18} ион/см² при фиксированных температурах мишени в интервале 20 – 400 °С и различных энергиях ионов. Найдено, что определяемая методами спектроскопии РОР глубина измененного слоя может на порядок величины превышать характерный пробег ионов в мишени (10 - 40 нм) в отличие от аналогичных данных для менее упорядоченных углеродных материалов. Эффекты глубокого модифицирования обнаружены в узкой области

температур при $T \approx 250$ °С и при температурах, близких к комнатной ($T < T_t$). Оба эффекта проявляют пороговый характер по энергии ионов.

4. Эффект глубокого модифицирования после облучения при комнатной температуре проявляется в спектрах РОР, измеренных при направленной ориентации кристалла, в виде дефектного слоя толщиной, многократно превышающей пробег ионов. Аналогом такого процесса, наблюдаемого для других кристаллов, является генерация и движение вглубь кристалла дислокаций за счет радиационно-индуцированных напряжений в облучаемом слое.

5. Эффект глубокого модифицирования после облучения при $T \approx 250$ °С проявляется в виде развитой морфологии поверхности со столбчато-игольчатыми элементами высотой, соответствующей глубине внедренного аргона $\sim 10^3$ нм, и может быть связан с анизотропным диффузионным массопереносом междоузельных атомов углерода.

6. Для оценки уровня первичных радиационных нарушений ν в числе смещений на атом (СНА), приводящих к эффектам глубокого модифицирования ВОПГ, проведены расчеты энергетической зависимости ν с учетом движения поверхности из-за распыления. Расчеты с использованием данных моделирования дефектообразования по программе SRIM показали, что пороговые уровни радиационных нарушений ν составляют 50 и 65 СНА соответственно для эффектов глубокого модифицирования ВОПГ при комнатной температуре и $T \approx 250$ °С.

7. Исследовано влияние облучения ионами аргона энергии 30 кэВ на полевою эмиссию ВОПГ. Найдено, что к появлению низковольтной автоэлектронной эмиссии приводит ионное облучение при повышенных ($T \approx 250$ и 400 °С) температурах мишени. Спектры комбинационного рассеяния света показывают влияние на них температуры и геометрии, при которой производилось облучение, и проявляют особенности, коррелирующие с появлением низковольтной полевой эмиссии. Рельеф, развивающийся при нормальном падении ионов на мишень в виде колоний наноразмерных конусов при температуре текстурного перехода $T_t \approx 150$ °С, практически не изменяет характерную низкую полевою эмиссию базисной грани ВОПГ.

8. Для расширения возможностей метода гониофотометрии отраженного света разработан планшетный стенд лазерной гониофотометрии с возможностью регистрации пространственных

распределений отраженного света и, соответственно, получения двумерных параметров микрогеометрии поверхности.

Список цитируемой литературы

1. Распыление под действием бомбардировки частицами. Вып.3. Характеристики распыленных частиц, применения в технике. / Под ред. Р. Бериша и К. Виттмака. - М.: Мир, 1998. 551 с.
2. Sputtering by Particle Bombardment. Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies / Eds. R. Behrisch, W. Eckstein - Topics Appl. Physics, V. 110, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 470 p.
3. Новиков Л.С., Милеев В.Н., Воронина Е.Н., Галанина Л.И., Маклецов А.А., Синолин В.В. Радиационные воздействия на материалы космической техники // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 3. С. 1-48.
4. Behrisch R. Plasma facing materials for fusion devices // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 7. С. 5-18.
5. Burchell, T.D. Radiation Effects in Graphite and Carbon-Based Materials // MRS Bulletin. 1997. V. 22 (4). P. 29-35.
6. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С. Модификация структуры и эмиссионные свойства углеродных материалов при высокодозном ионном облучении // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 1. С.58-74.
7. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.C., Parilis E.C., Virgiliev Yu.S. Ion-induced electron emission monitoring the structure and morphology evolution in HOPG // Nucl.Instrum.Methods in Phys.Res. 2009. V. 267. P. 2761-2764.

Основные публикации по теме диссертации

1. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Немов А.С. Исследование шероховатой поверхности методами лазерной гониофотометрии, зондовой и электронной микроскопии // Приборы. 2008. №4 (94). С.11-14.
2. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М. Исследование ионно-индуцированной морфологии квазикристалла графита методами лазерной гониофотометрии, зондовой, оптической и электронной микроскопии // Пятнадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика»: Тез. докл. В 3-х т.- М.: Издательский дом МЭИ, 2009. Т. 3. С. 120-121.

3. Авилкина В.С. (Севостьянова), Борисов А.М. Исследование влияния ионно-индуцированного рельефа на автоэлектронную эмиссию поверхности высокоориентированного пирографита // 16 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. Т. 3. С. 30-31.

4. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Борисов В.В., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Тимофеев М.А. Ионно-индуцированная морфология и автоэлектронная эмиссия поверхности высокоориентированного пирографита // Прикладная физика. 2010. № 3. С.42-46.

5. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Куликаускас В.С., Машкова Е.С., Питиримова Е.А. Температурные эффекты в ионно-электронной эмиссии квазикристалла графита // Поверхность. 2011. №3. С.18-22.

6. Авилкина В.С. (Севостьянова), Борисов А.М., Владимиров Б.В., Петухов В.П., Черных П.Н. Измерение элементного состава углеродных и композиционных керамических материалов методами ИПРИ и РОР // Физика и химия обработки материалов. 2011. №1. С.51-54.

7. Петухов В.П., Борисов А.М., Авилкина В.С. (Севостьянова), Виргильев Ю.С., Черных П.Н. Линии Косселя в угловом распределении рентгеновского излучения, возбуждаемыми протонами в квазикристалле графита // Поверхность. 2011. №4. С.19-22.

8. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Куликаускас В.С., Машкова Е.С., Питиримова Е.А. Температурные эффекты при высоких флюенсах ионного облучения квазикристалла графита // Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2011) Материалы 20 Межд. конф. 25-29 августа 2011г. М.: МАИ, 2011. Т. 1. С.284-287.

9. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Борисов В.В., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Тимофеев М.А., Виргильев Ю.С. Влияние ионной бомбардировки на автоэлектронную эмиссию поверхности квазикристалла графита // Труды 10-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции. 29-30 ноября 2011г. «МАТИ» - РГТУ имени К.Э. Циолковского: Сб. трудов М.: МАТИ, 2011. С.224-228.

10. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С. Методы и результаты расчетов уровня первичных радиационных нарушений (числа смещений на атом) с учетом

распыления поверхности // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. №5. С.586-588.

11. Andrianova N.N., Avilkina V.S. (Sevostyanova), Borisov A.M., Mashkova E.S. Temperature effects in high fluence ion modification of HOPG // Nucl. Instrum.Methods in Phys.Res. B. 2012. V.273. P.58-60.

12. Andrianova N.N., Avilkina V.S. (Sevostyanova), Borisov A.M., Mashkova E.S., Parilis E.S. The study of graphite disordering using the temperature dependence of ion-induced electron emission // Vacuum. 2012. V.86. P.1630-1633.

13. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Черных П.Н. Исследование методом РОР измененного слоя высокоориентированного пиролитического графита при облучении ионами аргона // Материалы XV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 2-3 февраля 2012 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2012г. С.35-38.

14. Авилкина В.С. (Севостьянова), Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Даньков А.В. Влияние ионной бомбардировки на автоэлектронную эмиссию поверхности квазикристалла графита //18 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 4-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2012. Т. 4. С.28-39.

15. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Даньков А.В., Севостьянова В.С. Влияние ионной бомбардировки на автоэлектронную эмиссию стеклоуглерода и квазимонокристалла графита // «XXXVIII Гагаринские чтения». Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 10-14 апреля 2012 г. - М.: МАТИ, 2012. Т. 3. С.86-87.

16. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Борисов В.В., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Севостьянова В.С., Тимофеев М.А. Влияние ионной бомбардировки на автоэлектронную эмиссию углеродных материалов // Тезисы докладов XLII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М.И. Панасюка. - М.: Университетская книга, 2012. С.118.

Подписано в печать 03.09.12. Формат 60×84 ¹/₁₆
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 1,5. Уч. изд. л. 1,2.

Тираж 100 экз.

ИТЦ МАТИ

109240, Москва, Берниковская наб., 14