

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

На правах рукописи

Андрианова Наталья Николаевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ
ФЛЮЕНСАХ ОБЛУЧЕНИЯ ПУЧКАМИ АТОМАРНЫХ И
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ**

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 – 2008 г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "МАТИ" - Российском государственном технологическом университете имени К.Э. Циолковского.

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

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

кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
Трифонов Николай Николаевич

Ведущая организация: Российский научный центр
«Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится « 1 » октября 2008 г. в 15 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 27 » августа 2008 г.

Ученый секретарь Совета по
защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 501.001.45
к. ф.-м. н.

О.М. Вохник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Явления, происходящие при взаимодействии частиц плазмы с поверхностью материалов, были и остаются предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований [1]. Быстрые частицы, бомбардирующие ионы и смещенные атомы твердого тела, испытывая торможение в упругих и неупругих взаимодействиях, приводят к целому ряду радиационно-индуцированных явлений, среди которых генерация радиационных дефектов, эмиссия атомов, электронов и фотонов, радиационно-стимулированная диффузия, возникновение механических напряжений. При передаче энергии в упругих соударениях атомы, получившие достаточно энергии для преодоления сил связи, могут выйти в вакуум и стать распыленными, обуславливая эрозию поверхности со специфической морфологией. В результате модифицирования структуры и морфологии поверхностного слоя материала изменяются его электрофизические, физико-механические, физико-химические и магнитные свойства [2,3]. Из современных тенденций исследований, обусловленных развитием ионно-плазменных технологий модифицирования поверхностного слоя материалов и синтеза новых материалов, необходимостью решения проблем радиационной стойкости материалов, применяемых в космических аппаратах и термоядерных установках, широким применением ионных пучков для анализа поверхностного слоя материалов, можно выделить следующие.

Все большее внимание уделяется вопросам взаимосвязи эмиссионных процессов, изменения структуры и морфологии поверхностного слоя материалов. В частности, в связи с исследованиями волнообразного наноразмерного ионно-индуцированного рельефа анализируют зависимость его параметров от температуры мишени, плотности потока и флюенса ионного облучения [4]. Для относительно небольших флюенсов облучения соответствующие диаграммы получены и теоретически обоснованы. Недостаточно изученной остается область больших флюенсов, где состояние поверхностного слоя часто проявляет себя как динамически равновесное. Исследования ионно-индуцированных процессов для углеродных материалов при высоких флюенсах ионного облучения свидетельствуют о необходимости продолжения таких исследований с расширением сортамента ионов, систематическими исследованиями влияния специфической слоистой структуры и анизотропии этих материалов, применением перспективных в космической технике и термоядерных устройствах композиционных углерод-углеродных материалов [5]. В связи с расширением практического применения потоков атомных кластеров актуальными являются также исследования эмиссионных процессов под воздействием молекулярных ионов.

Изучению процессов распыления и эмиссии электронов, изменения структуры и морфологии поверхностного слоя, влияния анизотропии свойств на ионно-индуцированные процессы в материалах с полупровод-

никовыми и металлическими свойствами при высоких флюенсах облучения атомарными и молекулярными ионами энергии порядка десятков кэВ посвящена данная диссертационная работа.

Цели и основные задачи работы

Целью работы является установление закономерностей процессов распыления и эмиссии электронов, изменения структуры и морфологии поверхностного слоя при высоких флюенсах облучения атомарными и молекулярными ионами материалов с существенно различной степенью анизотропии физических свойств.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Разработка экспериментального стенда гониофотометрии отраженного света, исследование и учет ионно-индуцированной морфологии поверхности в расчетах коэффициентов распыления и ионно-электронной эмиссии металлов и углеродных материалов.

2. Разработка аналитического и компьютерного методов оценки уровня первичных радиационных нарушений в твердом теле с учетом движения границы поверхности при распылении.

3. Исследование закономерностей изменения структуры и морфологии поверхностного слоя материалов с изотропными и анизотропными свойствами при варьировании геометрии облучения, сорта и плотности потока ионов, температуры мишени.

4. Разработка модели, объединяющей механизмы молекулярного эффекта и анизотропии ионно-электронной эмиссии для кристаллов.

Научная новизна работы

В работе впервые получены следующие результаты.

1. С помощью лазерной гониофотометрии проведены исследования морфологии поверхности изотропных и анизотропных материалов, развивающейся при физическом распылении ионами аргона. Характер и параметры распределений локальных углов наклона микрограней ионно-индуцированного рельефа поликристаллической меди и высокоориентированного пирографита найдены существенно различными. Если для поликристаллической меди положения максимумов распределений локальных углов близки к предсказываемым макроскопической теорией эрозии, то для высокоориентированного пирографита необходимо учитывать его специфическую текстуру и анизотропную самодиффузию, т.е. определяющие волнообразный рельеф факторы.

2. Экспериментально измерены коэффициенты распыления стеклоуглеродного материала (СУ-2500) и высокоориентированного пирографита (УПВ-1Т) при облучении ионами Ar^+ энергии 30 кэВ при различных углах падения ионов и температуре мишеней. Найдено, что влияние ионно-индуцированной морфологии на угловые зависимости коэффициента распыления стеклоуглерода и поликристаллического графита является приблизительно одинаковым в отличие от высокоориентированного пирографита, слоистая структура которого обуславливает формирование

двумерного волнообразного рельефа, который, в свою очередь, может приводить к подавлению распыления по сравнению с поликристаллическими и стеклообразными углеродными материалами.

3. Разработаны аналитический и компьютерный методы оценки уровня первичных радиационных нарушений (dpa) в твердом теле с учетом движения границы поверхности при распылении. Показано, что стационарный уровень dpa определяется углом падения бомбардирующих частиц, отношением характерных глубин проникновения иона и выхода распыленных атомов, энергии связи поверхностных атомов и пороговой энергии дефектообразования и практически не зависит от сечения упругого торможения иона. Показано также, что уровень dpa является важным при анализе процессов динамического отжига радиационных нарушений в углеродных материалах.

4. Для неграфитирующихся материалов температурные зависимости коэффициента кинетической ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ отражают эффекты плотности ионного тока. Найдено, что с увеличением плотности тока отжиг радиационных нарушений при облучении стеклоуглеродов происходит при все меньших температурах T_a , определяемых по скачку зависимости $\gamma(T)$. Для низкотемпературных стеклоуглеродов скачкообразная зависимость $\gamma(T)$ трансформируется в монотонную, и разупорядочение поверхностного слоя с понижением температуры не наблюдается.

5. Исследованы ионно-индуцированные структурно-морфологические изменения в поверхностном слое однонаправленного углерод-углеродного композиционного материала с использованием температурных зависимостей коэффициента $\gamma(T)$. Найдено, что облучение при высоких флюенсах приводит к потере анизотропии структуры поверхностного слоя композита: аморфизации при комнатной температуре, либо изотропной рекристаллизации при температуре выше высокотемпературного скачка на кривой $\gamma(T)$.

6. Для анализа молекулярного эффекта в ионно-электронной эмиссии для монокристаллов разработана модель, объединяющая предложенный Е.С. Парилисом механизм выметания электронов и механизмы анизотропии ионно-электронной эмиссии из кристаллов – каналирования иона и затенения атомов при углах соответственно меньших и больших критического угла Линдхарда ψ_L , хорошо описывающая экспериментальную угловую зависимость показателя молекулярного эффекта R_2 для ионов N_2^+ . Показано, что максимум зависимости $R_2(\theta)$ наступает раньше максимума кривых $\gamma_2(\theta)$ и $\gamma_1(\theta)$. Это означает, что при выходе из тени при $\theta > \psi_L$ в области частичного затенения нижележащих атомов процесс выметания электронов подавляется.

Научная и практическая ценность работы

Гониофотометрическая методика и результаты исследования ионно-индуцированной морфологии поверхности могут найти применение как для оценки коэффициента распыления по данным микрогеометрии и компьютерному моделированию распыления гладкой поверхности, так и

для развития представлений об эволюции морфологии поверхности при высоких флюенсах ионного облучения.

Выявленные закономерности распыления, изменения структуры и морфологии поверхностного слоя углеродных и углерод-углеродных композиционных материалов важны для решения проблем радиационной стойкости материалов в условиях высокодозного облучения и переменных температур в термоядерных исследованиях, при решении проблем деградации покрытий и элементов космических летательных аппаратов.

Установленные корреляции изменения выхода электронов со структурно-морфологическими изменениями в материалах, вызываемыми ионным облучением, расширяют возможности экспериментальных ионно-пучковых методов исследования радиационных нарушений в этих материалах, мониторинга состояния облучаемой поверхности.

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. Разработка и создание экспериментального стенда гониофотометрии отраженного лазерного излучения, методика и результаты экспериментального исследования микрогеометрии поверхности и её учета при оценках коэффициентов распыления и ионно-электронной эмиссии с использованием компьютерного моделирования и теоретических расчетов эмиссионных процессов для гладкой поверхности. Выводы о том, что характер и параметры распределений локальных углов наклона микрограней ионно-индуцированного рельефа для поликристаллической меди и высокоориентированного пирографита УПВ-1Т существенно различны и содержат максимумы, положения которых при распылении Си близки к предсказываемым макроскопической теорией эрозии, а для УПВ-1Т необходимо учитывать его специфическую текстуру и анизотропную самодиффузию.

2. Методики аналитического и компьютерного моделирования уровня первичных радиационных повреждений применительно к задачам облучения высокими флюенсами ионов и выводы о том, что с учетом распыления уровень повреждений определяется углом падения бомбардирующих частиц, отношением характерных глубин проникновения ионов и выхода распыленных атомов, энергии связи поверхностных атомов и пороговой энергии дефектообразования и практически не зависит от сечения упругого торможения ионов.

3. Результаты экспериментальных измерений коэффициентов распыления высокотемпературного стеклоуглерода и высокоориентированного пирографита при облучении ионами Ag^+ энергии 30 кэВ при различных уг-

лах падения ионов и температуре мишеней, и выводы о том, что влияние ионно-индуцированной морфологии на угловые зависимости коэффициента распыления стеклоуглерода и поликристаллического графита является приблизительно одинаковым, в отличие от высокоориентированного пирографита, слоистая структура которого обуславливает формирование двумерного волнообразного рельефа, приводящего к подавлению распыления.

4. Экспериментальные исследования зависимостей ионно-электронной эмиссии стеклоуглеродов от температуры и плотности ионного тока, и выводы о том, что влияние плотности ионного тока обусловлено локальным повышением температуры при облучении материалов с низкой теплопроводностью.

5. Экспериментальные результаты исследования морфологии, элементного состава и структуры поверхностного слоя, формирующегося при падении под углом 60° ионов N_2^+ энергии 30 кэВ на базисную плоскость высокоориентированного пирографита УПВ-1Т при температурах ниже и выше температуры ионно-индуцированного структурного перехода T_a , и выводы о том, что формирование наклонных столбчато-игольчатых морфологических элементов, вызывающих ранее обнаруженный эффект трехкратного подавления распыления при $T > T_a$, обусловлено ионно-индуцированной трансформацией текстуры поверхностного слоя.

6. Экспериментальные результаты исследования ионно-индуцированных процессов, морфологии, элементного состава и структуры измененного поверхностного слоя однонаправленного углерод-углеродного композита КУП-ВМ при высоких флюенсах облучения ионами N_2^+ энергии 30 кэВ, и выводы о том, что высокодозное ионное облучение приводит к потере анизотропии структуры поверхностного слоя композита: аморфизации при комнатной температуре, либо изотропной рекристаллизации при $T > T_a$, с сохранением однонаправленной волокнистой морфологии поверхностного слоя.

7. Теоретическая модель для анализа молекулярного эффекта в ионно-электронной эмиссии для монокристаллов, объединяющая механизмы неаддитивности выхода электронов и анизотропии ионно-электронной эмиссии из кристаллов, и выводы о том, что сильная угловая зависимость показателя молекулярного эффекта может быть хорошо описана в рамках предложенной модели, что процесс выметания электронов может подавляться из-за затенения атомов, и это подтверждается экспериментальными данными по молекулярному эффекту в ионно-электронной эмиссии монокристалла Ge(111) и стеклоуглерода.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях, совещаниях и семинарах: XXXIV - XXXVIII Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2004 - 2008), XVII и XVIII Международных конференциях "Взаимодействие ионов с по-

верхностью" (Москва, 2005, 2007), VII Всероссийском семинаре "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Н. Новгород, 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), 2–6 Всероссийских научно-технических конференциях «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, МАТИ, 2004 – 2007), 7 Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (Москва, 2005), XXVIII – XXXIV Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2002-2008), 10-14 Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2004-2008), II Межд. научно-технической конференции «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей» (Кострома, 2007), научных семинарах отдела ОФАЯ НИИЯФ МГУ.

Выполнение работы проводилось при частичной финансовой поддержке Программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса 2007 г.».

Личный вклад заключается в самостоятельной разработке стенда и методики лазерной гониофотометрии, алгоритма оценки уровня первичных радиационных нарушений, личном участии автора в планировании и проведении большинства изложенных в работе экспериментов и теоретических расчетов, интерпретации включенных в диссертацию результатов и формулировке выводов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 11 в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 182 наименования. Объем диссертации составляет 175 страниц машинописного текста, включая 77 рисунков и 3 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. Анализируются экспериментальные и теоретические результаты исследований эволюции морфологии и структуры поверхности при ионном облучении, особенности эмиссионных процессов при облучении кластерными ионами, возможности применения ионных пучков для наноструктурирования поверхности. Отмечается, что морфология поверхности, развивающаяся при ионно-лучевом воздействии, может оказывать значительное влияние на характеристики физического распыления и ионно-электронной эмиссии.

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 Ag^+ и N_2^+ с сечением 0.3 см^2 и плотностью тока при энергии 30 кэВ до 0.5 мА/см^2 . Откачка высоковакуумной камеры ионного облучения производится с помощью безмасляной турбомолекулярной системы фирмы Leibold. Держатель мишени позволяет варьировать угол падения ионов и температуру образцов. Для охлаждения использовали проточную воду или жидкий азот, для нагрева – плоский танталовый нагреватель. При мониторинговании процесса облучения периодически с интервалом 1 – 3 мин. (по флюенсу $\varphi t \sim 10^{16} - 10^{17} \text{ ион/см}^2$) фиксировали ионный ток на мишень I_i , ток коллектора вторичных электронов I_e , температуру мишени и давление в камере. По этим данным определяли флюенс облучения и анализировали зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma = I_e/I_i$ от флюенса и температуры мишени. Приборная погрешность измерения $\gamma < 3\%$. Длительность непрерывного облучения варьировали от десятков минут до нескольких часов (по флюенсу $10^{18} - 10^{19} \text{ ион/см}^2$). Коэффициент распыления Y определяли по потере веса мишени и флюенсу облучения. Использовали весы HR-202i с младшим разрядом дискретной шкалы 0.01 мг.

В **разделе 2.2** описываются оборудование и методы исследования морфологии и структуры поверхностного слоя. Морфологию поверхности до и после облучения исследовали на оптическом микроскопе Axiostar plus, растровом электронном микроскопе LEO 1430-вр и зондовом микроскопе Femtoscan. Для количественного анализа микрогеометрии использовали метод гониофотометрии отраженного света шероховатой поверхностью, реализованный на созданном в ходе работы экспериментальном стенде лазерной гониофотометрии (ЛГФ) с использованием газового гелий-неонового или полупроводникового лазера. Метод ЛГФ применяли для получения распределений локальных углов наклона микрограней шероховатой поверхности и апробировали по данным профилометрирования стальных образцов шероховатости. Кристаллическую структуру

образцов исследовали с помощью рентгеновского и электронографического анализа. Рентгеновский анализ проводили на дифрактометре ДРОН-4 с фокусировкой по Бреггу-Брентано в CuK_α -излучении. Рентгеновский анализ отражает объемную структуру образцов. Исследования методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), позволяющим получать информацию от 1-2 монослоев поверхности, проводили на электронографе ЭМР-102 при ускоряющем напряжении 50 кВ и токе пучка 50 мкА. Элементный анализ методом спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (РОР) проводили на электростатическом ускорителе НИИЯФ МГУ.

Раздел 2.3 посвящен аналитическим и компьютерным методам исследования. Компьютерное моделирование взаимодействия ионов с материалами проводили с помощью программы SRIM. Моделирование распыления меди также проводилось В.И.Шульгой (программа OKSANA [6]), для графита использовали данные моделирования В.Экштайна (TRIM.SP) [7]. Погрешность коэффициента распыления оценивали по результатам не менее 5 процедур моделирования с различным набором псевдослучайных чисел. Дозовой характеристикой радиационного воздействия на материалы является уровень первичных радиационных повреждений, количественная мера которого – среднее число смещенных атомов на атом материала dpa . Для определения уровня dpa в поверхностном слое твердых тел при высоких флюенсах ионного облучения в диссертации разработаны методы аналитической оценки и компьютерного моделирования. 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 . Для кэвных энергий ионов, когда хорошим приближением является обратноквадратичный потенциал межатомного взаимодействия, величина S_n от энергии иона E практически не зависит и величину σ_{dam} можно полагать одинаковой на всей глубине дефектообразования R_d . Если коэффициент распыления Y оценивать по формуле Зигмунда [8], то уровень радиационных повреждений

$$dpa_{\text{стац}} = \frac{R_d}{\Delta x} \cdot \frac{5.26}{\alpha(M_2/M_1)} \cdot \frac{E_c}{E_d} \cos^f \theta \cdot \left(1 - \frac{x}{x_d}\right),$$

где $x < x_d = R_d \cdot \cos \theta$, показатель степени $f \geq 1$, α – коэффициент, зависящий от отношения масс атома мишени и падающего иона (M_2/M_1), E_c – энергия связи поверхностных атомов, Δx – характеристическая глубина выхода распыленных атомов. Видно, что $dpa_{\text{стац}}$ не зависит от удельных упругих потерь энергии ионами. Это не удивительно, так как сечение S_n одновременно обуславливает процессы распыления и дефектообразования. Величина $dpa_{\text{стац}}$ определяется, в основном, отношением характерных глубин $R_d/\Delta x$ и энергий E_c/E_d и наиболее сильно зависит от угла падения ионов θ . Уровень радиационных повреждений оценивали также с использованием данных моделирования программы SRIM. Движения границы поверхности в результате распыления программа не учитывает, ее учет проводили путем численного интегрирования профилей интен-

сивности радиационного воздействия $\sigma_{\text{dam}} \cdot n_0$, смещенных относительно друг друга на достаточно малый шаг по глубине $\delta = Y \cdot (\varphi \cdot t)_{\delta} / n_0$. Апробация методик аналитического и компьютерного расчета уровня dpa проведена для литературных данных по высокодозному облучению ионами Ar^+ энергии 400 эВ Al(110). Профили dpa , рассчитанные обоими методами, близки друг к другу и оказались подобными экспериментальному профилю вакансий.

Глава 3 посвящена исследованиям ионно-индуцированных изменений структуры и морфологии поверхностного слоя материалов и их влиянию на эмиссионные процессы. Наибольшее внимание уделено стеклоуглеродам – неграфитируемым изотропным углеродным материалам, рассматриваемым как перспективные для использования в радиационных полях различной природы в атомных реакторах, термоядерных и других ионно-плазменных устройствах. Использовали образцы стеклоуглерода промышленных марок СУ-850, СУ-1300, СУ-2000 и СУ-2500 (производство НИИГрафит, Москва), отличающиеся соответствующей конечной температурой термообработки $T_{\text{об}}$. Исследовали также поликристаллическую медь М00 и близкие к изотропным мелкозернистые графиты МПГ-8 (НИИГрафит) и РОСО-АХФ-5Q (производство США). Подготовка к эксперименту образцов (**раздел 3.1**) кроме механической обработки включала: для меди - химическое травление, для углеродных материалов – ультразвуковую обработку и отжиг в вакууме.

Результаты **раздела 3.2** демонстрируют возможности разработанного в диссертации метода лазерной гониофотометрии для количественного анализа ионно-индуцированной микрогеометрии поверхности на примере исследования топографии поликристаллической меди при высоких флюенсах облучения ионами Ar^+ энергии 30 кэВ. Установлено, в частности, что распределения локальных углов наклона микрограней ионно-индуцированного рельефа содержат максимумы, положения которых зависят от номинального угла падения ионов на мишень и отражают геометрию гребневидных топографических элементов, рис.1. Положения максимумов найдены близкими к предсказываемым теорией эрозии (локальные углы падения $\theta = 0, 90^\circ$ и положение максимума зависимости $Y(\theta) \theta = 78^\circ$) для динамически равновесных условий высокодозного физического распыления [8].

Раздел 3.3 посвящен стеклоуглеродам. Физические свойства неграфитируемого стеклоуглерода значительно отличаются от свойств графитов, и это может проявляться в ионно-индуцированных процессах. Исследование потери веса $\Delta m/m$ в вакууме за счет обезгаживания при вакуумировании, вакуумном отжиге при различных температурах и ионном облучении показало, что потеря $\Delta m/m$ высокотемпературных стеклоуглеродов (СУ-2000, 2500) соответствует $\Delta m/m$ графитируемых материалов и на несколько порядков величины увеличивается с уменьшением $T_{\text{об}}$ стеклоуглерода. Для наиболее близкого к графитам по потере веса в вакууме

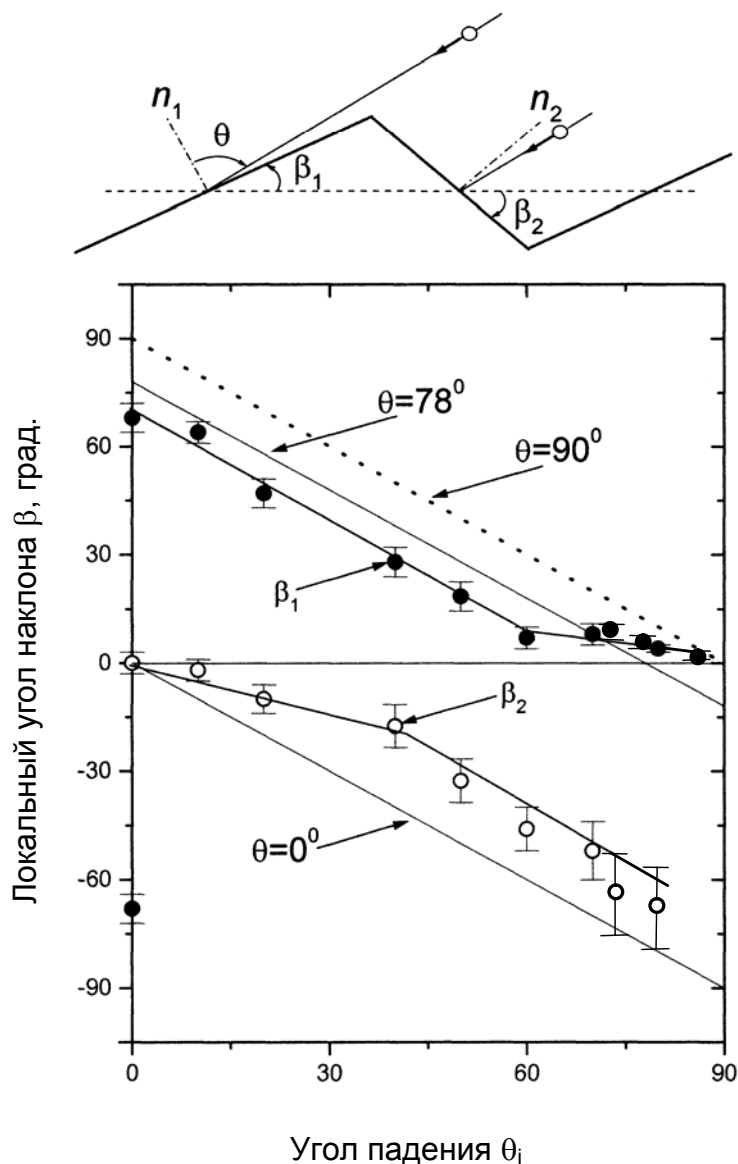


Рис.1. Схема гребневидного рельефа и зависимости положений максимумов β_1 и β_2 распределений $f(\beta)$ от угла падения θ_i на мишень бомбардирующих ионов

стеклоуглерода СУ-2500 измерена угловая зависимость коэффициента распыления $Y(\theta)$ в сопоставимых с [9] условиях распыления графита МПГ-ЛТ. Сравнение показало, что зависимости $Y(\theta)$ для СУ-2500 и МПГ-ЛТ являются близкими, рис.2. При больших углах падения ионов $Y(\theta)$ проявляет максимум, положение которого соответствует рассчитанному с помощью моделирования столкновительного распыления. Ионное облучение стеклоуглеродов может приводить как к полному разупорядочению его структуры, так и к некоторому упорядочению в зависимости от температуры мишени [5]. Для установления закономерностей этих процессов измерены и проанализированы температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ для стеклоуглеродов с различной $T_{об}$ при варьировании параметров ионного облучения (сорта, энергии и

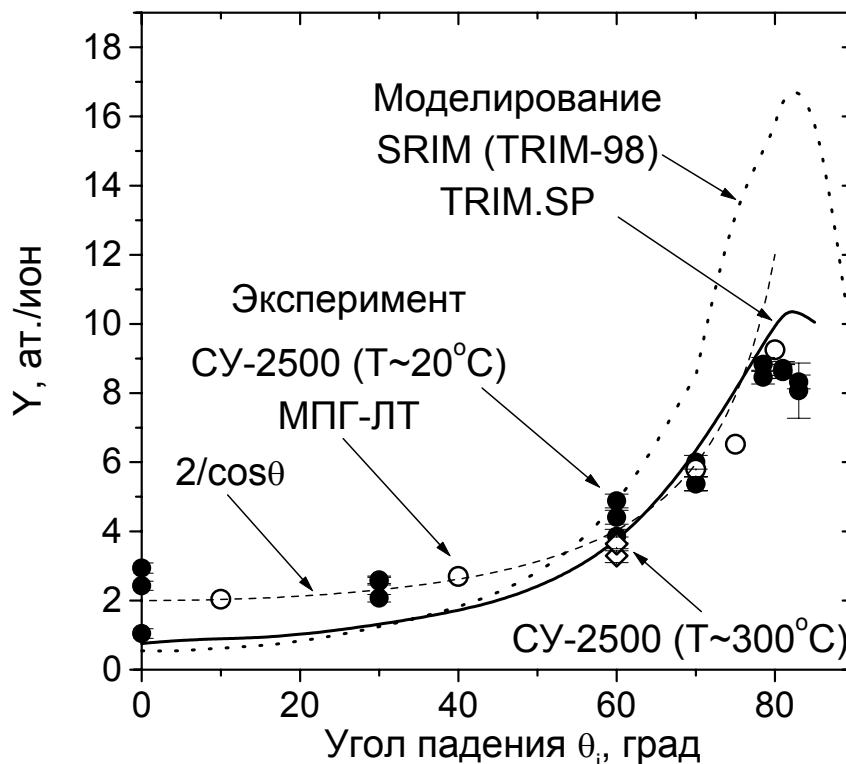


Рис.2. Экспериментальные и расчетные угловые зависимости коэффициента распыления γ углеродных материалов ионами Ar^+ энергии 30 кэВ

плотности j тока ионов N^+ , N_2^+ , Ar^+). При плотности $j \approx 0.3 \text{ мА/см}^2$ для высокотемпературных стеклоглеродов наблюдается ступенчатый рост выхода электронов при некоторой температуре динамического отжига радиационных нарушений T_a , аналогично наблюдаемому для графитов. Для низкотемпературных стеклоглеродов γ монотонно растет с ростом температуры, рис.3а. Температура термообработки, разделяющая два типа температурных зависимостей $\gamma(T)$ – монотонную и ступенчатую при облучении ионами Ar^+ выше, чем при облучении ионами N_2^+ при прочих равных условиях. Картины дифракции быстрых отраженных электронов от поверхности высокотемпературных стеклоглеродов, облученных при $T < T_a$, показывают наличие диффузного гало, свидетельствующего об аморфизации поверхности, а для низкотемпературных близки к картинам дифракции для исходных образцов. После облучения при $T > T_a$ наблюдается система трех дифракционных колец, характерных для поликристаллических графитов. Путем исследования влияния плотности ионного тока на зависимости $\gamma(T)$ установлена основная причина различия ионноиндуцированных процессов в низко- и высокотемпературных стеклоглеродах. Найдено, что с увеличением плотности j ионов (N^+ энергии 15 и 30 кэВ, N_2^+ энергии 30 кэВ) отжиг радиационных нарушений в процессе облучения стеклоглеродов происходит при все меньших температурах T_a , рис.3б. Для низкотемпературных стеклоглеродов скачкообразная зависимость трансформируется в монотонную и разупорядочение поверхностного слоя в исследованном интервале температур не наблюдается.

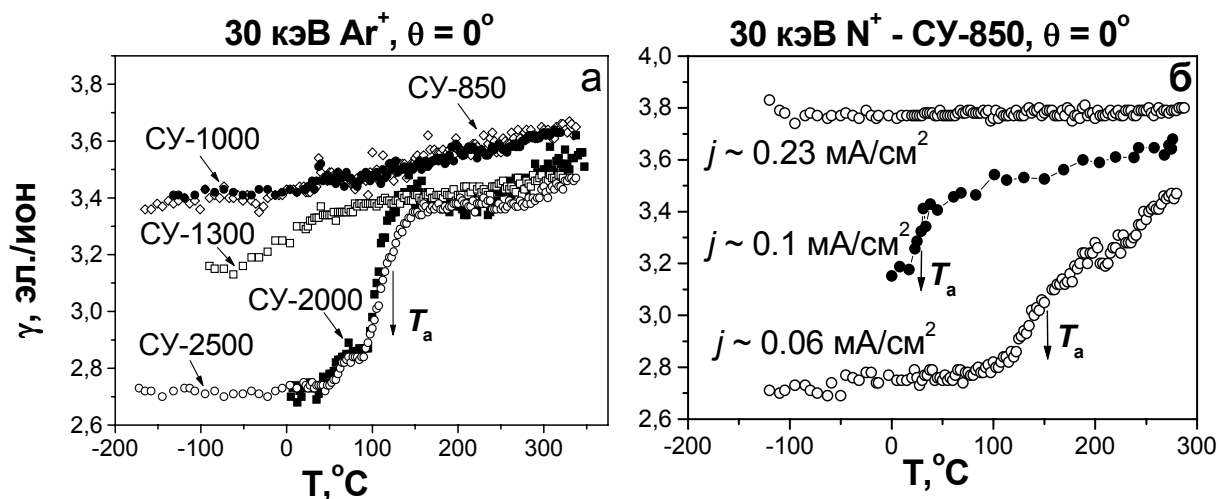


Рис.3. Температурные зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии

Найдено также, что для графитов (МПГ-8, УПВ-1Т) температура T_a в исследованном диапазоне плотности тока от j практически не зависит. Учет того, что теплопроводность стеклоглеродов на порядок величины меньше, чем графитов, и в несколько раз уменьшается с уменьшением $T_{об}$, позволяет предположить, что влияние плотности ионного тока связано с локальным повышением температуры при облучении материалов с низкой теплопроводностью. Для выяснения причин более эффективного разупорядочения стеклоглерода ионами N_2^+ энергии 30 кэВ по сравнению с ионами Ar^+ той же энергии выполнены оценки уровня первичных радиационных повреждений dpa с учетом движения поверхности из-за распыления. Интенсивность радиационного воздействия ионов Ar^+ в три раза больше, чем ионов N_2^+ , но за счет более интенсивного распыления ионами Ar^+ на всей глубине дефектообразования соотношение стационарных уровней $dpa_N > dpa_{Ar}$. Это может быть одной из причин более эффективного разупорядочения стеклоглерода ионами азота по сравнению с ионами аргона. Другой причиной может быть образование в поверхностном слое химических CN_x соединений [5].

В большинстве компьютерных программ моделирование взаимодействия ионов проводится с гладкой на атомном уровне поверхностью, что является одной из причин количественных расхождений результатов эксперимента и моделирования, рис. 2. В разделе 3.4 показано, что учет микротопографии поверхности с помощью разработанного в диссертации метода ЛГФ приводит к хорошему согласию результатов моделирования с экспериментальными данными распыления меди, графита и стеклоглерода. Найдено также, что ионно-индуцированная топография отражается на зависимости $Y(\theta)$ в большей степени, чем на зависимости $\gamma(\theta)$, что обусловлено более сильной, чем $1/\cos\theta$, угловой зависимостью $Y(\theta)$. Показано, в частности, что учёт изменения морфологии графита, облученного при различных температурах, оказывает в исследованных случаях незначительное влияние на величину γ и для описания скачкообразной зависимости $\gamma(T)$ графита этого недостаточно. Основной причиной

трансформации зависимостей $\gamma(T)$ для углеродных материалов является изменение длины свободного пробега вторичных электронов λ при ионно-индуцированных структурных изменениях в поверхностном слое материала [5].

Глава 4 посвящена исследованиям влияния на ионно-индуцированные процессы анизотропии физических свойств материалов. Из углеродных материалов наибольшей анизотропией физических свойств, присущей природным монокристаллам графита, обладает высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ). Сравнение распыления ВОПГ и поликристаллических графитов показывает, что при наклонном падении ионов и повышенной температуре мишени ($T > T_a$) для ВОПГ наблюдается топографическое подавление распыления, наибольшее (трехкратное) при $\theta = 60^\circ$ [5]. Полученные в диссертации результаты изучения структурно-морфологических изменений при ионном облучении ВОПГ приводятся в **разделе 4.1**. В экспериментах использовали образцы ВОПГ марки УПВ-1Т (НИИграфит). Установлено, что при комнатной температуре облучения ($T < T_a$) ионами N_2^+ энергии 30 кэВ в геометрии наибольшего подавления распыления ионно-индуцированный рельеф на поверхности УПВ-1Т является квазипериодическим, характерным для высоких флюенсов ионного облучения аморфных материалов и контролируется столкновительным распылением. При $T = 400^\circ\text{C}$ ($T > T_a$) облучение ионами N_2^+ приводит к морфологии с наклонными тупиковыми порами, образованными столбчато-игольчатыми топографическими элементами, столкновительное распыление доминирующих микрограней которых существенно подавляется по сравнению с распылением при номинальном угле падения. В три раза меньшее значение Y при $\theta = 60^\circ$ является близким к соответствующему коэффициенту распыления Y при $\theta=0^\circ$. Причиной, вызывающей рост морфологических элементов при ионном облучении может быть неоднородность элементного состава [1]. Однако спектрометрия РОР показала, что состав измененного поверхностного слоя УПВ-1Т приблизительно одинаков на боковых гранях и торцах ионно-индуцированных топографических элементов. Атомная концентрация азота при облучении при комнатной температуре составляет 18%, при $T=400^\circ\text{C}$ намного меньше – 7%. Основная причина образования специфической морфологии, вызывающей подавление распыления УПВ-1Т при $\theta = 60^\circ$, связывается с результатами специально проведенного рентгеновского анализа УПВ-1Т. Найдено, что квазикристалл УПВ-1Т характеризуется наличием двух текстурных компонентов – основного с осью [001], нормальной к поверхности пластинки УПВ-1Т, и дополнительного с осью [001] под углом 58° относительно поверхности, причем объемные радиационные нарушения (использовали образцы УПВ-1Т после нейтронного облучения) приводят к уменьшению основного текстурного компонента и росту дополнительного. Предполагается, что ионное облучение вызывает аналогичную текстурную перестройку поверхностного слоя УПВ-1Т, которая с учетом анизотропной самодиффузии в графите отве-

чает за формирование наклонных столбчато-игольчатых морфологических элементов. Исследование микрогеометрии поверхности УПВ-1Т при облучении ионами Ag^+ энергии 30 кэВ показало, что в отличие от ассиметричного гребневидного рельефа, см. рис.1, при наклонной ионной бомбардировке формируется зависящий от температуры мишени симметричный рельеф. Для угла падения ионов Ag^+ $\theta = 60^\circ$ наблюдается топографическое подавление распыления УПВ-1Т, причем эффект наблюдается не только при повышенной температуре мишени, как в случае облучения ионами N_2^+ , но и комнатной. Двукратное подавление распыления отчетливо фиксируется при флюенсах $\geq 2 \cdot 10^{19}$ ион/см² и сохраняется при последующих облучениях мишени (с общим флюенсом $\sim 10^{20}$ ион/см²). Коэффициент распыления при этом близок к соответствующему значению Y при $\theta = 0^\circ$.

Сильная анизотропия физических свойств является характерной для углерод-углеродных композитов (УУКМ), особенно однонаправленных, в которых армирующий материал углеродные волокна пронизывают матрицу в одном направлении, рис.4а. В **разделе 4.2** рассмотрены вызываемые высокодозным облучением ионами N_2^+ структурно-морфологические изменения в поверхностном слое однонаправленного УУКМ марки КУП-ВМ (НИИграфит) с продольным и поперечным срезом, армирующие волокна соответственно параллельны и перпендикулярны поверхности. Установлено, что температурная зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ для КУП-ВМ проявляет сложный ступенчатый

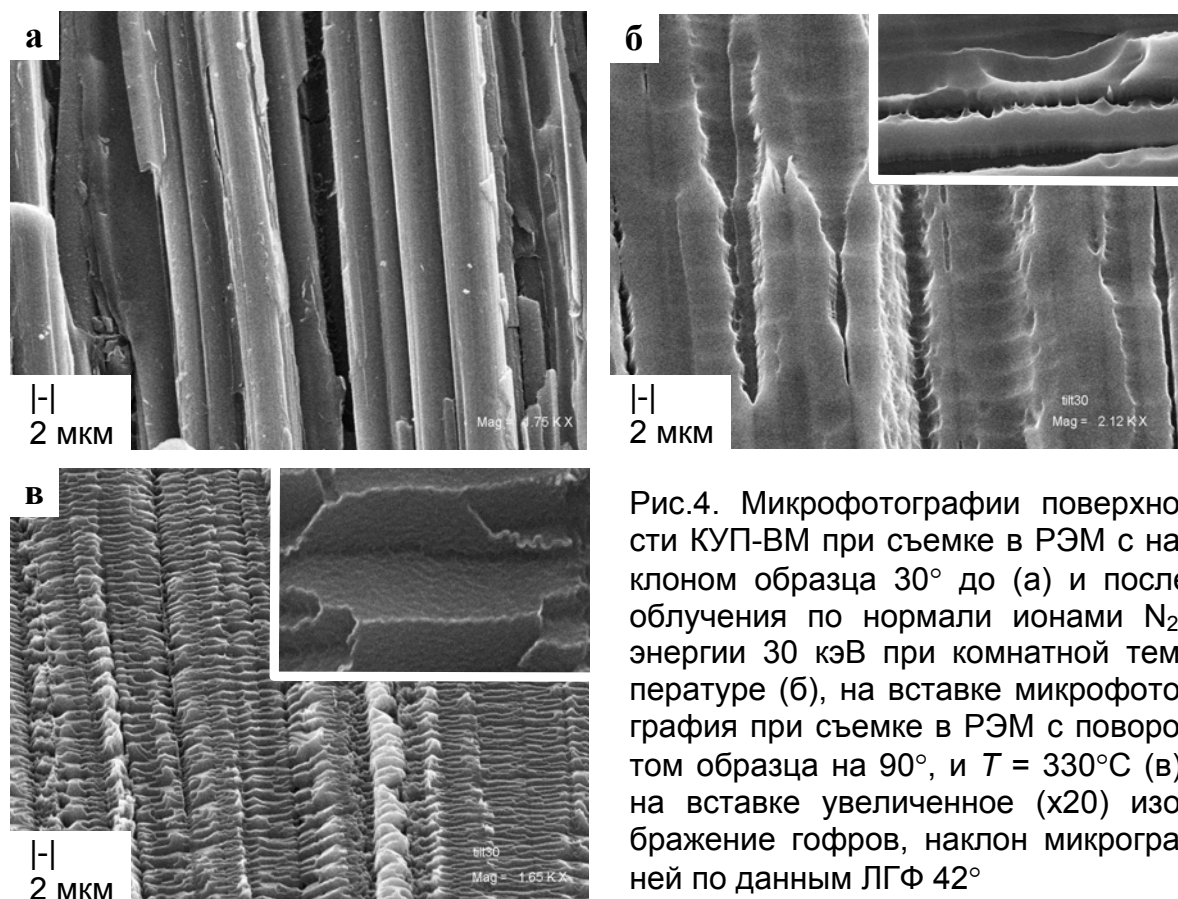


Рис.4. Микрофотографии поверхности КУП-ВМ при съемке в РЭМ с наклоном образца 30° до (а) и после облучения по нормали ионами N_2^+ энергии 30 кэВ при комнатной температуре (б), на вставке микрофотография при съемке в РЭМ с поворотом образца на 90° , и $T = 330^\circ\text{C}$ (в), на вставке увеличенное (x20) изображение гофров, наклон микрогра-ней по данным ЛГФ 42°

характер, обусловленный процессами динамического отжига радиационных нарушений в композите. Дифракция электронов на отражение показала, что ионное облучение приводит к потере анизотропии структуры поверхностного слоя композита КУП-ВМ – аморфизации при комнатной температуре и изотропной рекристаллизации при $T > T_a$. Модифицирование однонаправленной волокнистой морфологии КУП-ВМ зависит от температуры мишени, рис.4. При комнатной температуре на поверхности волокон появляются продольные углубления, при повышении температуры наблюдается гофрирование волокон с ребрами гофров, перпендикулярными оси волокна, и гранями правильной призматической формы. Облучение поперечного среза КУП-ВМ также приводит к сильному изменению исходной морфологии, но с меньшими различиями при $T < T_a$ и $T > T_a$ – на поверхности образуются воронкообразные кратеры, отражающие неоднородную по сечению структуру армирующих волокон. Изменения элементного состава в результате ионного облучения практически не зависят от типа среза КУП-ВМ. Концентрация имплантированного азота в поверхностном слое при $T < T_a$ составляет ~16%, тогда как при $T > T_a$ ~11%.

Мониторинг изменения выхода вторичных электронов при ионном облучении является эффективным методом исследования ионно-индуцированных структурных изменений в тонком (~ нм) поверхностном слое материалов. В **разделе 4.3** исследуется влияние кристаллической структуры твердого тела на молекулярный эффект в ионно-электронной эмиссии, состоящий в неаддитивности выхода электронов при бомбардировке твердого тела атомарными и молекулярными ионами одинаковой скорости с показателем молекулярного эффекта $R_n = \gamma_n/n\gamma_1 < 1$. Экспериментально обнаруженная недавно ориентационная зависимость показателя $R_2(\theta) = \gamma_2/2\gamma_1$ при облучении ионами N_2^+ и N^+ поверхности $Cu(001)$ рассмотрена в работе в рамках моделей анизотропии ионно-электронной эмиссии кристаллов. Найдено, что сильная угловая зависимость показателя $R_2(\theta)$ может быть хорошо описана в рамках механизма выметания электронов, предложенного Е.С. Парилисом, каналирования ионов и затенения атомов при углах соответственно меньших и больших критического угла Линдхарда ψ_L . Показано, что первый максимум зависимости $R_2(\theta)$ наступает раньше максимума соответствующих кривых $\gamma_2(\theta)$ и $\gamma_1(\theta)$. Это означает, что при выходе из тени при $\theta > \psi_L$ процесс выметания электронов может подавляться. Выводы теоретического рассмотрения подтвердились в экспериментах с использованием полупроводниковой $Ge(111)$ и стеклоуглеродных мишеней. Картины молекулярного эффекта для кристаллического и аморфизированного состояния германия аналогичны наблюдаемым для кристалла $Cu(001)$ и поликристаллической меди. Наибольший молекулярный эффект наблюдается для направленной ориентации $Ge(111)$ при $\theta = 0^\circ$ ($R_2=0.91\pm 0.02$) и практически отсутствует при $\theta = 10^\circ$ ($R_2 \approx 1$). Для аморфизированного состояния германия $R_2=0.96\pm 0.02$ является промежуточным значением. Сравнение данных для стеклоуглеродов СУ–850 и СУ–2500 показывает, что при $T > T_a$, когда упорядочение структуры приводит к практически одному и тому же со-

стоянию поверхностного слоя, величина R_2 для обоих материалов ~ 0.95 и близка к R_2 для поликристаллического графита при $T > T_a$. При $T < T_a$, когда под действием облучения происходит разупорядочение структуры стеклоуглеродов, величина $R_2 = 0.92 \pm 0.02$ для менее плотного стеклоуглерода СУ-850 оказывается меньше, чем $R_2 = 0.97 \pm 0.02$ для более плотного СУ-2500. Это также можно связать с зависящими от средней атомной плотности процессами затенения атомов в твердом теле при ионизации быстрыми частицами.

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

1. Разработан экспериментальный стенд гониофотометрии отраженного лазерного излучения, методики исследования микрогеометрии поверхности и её учета при оценках коэффициентов распыления Y и ионно-электронной эмиссии γ с использованием расчетов эмиссионных процессов для гладкой поверхности. На примерах распыления поликристаллической меди и стеклоуглерода ионами Ag^+ энергии 30 кэВ показано, что разработанная методика устраняет расхождения эксперимента и результатов компьютерного моделирования распыления гладкой поверхности.

2. Впервые с помощью лазерной гониофотометрии проведены исследования морфологии поверхности изотропных и анизотропных материалов, формирующейся при физическом распылении. Характер и параметры распределений локальных углов наклона микрограней ионно-индуцированного рельефа для поликристаллической меди и высокоориентированного пирографита (Ag^+ энергии 30 кэВ) найдены существенно различными. Для меди положения максимумов распределений локальных углов близки к предсказываемым макроскопической теорией эрозии. Для высокоориентированного пирографита необходимо учитывать его специфическую текстуру и анизотропную самодиффузию, т.е. отвечающие за формирование волнообразного рельефа факторы.

3. Разработаны аналитическая и компьютерная методики оценки уровня первичных радиационных повреждений dpa применительно к задачам облучения высокими флюенсами ионов. Показано, что при движении границы поверхности за счет распыления уровень dpa определяется углом падения бомбардирующих частиц, отношением характерных глубин проникновения ионов и выхода распыленных атомов, энергии связи поверхностных атомов к пороговой энергии дефектообразования и практически не зависит от сечения упругого торможения ионов. При анализе динамического отжига в стеклоуглеродах расчеты показали, что, хотя интенсивность радиационного воздействия ионов Ag^+ в три раза больше, чем N^+ , стационарный уровень dpa , достигаемый при высоких флюенсах облучения ионами Ag^+ , оказывается меньше соответствующего уровня для N^+ на всей глубине дефектообразования.

4. Впервые, с целью сопоставления процессов распыления изотропных и анизотропных углеродных материалов, экспериментально измерены коэффициенты распыления стеклоуглерода СУ-2500 и высокоориен-

тированного пирографита УПВ-1Т при различных углах падения ионов Ar^+ энергии 30 кэВ при комнатной температуре и $T > 300^\circ\text{C}$. Показано, что угловая зависимость $Y(\theta_i)$ для стеклоглерода близка к таковой для поликристаллического графита. Для анизотропного УПВ-1Т коэффициент распыления при наклонном падении в два раза меньше соответствующих данных для изотропных материалов и близок к значению Y при нормальном падении ионов на мишень.

5. Впервые экспериментально показано, что температурные зависимости коэффициента кинетической ионно-электронной эмиссии $\gamma(T)$ для углеродных материалов отражают эффекты плотности ионного тока. С увеличением плотности тока отжиг радиационных нарушений в процессе облучения стеклоглеродов происходит при все меньших температурах T_a , определяемых по скачку зависимости $\gamma(T)$. Для низкотемпературных стеклоглеродов скачкообразная зависимость $\gamma(T)$ трансформируется в монотонную, и разупорядочение поверхностного слоя с понижением температуры облучения не наблюдается. Предполагается, что влияние плотности ионного тока обусловлено локальным повышением температуры при облучении материалов с низкой теплопроводностью.

6. Экспериментально исследованы морфология, элементный состав и структура поверхностного слоя, формирующегося при падении ионов N_2^+ энергии 30 кэВ под углом падения 60° на базисную плоскость высокоориентированного пирографита УПВ-1Т при температурах ниже и выше температуры T_a ионно-индуцированного структурного перехода. Рентгеноструктурные исследования показали, что объемные свойства УПВ-1Т характеризуются наличием, по крайней мере, двух текстурных компонентов – основного с осью $[001]$, нормальной к поверхности пластинки УПВ-1Т, и дополнительного с осью $[001]$, направленной под углом 58° к поверхности. Двойникование кристаллитов при ионном облучении может приводить к текстурной перестройке поверхностного слоя УПВ-1Т и формированию наклонных столбчато-игольчатых морфологических элементов, вызывающих обнаруженное ранее подавление распыления.

7. Экспериментально исследованы морфология, элементный состав и структура измененного поверхностного слоя однонаправленного углерод-углеродного композита КУП-ВМ при высоких флюенсах облучения ионами N_2^+ энергии 30 кэВ. Найдено, что ионное облучение приводит к потере анизотропии структуры поверхностного слоя композита: аморфизации при комнатной температуре и изотропной рекристаллизации при $T > T_a$. Модифицирование волокнистой морфологии КУП-ВМ при ионном облучении зависит от температуры мишени – при комнатной температуре на волокнах появляются продольные углубления, при повышении температуры наблюдается гофрирование волокон: ребра гофров перпендикулярны оси волокна, грани имеют правильную призматическую форму и наноразмерную шероховатость.

8. Предложена модель молекулярного эффекта для ионно-электронной эмиссии монокристаллов, объединяющая механизмы неадекватности выхода электронов и анизотропии ионно-электронной эмис-

сии. Показано, что сильная угловая зависимость показателя молекулярного эффекта для кристаллов Cu(001) и Ge(111) хорошо описывается в рамках данной модели. В области частичного затенения нижележащих атомов процесс выметания электронов подавляется. Более сильный молекулярный эффект для менее плотного стеклоуглерода CУ–850, по сравнению с более плотным CУ–2500, обусловлен зависящим от средней атомной плотности процессом затенения атомов в твердом теле при ионизации быстрыми частицами.

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. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. - М.: Metallurgia, 1990. - 216 с.
3. Ehrhart P., Schilling W., Ullmaier H. Radiation Damage in Crystals // Encyclopedia of Applied Physics - 1996. - v. 15. - p. 429-457.
4. Chan W.L., Chason E. Making waves: Kinetic processes controlling surface evolution during low energy ion sputtering // J. Appl. Phys. - 2007. - v. 101. - p. 121301(1-46).
5. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С. Модификация структуры и эмиссионные свойства углеродных материалов при высокодозном ионном облучении // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. - 2008. - № 1. - с.58-74.
6. Shulga V. I. Computer simulation of single-crystal and polycrystal sputtering. I // Rad. Eff. - 1983. - v. 70. - p. 65-83.
7. Biersack J.P., Eckstein W. Sputtering Studies with the Monte Carlo Program TRIM.SP // Applied Physics A. - 1984. - v. 34. - p. 73-94.
8. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физ. распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Р. Бериша. - М.: Мир, 1984. - 336 с.
9. Машкова Е.С., Молчанов В.А., Фаязов И.М., Экштайн В. Экспериментальное и компьютерное изучение угловой зависимости коэффициента распыления графита // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1994. - № 2. - с. 33-37.

Основные публикации по теме диссертации

1. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Жидкова И.И. Исследование поверхностного рельефа с использованием стенда лазерного гониофотометра // Труды НИИ РХТУ им. Д.И.Менделеева. Серия: "Инженерная механика, материаловедение и надежность оборудования" / РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт. Новомосковск. -2002. - Вып. №4 (7). - с.14-18.
2. Андрианова Н.Н., Борисов А.М. Влияние угла падения на степень радиационных повреждений в поверхностном слое твердых тел при ионно-лучевом распылении / «Быстрозакаленные материалы и покрытия» //

Докл. 2-й Всероссийской научно-технической конференции, 17-18 ноября 2003г. М.: ИТЦ «МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского. - 2003. - с. 233-237.

3. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Немов А.С. Особенности ионно-индуцированного рельефа при высокодозном распылении поликристаллического графита / «Быстрозакаленные материалы и покрытия» // Докл. 3-й Всероссийской научно-технической конференции, 23-24 ноября 2004г. М.: ИТЦ «МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского. - 2004. - с. 225-230.

4. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. Исследование рельефа, развивающегося на поверхности поликристаллической меди при высокодозном распылении ионами аргона // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед.- 2005. - №3. - с. 79-84.

5. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Shulga V.I. The effect of microrelief evolution on the angular dependence of polycrystalline Cu sputtering yield // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B. - 2005. - v. 230/1-4. - p. 583-588.

6. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. Влияние ионно-индуцированной топографии графита на температурные и угловые зависимости ионно-электронной эмиссии / «Быстрозакаленные материалы и покрытия» // Докл. 4-й Всероссийской научно-технической конференции, 22-23 ноября 2005г. М.: ИТЦ «МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского. - 2005. - с. 230-234.

7. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. Влияние ионно-индуцированной топографии поверхности на ионно-электронную эмиссию и распыление поликристаллической меди // Прикладная физика. - 2006. - №4. - с. 89-93.

8. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А., Сорокин А.И. Температурные зависимости ионно-электронной эмиссии стеклоуглеродов при облучении ионами аргона энергии 30 кэВ // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. - 2007. - № 3. - с. 4-9.

9. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Parilis E.S., Sorokin A.I., Virgiliev Yu.S. Ion-induced electron emission of glassy carbons // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B. - 2007. - v. 256. - p. 515-519.

10. Андрианова Н.Н., Бецофен С.Я., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А. Исследование эффекта подавления распыления высокоориентированного пирографита при наклонной ионной бомбардировке // Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2007) Материалы 18 Межд. конф. 24-28 августа 2007г. М.: МАТИ. - 2007. - т. 3. - с. 75-78.

11. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Куликаускас В.С., Немов А.С., Питиримова Е.А., Тимофеев М.А. Модификация структуры и морфологии поверхностного слоя углерод-углеродного композита при высокодозном ионном облучении / «Быстрозакаленные материалы и покрытия» // Труды 6-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции. 4-5 декабря 2007г.

«МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского: Сб. трудов. М.: МАТИ. - 2007. - с. 353-358.

12. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Сорокин А.И. Высокодозовое распыление стеклоуглерода ионами аргона // Физика и химия обработки материалов. - 2008. - №1. - С. 24-27.

13. Андрианова Н.Н., Борисов А.М. Моделирование дефектообразования в материалах при высоких флюенсах ионного облучения // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. - 2008. - № 3. - с. 23-26.

14. Авилкина В.С., 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.

15. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Parilis E.S. The effect of crystalline structure on molecular effect in ion-induced electron emission // Vacuum. - 2008. - v. 82. - p. 906-910.

16. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А. Закономерности ионно-электронной эмиссии одномерного углерод-углеродного композиционного материала // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. - 2008. - № 5. - с. 23-26.

17. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Сорокин В.И., Питиримова Е.А. Влияние плотности потока на температурные зависимости ионно-электронной эмиссии углеродных материалов // Изв. РАН. Сер. Физич. - 2008. - т. 72. - №7. - с. 944-948.

18. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. Распыление высокоориентированного пирографита ионами аргона энергии 30 кэВ. Тезисы докладов XXXVIII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. А.Ф.Тулинова, - М.: Университетская книга. - 2008. - с. 114.

Наталья Николаевна Андрианова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ
ОБЛУЧЕНИЯ ПУЧКАМИ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ**

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

Подписано в печать 25.07.2008 г. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № Т-848

Отпечатано в типографии «КДУ»
Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: press@kdu.ru