

На правах рукописи

Бачурин Владимир Иванович

**РАСПЫЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ И  
ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ ПРИ ФАЗОВЫХ  
ПРЕВРАЩЕНИЯХ**

01.04.04 - физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико - математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Ярославском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Мартыненко Юрий Владимирович

доктор технических наук, профессор  
Акишин Анатолий Иванович

доктор физико-математических наук, профессор  
Борисов Анатолий Михайлович

Ведущая организация : Московский авиационный институт  
(Государственный технический университет)

Защита состоится 04 октября 2007 года в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.051.001.66 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2, физический факультет, аудитория 5-19

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.501.001.66,  
доктор физико-математических наук

Ершов А.П.

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы**

При взаимодействии ускоренных ионов с поверхностью твердых тел происходят процессы, представляющие как научный, так и практический интерес. Передача энергии ионов атомам мишени сопровождается поверхностными нарушениями и возникновением области каскада соударений атомов, глубина залегания которой определяется энергией падающих ионов. При этом происходит эмиссия атомных частиц в основном (распыление), возбужденном (ионно-фотонная эмиссия) и заряженном (вторично-ионная эмиссия) состояниях. Такие частицы несут информацию о составе поверхностных слоев, широко применяются для анализа поверхности твердых тел и напыления тонких пленок, в том числе, различных упрочняющих покрытий.

Ионная бомбардировка поверхности приводит к развитию рельефа, изменению кристаллической структуры и состава многокомпонентных мишеней. В случае применения в качестве первичных химически активных ионов в приповерхностном слое происходит образование химических соединений. При этом свойства модифицированных слоев могут существенно отличаться от объемных свойств твердого тела. В частности, их формирование приводит к увеличению эмиссии вторичных ионов и замедлению роста микрорельефа на поверхности. Этот результат широко применяется во вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) для повышения чувствительности и улучшения послойного разрешения при анализе различных структур. Учитывая легкость управления параметрами ионного пучка (тип, энергия, плотность тока и др.), распыление твердых тел ионами химически активных газов также можно рассматривать в качестве инструмента для создания поверхностных слоев с заданными свойствами.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию процессов формирования волнообразного рельефа (ВР) на поверхности твердых тел при ионном облучении. Экспериментально установлено, что параметры рельефа (длина волны, амплитуда), а также доза облучения, при которой он зарождается, зависят от типа ионов и условий бомбардировки. Изучавшийся вначале, как фактор, снижающий послойное разрешение при ВИМС анализе, ВР (механизм образования которого еще не совсем понятен) находит сегодня применение в нанотехнологиях в микроэлектронике и других областях.

Неравновесные процессы, происходящие при распылении мишени ионами инертных и химически активных газов, могут приводить к формированию различных фаз интерметаллических и химических соединений на границе раздела тонкопленочных структур или в тонких пленках в процессе их напыления. Исследование неравновесных

процессов важно для разработки технологии получения покрытий на поверхности твердых тел, изменяющих микротвердость, износостойкость, коррозионную стойкость материалов.

Таким образом, процессы, происходящие при распылении поверхности твердых тел, находят широкое применение в современных технологиях и представляют научный и практический интерес.

Несмотря на то, что взаимодействие ионов с поверхностью твердых тел изучается в течение многих лет, механизмы некоторых явлений изучены недостаточно. Для распыления одноэлементных материалов ионами инертных газов существует несколько моделей, позволяющих рассчитывать коэффициенты распыления при различных углах падения первичных ионов, энергетическое и пространственное распределение распыленных атомов. Однако, распыление как одно-, так и многокомпонентных материалов ионами химически активных газов (кислород, азот), которые применяются в практическом ВИМС анализе, изучено недостаточно, как экспериментально, так и теоретически.

До сих пор не создано единой теории формирования вторичных ионов. Отсутствие ясного понимания механизмов образования вторичных ионов создает большие проблемы для проведения количественного анализа состава поверхности методом вторичной ионной масс-спектрометрии. Поэтому необходимо проведение экспериментальных и теоретических работ для оценки вкладов различных факторов во вторичную ионную эмиссию.

Для лучшего понимания механизмов эмиссии атомных частиц представляют интерес исследования, в которых эмиссия происходит с поверхности одного и того же образца, находящегося в различных фазовых состояниях, отличающихся известным изменением небольшого числа параметров. Это может осуществляться, например, при фазовых переходах первого и второго рода, когда происходит перестройка кристаллической и электронной структуры поверхностного слоя, а выход нейтральных и заряженных частиц практически не зависит от температуры внутри одной фазы. Изучение особенностей эмиссии атомных частиц в области фазовых переходов позволяет, во-первых, оценить вклад ряда параметров, определяющих распыление нейтральных и заряженных частиц. Во-вторых, дает возможность провести тестирование различных моделей распыления и вторичной ионной эмиссии.

Важные сведения о механизмах эмиссии нейтральных и заряженных частиц можно получить, применяя, в качестве первичных, ионы химически активных газов и изучая угловые зависимости распыления. В этом случае при вариации угла падения ионов

изменяется химический состав и структура поверхностного слоя, из которого происходит эмиссия атомных частиц. Имеется небольшое количество работ, в которых изучается модифицированный ионной бомбардировкой слой мишени для кислородных пучков. В то же время, для анализа поверхности представляет интерес использование пучка ионов азота, формирования на ней рельефа и нитридов различных материалов (применяемых, в том числе в микроэлектронной технологии). Это требует проведение дополнительных исследований распыления поверхности ионами химически активных газов и сравнения с результатами, полученными для ионов инертных газов.

### **Цель и основные задачи работы**

Целью работы явилось исследование особенностей распыления твердых тел ионами инертных и химически активных газов в условиях протекания в образцах фазовых превращений, в результате которых изменяется кристаллическая структура, магнитные свойства и химический состав приповерхностных слоев.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Экспериментальное и теоретическое исследование температурной зависимости коэффициента распыления образцов в области полиморфного и магнитного фазовых переходов. Проведение, на основании общепринятых моделей распыления, анализа возможных причин изменения коэффициентов распыления.

2. Изучение влияние фазовых переходов I и II рода на вторичную ионную эмиссию с поверхности мишеней при использовании ионов инертных и химически активных газов. Оценка характера поведения полученных температурных зависимостей вторичной ионной эмиссии с точки зрения существующих моделей образования вторичных ионов и данных по распылению образцов, структуры и состава слоя, модифицированного ионной бомбардировкой.

3. Определение состава и структуры приповерхностного слоя образцов при их облучении ионами химически активных газов.

4. Выявление особенностей и исследование механизмов распыления полупроводников и диэлектриков ионами инертного и химически активного газа.

5. Исследование влияния состава и структуры поверхности, модифицированной ионным облучением, на образование волнообразного рельефа. Построение модели зарождения ВР.

6. Изучение процессов ионного перемешивания и фазообразования на границе пленка – подложка, в том числе при повышенных температурах.

7. Оценка влияния низкоэнергетичной бомбардировки ионами активного газа на процесс напыления и свойства пленки, используемой в качестве упрочняющего покрытия.

### Научная новизна работы

В работе впервые получены следующие основные результаты.

1. Изучено распыление 4f-переходного металла - гадолиния в области магнитного фазового перехода. Установлено, что при переходе в парамагнитное состояние коэффициент распыления Gd увеличивается на 10-15%. Для монокристаллического образца обнаружен узкий максимум температурной зависимости коэффициента распыления ( $Y$ ) в окрестности точки Кюри, более, чем в два раза, превосходящий значение  $Y$  в ферромагнитном состоянии. Рассчитана добавка к потенциалу взаимодействия атомов в ферромагнитном состоянии, вследствие косвенного обменного взаимодействия атомов Gd. Предложено объяснение увеличения коэффициента распыления при переходе через точку Кюри, которое связывается с уменьшением энергии связи атомов на поверхности из-за изменения потенциала взаимодействия атомов в парамагнитном состоянии.

2. Исследовано поведение вторичной ионной эмиссии (ВИЭ) в области магнитного фазового превращения. Установлено, что при переходе образцов из ферро- в парамагнитное состояние происходит ступенчатое изменение ВИЭ, которое объясняется изменениями плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми и энергии связи атомов на поверхности. Знак изменений ВИЭ при магнитном фазовом превращении является противоположным знаком изменения распыления.

3. Установлена возможность изменения магнитных свойств поверхностных слоев при бомбардировке никеля ионами химически активного газа. Измерения, выполненные с помощью РФЭС, показали, что в этом случае в поверхностном слое формируются химические соединения - оксид и нитрид никеля, которые являются антиферромагнетиком и парамагнетиком, соответственно.

4. Проведенные исследования изменений состава и химического состояния приповерхностного слоя и остаточной атмосферы вблизи распыляемой поверхности позволили выявить присутствие чисто химического механизма распыления диоксида кремния ионами аргона и азота. Последний заключается в образовании в приповерхностном слое молекул SiO и NO, имеющих низкие значения энергии связи с поверхностью. В результате десорбции этих молекул коэффициент распыления диоксида кремния увеличивается по сравнению с Si.

5. Изучен процесс формирования поверхностного слоя при бомбардировке кремния ионами азота при различных энергиях и углах падения первичного пучка. Установлено, что при углах падения до  $35^\circ$  поверхностный слой представляет собой нитрид кремния, а

при больших смесь кремния и нитрида кремния, причем доля последнего резко уменьшается с ростом угла падения ионов.

6. При изучении угловой зависимости коэффициента распыления  $Y(\theta)$  обнаружены особенности в случае распыления кремния ионами азота. При углах падения  $\theta > 35^\circ$  кривая  $Y(\theta)$  растет значительно быстрее с увеличением  $\theta$  при бомбардировке поверхности ионами азота по сравнению с ионами аргона. Этот результат связывается с уменьшением средней энергии связи атомов на поверхности при увеличении угла падения ионов за счет увеличения доли кремния, имеющего меньшую энергию связи.

7. Выявлены факторы, ускоряющие процесс формирования волнообразного рельефа на поверхности при распылении кремния. Предложена модель эрозии твердых тел, которая предполагает зарождение ВР при наличии на поверхности неоднородностей нанометрового масштаба.

### **Научная и практическая ценность работы**

1. В процессе выполнения работы было создано две экспериментальные установки в ИМИ РАН (Ярославль) и Солфордском университете (Манчестер, Англия) для изучения процессов распыления и вторичной ионной эмиссии и исследования взаимодействия высокоэнергетических ионов с поверхностью методом Резерфордского обратного рассеяния.

2. Было обнаружено увеличение распыления Gd 10-15% при переходе из ферро- в парамагнитное состояние, что было объяснено уменьшением потенциала взаимодействия атомов мишени на ~6%. Этот результат интересен с физической точки зрения, поскольку показывает, что небольшие изменения в потенциалах взаимодействия атомов в твердом теле могут привести к заметным вариациям коэффициента распыления. И этот факт необходимо иметь в виду при практическом использовании распыления.

3. Сравнение температурных зависимостей вторичной ионной эмиссии и распыления магнитных материалов позволило оценить роль энергии связи в выходе вторичных ионов. Полученные результаты необходимо учитывать при практическом ВИМС анализе магнитных материалов.

4. Обнаруженное в работе влияние типа первичных ионов на температурную зависимость вторичной ионной эмиссии магнитных материалов указывает на возможность создания на поверхности слоев с магнитными свойствами, которые отличаются от магнитного состояния образца в объеме. Этот результат может использоваться при получении многослойных магнитных структур.

5. Выполненное в работе моделирование развития волнообразного рельефа на поверхности при ионной бомбардировке может применяться при создании наноструктур в микроэлектронике.

6. Показана возможность получения защитных покрытий путем формирования интерметаллических соединений ионным перемешиванием металлов пленки и подложки при повышенных температурах. Состав покрытия определяется толщиной пленки, дозой облучения и температурой подложки. Толщина покрытия может значительно превосходить проективный пробег ионов.

7. Изучение приповерхностных слоев кремния, облученного ионами азота, показывает, что ионная бомбардировка может использоваться для формирования барьерных слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в микроэлектронике. При этом, толщина и стехиометрический состав слоя зависят от легко управляемых параметров пучка.

### **Защищаемые положения**

1. Полиморфное превращение кристаллической решетки кобальта из гексагональной плотноупакованной в гранцентрированную кубическую сопровождается увеличением коэффициента  $S_0$  распыления почти в 1,5 раза. Этот результат объясняется изменением прозрачности монокристалла кобальта при фазовом переходе I рода.

2. При переходе гадолиния из ферро- в парамагнитное состояние коэффициент распыления увеличивается на 10-15%. При этом, в окрестности точки Кюри наблюдается максимум температурной зависимости коэффициента распыления примерно в два раза превосходящий его значение в ферромагнитном состоянии. Увеличение распыления в парамагнитном состоянии связано с существованием отрицательной добавки к потенциалу взаимодействия атомов в ферромагнитном состоянии, возникающей вследствие косвенного обменного взаимодействия атомов Gd. Ее исчезновение при температуре выше точки Кюри приводит к уменьшению энергии связи атомов на поверхности, что обеспечивает увеличение распыления в парамагнитном состоянии.

3. Изменение вторичной ионной эмиссии магнитных материалов при переходе из ферро- в парамагнитное состояние имеет обратный знак к тому, что получено для распыления нейтральных атомов. Это объясняется тем, что коэффициенты распыления и ВИЭ имеют противоположную зависимость от энергии связи атомов на поверхности. В то время как распыление увеличивается с уменьшением энергии связи, ВИЭ - уменьшается. Оценки, выполненные в рамках моделей ВИЭ, включающих энергию связи атомов на поверхности, дают хорошее количественное согласие с полученными



экспериментальными результатами. Бомбардировка поверхности никеля ионами химически активных газов изменяет магнитные свойства поверхности.

4. При распылении диоксида кремния ионами аргона и азота необходимо в дополнение к каскадному механизму рассматривать химический механизм распыления. В приповерхностном слое происходит образование газовых молекул SiO и NO, слабо связанных с поверхностью. Их десорбция значительно увеличивает скорость распыления образца.

5. Облучение образцов ионами азота формирует модифицированный приповерхностный слой. Состав и структура слоя определяется углом падения ионов, а толщина зависит от энергии и угла падения ионов. Для кремниевой мишени при углах падения  $\theta < 35^\circ$  модифицированный слой представляет собой нитрид кремния, а при больших - смесь кремния и нитрида кремния, причем доля последнего резко уменьшается с ростом угла падения ионов.

6. Угловая зависимость коэффициента распыления кремния ионами азота характеризуется аномально быстрым (по сравнению с распылением поверхности ионами аргона) ростом коэффициента распыления при увеличении угла падения ионов. Поведение кривой  $Y(\theta)$  объясняется уменьшением средней энергии связи при изменении  $\theta$  из-за увеличения доли кремния в приповерхностном слое с ростом угла падения ионов, энергия связи атомов которого почти в два раза меньше, чем для нитрида кремния.

7. Образование волнообразного рельефа при распылении кремния ионами азота происходит в диапазоне углов падения, для которого характерен резкий рост зависимости  $Y(\theta)$ . Наличие рельефа на исходной поверхности значительно ускоряет зарождение ВР. Предложена модель эрозии, учитывающая зависимость коэффициента распыления от локального угла падения ионов и размеров на поверхности. Получено уравнение, описывающее зарождение ВР, которое имеет волновое решение, если на поверхности существуют неоднородности субмикронного масштаба.

### **Апробация**

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Симпозиуме по взаимодействию атомных частиц с поверхностью твердых тел (Ташкент, 1979), IX International Conference on Atomic Collisions in Solids (Lyon, France, 1981), X International Conference on Atomic Collisions in Solids (Lyon, France, 1983), X International Vacuum Congress (Madrid, Spain, 1983), Всесоюзном семинаре “Диагностика поверхности ионными пучками”, (Одесса, 1990), XI Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью (Звенигород, 1993), I Всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника» (Москва, 1994), XII Международной конференции по

взаимодействию ионов с поверхностью (Звенигород, 1995), XIII International Vacuum Congress (Yokohama, Japan, 1995), IX International Conference of Ion Beam Modification of Materials (Canberra, Australia, 1995), I Республиканской конференции по физической электронике (Ташкент, Узбекистан, 1995), Юбилейной конференции “Структура и свойства кристаллических и аморфных материалов” (Нижний Новгород, 1996), XI International Workshop on “Inelastic Ion Surface Collisions” (Wangerooge, Germany, 1996), XIII Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью, (Звенигород, 1997), E-MRS 98 (Strasbourg, France, 1998), VII Межнациональном совещании “Радиационная физика твердого тела” (Москва, 1998), II Всероссийской научно-технической конференции “Микро- и нанoeлектроника” (Москва, 1998), XIV Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью (Звенигород, 1999), XV Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью (Звенигород, 2001), XVI Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью (Звенигород, 2003), XVII Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью (Звенигород, 2005), XXXVI Международной конференции “Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами” (Москва, 2006), I Всероссийской конференции “Физические и физико-химические основы ионной имплантации ” (Н.Новгород, 2006).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано более 50 работ, основные из которых приведены в конце автореферата.

### **Вклад автора**

Личный вклад автора в работы, написанные в соавторстве и вошедшие в диссертацию, является определяющим.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Она содержит 248 страниц текста, в том числе 72 рисунка и список литературы из 270 наименований.

### **Краткое содержание диссертации**

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируется цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы, защищаемые положения, сообщаются сведения об апробации и публикациях. Излагается структура диссертации.

**В первой главе** представлен обзор литературы, посвященный изучению влияния фазовых переходов на эмиссию атомных частиц при распылении поверхности ионами инертных газов, модификации поверхности твердых тел бомбардировкой ионами химически активных газов и экспериментальным и теоретическим результатам,

относящихся к образованию волнового рельефа при распылении поверхности твердых тел. На основании анализа представленных данных проводится постановка задачи работы.

**Во второй главе** приведено описание экспериментальных установок, методов и методик измерения, использованных в диссертационной работе.

В процессе выполнения работы был выполнен ряд экспериментов, который включал в себя:

- измерение коэффициентов распыления и вторичной ионной эмиссии с поверхности металлов, полупроводников и диэлектриков при их бомбардировке ионами инертных и химически активных газов;
- исследование состава и структуры модифицированных ионной бомбардировкой приповерхностных слоев образцов;
- изучение ионно-стимулированных процессов перемешивания на границе пленка - подложка;
- ионно-ассистированное осаждение упрочняющих покрытий и исследование их свойств.

Эксперименты выполнялись как на промышленных установках, так и на созданных в процессе выполнения работы. Использовались стандартные и оригинальные методики измерения потоков распыляемых частиц и анализа состава и структуры облученной поверхности.

Измерения коэффициентов массивных образцов проводились в высоковакуумной установке методами взвешивания и методики с использованием кварцевых микровесов. Коэффициенты распыления тонкопленочных объектов определялись на установке РЭОС РНІ 660. Измерялись объем распыленного материала и время его распыления, которое определялось из послонных оже-спектров при распылении мишени.

Температурная зависимость вторичной ионной эмиссии исследовалась на установках ВИМС фирмы Riber и вторичной атомной масс-спектрометрии, созданной автором для исследования потоков нейтральных и заряженных распыленных частиц и газовых молекул, десорбированных с поверхности при облучении образца.

Для изучения модифицированных ионной бомбардировкой поверхностных слоев использовался целый ряд методов анализа поверхности твердых тел, которые позволяли получать полную информацию о составе и структуре поверхности.

Послойный анализ распределения имплантированных при бомбардировке первичных ионов проводился методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке CAMECA IMS-4F. Тип первичных ионов и параметры бомбардировки подбирались таким образом, чтобы уменьшить процессы ионного перемешивания на

границе модифицированный слой-подложка. В ряде экспериментов распределение элементов и их состав в приповерхностном слое определялись с использованием метода Резерфордского обратного рассеяния (РОР).

Состав приповерхностного слоя при облучении образцов ионами химически активных газов измерялся с помощью растровой электронной оже-спектроскопии (РЭОС) на установке РНІ 660.

Химическое состояние элементов в модифицированном ионной бомбардировкой слое определялось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на установке XSAM 800 фирмы KRATOS.

Впервые подробное исследование состава и структуры приповерхностного слоя кремния, облученного ионами азота при различных энергиях и углах падения первичных ионов, было выполнено с помощью инфракрасной Фурье - спектроскопии пропускания на установке IFS 113 v фирмы BRUKER. Анализ основных спектральных характеристик (амплитуда, положение и форма) полос ИК-пропускания дает информацию о стехиометрии образующихся соединений, химических связях молекул с ближайшим окружением, кристаллической упорядоченности и др. Трудности, возникающие при применении этого метода, связанные с малой толщиной модифицированного слоя, были успешно преодолены.

Структура приповерхностного слоя и тонкопленочных покрытия определялась с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) на установке JEOL 3010 и малоугловой дифракции рентгеновских лучей. Возникновение и развитие рельефа на поверхности кремния под действием бомбардировки ионами азота регистрировалось с помощью РЭОС по специально разработанной методике.

Для исследования процессов взаимодействия ионов с поверхностью твердых тел была создана экспериментальная сверхвысоковакуумная установка, которая позволяла проводить *in situ* измерения состава облученных образцов методом РОР.

**В третьей главе** приводятся результаты по исследованию температурных зависимостей распыления Co и Gd в областях температур, включающих точки фазовых переходов I и II рода.

Поведение температурной зависимости распыления в области полиморфного фазового превращения изучалось для монокристалла Co. Точка перехода Co из  $\alpha$  (ГПУ-решетка) в  $\beta$  (ГЦК) фазу составляет 450°C. При  $\alpha \rightarrow \beta$  переходе прозрачность кристалла, если на поверхность выведена грань (0001), переходящая в (111) в ГЦК решетке, уменьшается почти в 1.5 раза. Результаты этого исследования могли оценить вклад ядерного торможения падающих ионов в распыление.

Исследование влияния фазового перехода I рода на распыление проводилось методом изучения эмиссии возбужденных атомов (ионно-фотонной эмиссии) в области полиморфного фазового превращения. Многочисленные измерения, выполненные для различных линий возбужденных атомов Co показали, что зависимость эмиссии фотонов  $I_\lambda(T)$  для поликристалла Co не имеет особенностей вблизи температуры фазового перехода. В случае бомбардировки монокристалла Co обнаружено резкое увеличение ионно-фотонной эмиссии при температуре  $T=460^\circ\text{C}$  при нагревании образца и уменьшение при  $T=390^\circ\text{C}$  при охлаждении. Эти значения температур совпадают с температурами  $\alpha\rightarrow\beta$  и  $\beta\rightarrow\alpha$  полиморфных превращений, поэтому можно считать что именно они ответственны за наблюдаемые изменения зависимости  $I_\lambda(T)$ . Относительная величина изменений  $\eta$  зависимости  $I_\lambda(T)$  составляет 40%. Было установлено, что она слабо зависит от энергии падающих ионов и плотности тока. В то же время, изменения угла  $\theta$  между направлением ионного пучка и кристаллографическим направлением [0001] в пределах  $3^\circ$  приводили к уменьшению величины  $\eta$  почти в два раза. При увеличении  $\theta$  до  $12^\circ$  ионно-фотонная эмиссия практически не зависела от температуры.

Выбор Gd в качестве образца для изучения влияния магнитного фазового перехода на распыление был обусловлен рядом причин. Во-первых, температура Кюри  $T_c=16^\circ\text{C}$  лежит в удобном температурном интервале для проведения экспериментов. Во-вторых, за его магнитные свойства отвечает косвенное обменное взаимодействие 4f электронов (в отличие от прямого обменного взаимодействия 3d электронов для ранее исследованного Ni). В третьих, Gd наиболее прост для теоретического рассмотрения, поскольку полный орбитальный момент 4f электронов равен нулю и поэтому их распределение является сферически симметричным. Следует отметить, что кривая намагниченности  $M(T)$  гадолиния имеет не вейсовский характер. Резкое уменьшение намагниченности в слабых магнитных полях происходит в зависимости от напряженности поля при температурах  $T_o$ , меньших  $T_c$ . Внешнее магнитное поле  $H\sim 200$  Э повышает значение  $T_o$  до  $T_c$ . Поэтому для выяснения природы влияния магнитного состояния образца на распыление представлялось интересным исследовать температурную зависимость распыления Gd в отсутствие и при наличии внешнего магнитного поля.

Для всех используемых первичных ионов было обнаружено увеличение коэффициента распыления Gd в области магнитного фазового перехода, которое составляет 15-20%. При этом температурная зависимость  $Y(T)$  для монокристалла Gd

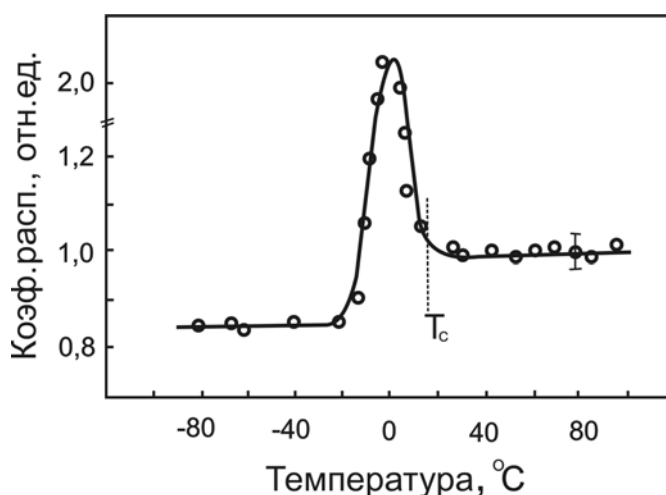


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента распыления грани (0001) монокристалла гадолиния ионами  $\text{Ne}^+$  с энергией 10 кэВ

имеет в области магнитного фазового перехода максимум, значение которого более, чем в 2 раза превышает коэффициент распыления в парамагнитном состоянии образца (рис.1).

Изменения зависимости  $Y(T)$  происходят в температурном интервале от  $-20$  до  $20^\circ\text{C}$ . Измерения  $Y(T)$ , выполненные при помещении образца в магнитное поле ( $H \approx 250$  Э), показали, что внешнее магнитное поле практически не изменяет характера поведения кривой  $Y(T)$ . Однако, температура, при которой происходит ступенчатое возрастание коэффициента распыления, увеличивается на  $10 \div 15^\circ\text{C}$  что свидетельствует о существовании корреляции между спонтанной намагниченностью образца и коэффициентом распыления при магнитном фазовом переходе.

Наблюдаемые изменения ионно-фотонной эмиссии монокристалла Со объясняются изменением коэффициента распыления при полиморфном переходе образца в рамках теории “прозрачности” [1], согласно которой падающий пучок ионов делится на две части. Одна из них каналируется и не дает вклада в распыление. Коэффициент распыления определяется как:

$$S(n, E) = \Xi(n, E) \cdot f(n, E) \cdot Y_0(E) \quad (1),$$

где  $n$  – направление оси канала,  $E$  – энергия падающих ионов,  $f(n, E)$  – вероятность того, что произойдет “распыляющее” столкновение с атомом мишени,  $\Xi(n, E)$  – подгоночный параметр, а  $Y_0(E)$  – коэффициент распыления образца в поликристаллическом состоянии.

$$f(n, E) = \pi \cdot d \cdot [d(n)]^3 \cdot [\Psi(n, E)]^2 \quad (2),$$

где  $d$  плотность атомов мишени,  $d(n)$  – средняя плотность атомов в направлении, параллельном оси канала, а  $\Psi(n, E)$  – критический угол каналирования, равный

$$\Psi(n, E) = \left\{ \frac{3 \cdot a_0^2 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{E \cdot [d(n)]^2} \right\}^{1/4} \quad (3),$$

где  $a_0 = 0.52 \text{ \AA}$  - Борковский радиус,  $Z_1$  и  $Z_2$  атомные номера падающего иона и атома мишени.

При нормальном падении пучка на грань (0001) Со ионы попадают в канал вдоль направления [0001]. После перестройки кристаллической решетки плоскость (0001) становится плоскостью (111) и пучок попадает в канал вдоль направления [111]. Площадь канала при этом уменьшается, а плотность атомов  $d(n)$  увеличивается в 1.5 раза. Согласно (1) – (3) это должно приводить к увеличению коэффициента распыления примерно в 1.9 раза. Этот результат согласуется с наблюдаемыми изменениями ионно-фотонной эмиссии монокристалла Со при полиморфном переходе..

Распыление одноэлементных образцов ионами низких энергий хорошо описывается каскадным механизмом [2]. В рамках этой теории коэффициент распыления определяется по формуле:

$$Y = \frac{\alpha \cdot S_n(E)}{E_b} \quad (4),$$

где  $\alpha$  - параметр, зависящий от соотношения масс падающего иона и атома мишени и угла падения ионов,  $S_n(E)$  – ядерное торможения падающих ионов и  $E_b$  – энергия связи атомов на поверхности. Из (4) видно, что причинами наблюдаемого поведения температурной зависимости коэффициента распыления поли- и монокристаллов гадолия  $Y(T)$  могут являться изменения энергии связи и ядерного торможения.

В работе проведена оценка уменьшения энергии связи гадолия при магнитном фазовом переходе, основанная на расчете изменения межатомного потенциала взаимодействия, который в ферромагнитном состоянии можно представить в виде суммы

$$U_f(r) = U_p(r) + H(r) \quad (5),$$

где  $U_f(r)$  и  $U_p(r)$  потенциалы взаимодействия атомов гадолия в ферро- и парамагнитном состоянии, а  $H(r)$  – добавка, обусловленная обменным взаимодействием.

В качестве  $U_p(r)$  выбирался потенциал сшитый из потенциалов Бора ( $r \leq r_1 = 1 \text{ \AA}$ ), Борн – Майера ( $r_1 \leq r \leq r_2 = 1.4 \text{ \AA}$ ) и Морзе ( $r \geq r_2$ ). Добавка  $H(r)$  рассчитывалась в рамках теории косвенного обменного взаимодействия РККИ (Рудермана, Киттеля, Касуии и Иосиды). Магнитные свойства редкоземельных металлов обусловлены взаимодействием электронов незаполненной 4f оболочки, которое осуществляется за счет поляризации электронов в зоне проводимости. Такое взаимодействие носит осциллирующий и дальнедействующий характер.

Выполненные оценки показали, что в ферромагнитном состоянии на межатомных расстояниях  $R = 3.63 \text{ \AA}$  потенциальная энергия взаимодействия по абсолютной величине

больше, чем в парамагнитном на  $6\div 10\%$ . Учет этого изменения приводит к увеличению энергии связи в ферромагнитном состоянии на  $\sim 10\%$  и, соответственно, уменьшению коэффициента распыления при температурах ниже точки Кюри на такую же величину. Оценка изменения коэффициента распыления при магнитном фазовом переходе хорошо согласуется с полученными экспериментальными результатами.

Анализ имеющихся экспериментальных и теоретических данных по поведению ряда физических величин и параметров в окрестности точки Кюри, проведенный в диссертационной работе, позволяет заключить, что максимум температурной зависимости распыления при магнитном переходе связан со значительным уменьшением энергии связи атомов на поверхности. Причиной этого являются значительные флуктуации магнитной подсистемы образца вблизи точки Кюри, которые приводят к увеличению амплитуды колебаний слабосвязанных атомов в приповерхностном слое.

**Четвертая глава** посвящена изучению поведения температурной зависимости вторичной ионной эмиссии в области температур фазовых переходов I и II рода. Были измерены зависимости  $I^+(T)$  для монокристаллов Ni в области магнитного фазового перехода, а также поликристаллических Ni и сплава инвар FeCoNi в окрестности  $T_c$  и поликристалла Co в интервале температур, включающем температуры полиморфных превращений. Выбор этих магнитных материалов был обусловлен тем обстоятельством, что для них известно поведение коэффициентов распыления. Особый интерес вызывало то обстоятельство, что изменения  $Y(T)$  при переходе в парамагнитное состояние для Ni и сплава имеют разные знаки. Проведение количественных измерений  $I^+(T)$  и сравнение результатов с данными по распылению важно для выяснения механизмов образования положительных вторичных ионов. При бомбардировке образцов никеля в качестве первичных использовались ионы инертных и химически активных газов.

Получены следующие экспериментальные результаты:

В области полиморфных превращений в поликристалле Co происходит ступенчатое уменьшение выхода вторичных ионов в полтора раза при ГПУ→ГЦК перестройке решетки. При температурах  $200\div 500^\circ\text{C}$  наблюдается температурный гистерезис зависимости  $I^+(T)$ . Температуры, при которых заканчиваются изменения  $I^+(T)$  при нагревании и начинаются при охлаждении, близки к значениям температур для ГПУ→ГЦК превращения ( $420^\circ\text{C}$ ) и обратного ГЦК→ГПУ превращения ( $340^\circ\text{C}$ ).

При бомбардировке моно- и поликристалла Ni ионами  $\text{Ag}^+$  выход вторичных ионов уменьшается на  $25\div 40\%$  при переходе образца из ферро в парамагнитное состояние. При этом в окрестности  $T_c$  имеется широкий максимум температурной зависимости  $I^+(T)$ ,



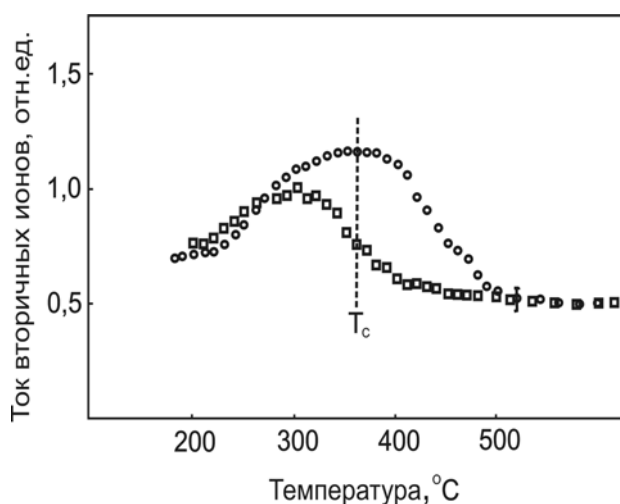


Рис.2. Температурная зависимость ВИЭ с поверхности монокристалла Ni

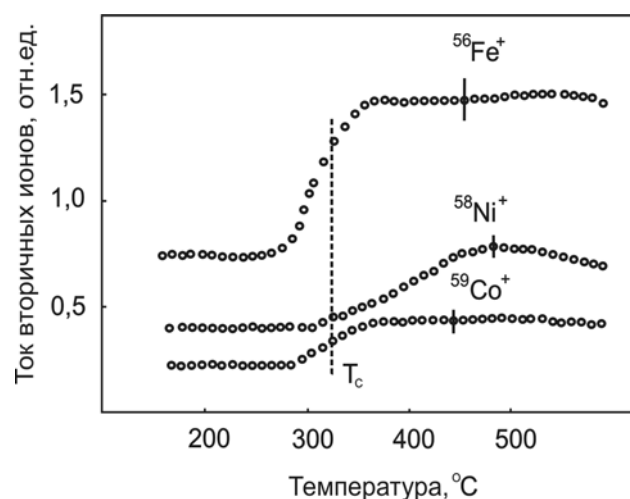


Рис.3. Температурная зависимость ВИЭ с поверхности поликристалла FeCoNi

более выраженный для монокристаллов. Кроме того, в области температур  $300\div 500^\circ\text{C}$  наблюдается температурный гистерезис кривой  $I^+(T)$  – ток вторичных ионов в этом интервале при нагревании выше, чем при охлаждении. Вне указанного интервала температур кривые, полученные при нагревании и охлаждении, практически совпадают. Переход сплава FeCoNi в парамагнитное состояние сопровождается увеличением тока всех матричных вторичных ионов в два раза. Отличительной чертой полученных кривых является то, что изменения зависимости  $I^+(T)$  для ионов  $\text{Fe}^+$  и  $\text{Co}^+$  происходят в температурном интервале  $280\div 350^\circ\text{C}$  ( $T_c = 320^\circ\text{C}$ ), в то время как для  $\text{Ni}^+$  в интервале  $280\div 480^\circ\text{C}$ . Последнее обстоятельство может быть связано выделением в приповерхностном слое областей, обогащенных Ni, точка Кюри для которого составляет  $360^\circ\text{C}$ .

В результате изучения влияния типа первичного пучка ( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{N}_2^+$  и  $\text{O}_2^+$ ) на температурные зависимости выхода вторичных ионов с поверхности моно и поликристаллов никеля установлено, что при использовании ионов химически активных газов характер зависимости  $I^+(T)$  меняется существенным образом (рис.4). Выход вторичных ионов  $\text{Ni}^+$  с поверхности образца, облучаемого ионами азота, также, как и при облучении ионами  $\text{Ar}^+$ , достигает максимального значения в окрестности  $T_c$ . После чего наблюдается спад кривой  $I^+(T)$ , который становится резким при температуре выше  $420^\circ\text{C}$ . Вместе с тем, никаких особенностей в поведении температурной зависимости выхода вторичных ионов с поверхности никеля в случае использования ионов  $\text{O}_2^+$  не наблюдается.

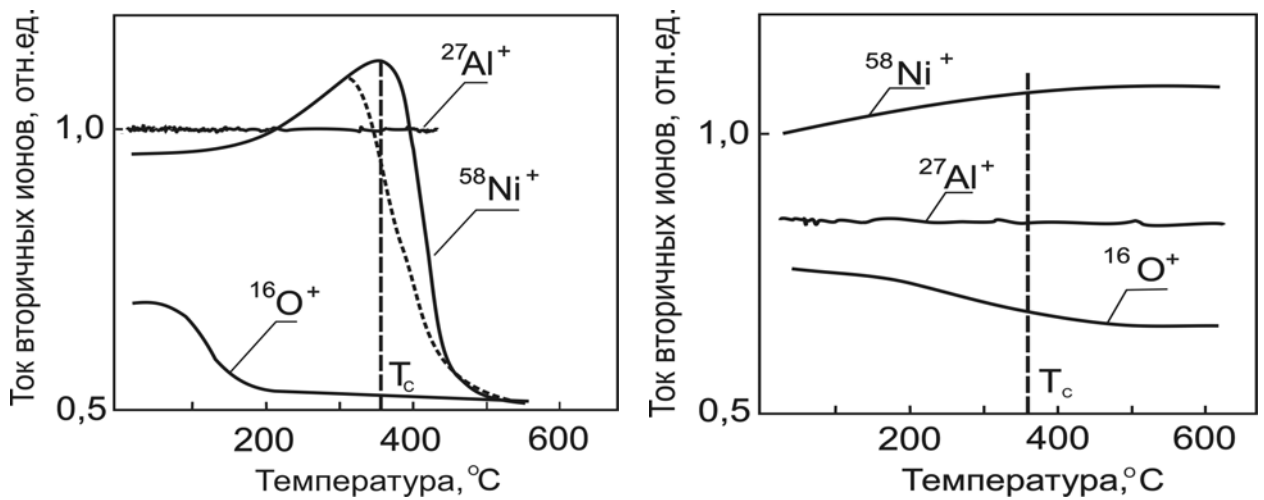


Рис.4. Температурная зависимость ВИЭ с поверхности поликристалла Ni при бомбардировке поверхности ионами аргона (а) и кислорода (б).

В работе проведено обсуждение полученных результатов с точки зрения общепринятых моделей ВИЭ и имеющихся данных по распылению исследованных образцов в области фазовых переходов.

Анализ представленных результатов позволил выделить существенную роль энергии связи атомов на поверхности  $E_b$  в формировании вторичных ионов. Эта величина в явном виде входит в модель [3], согласно которой вероятность образования положительного вторичного иона определяется формулой:

$$P^+ = \left( \frac{E_b}{I - \phi} \right)^2 \cdot \left( \frac{\hbar \cdot \nu}{a \cdot (I - \phi)} \right)^n \quad (6)$$

С учетом распыления по каскадному механизму:  $Y^+ \sim E_b^{3/2}$  (7)

Используя имеющиеся экспериментальные результаты по распылению поликристаллов Ni и FeCoNi и каскадный механизм распыления [2], можно оценить изменения энергии связи атомов при переходе в парамагнитное состояние. Для Ni  $E_b$  уменьшается на ~8%, а для FeCoNi – увеличивается на 12%. Согласно (7), эти изменения  $E_b$  должны приводить к уменьшению эмиссии вторичных ионов на ~25% с поверхности Ni и увеличению на ~30% с поверхности FeCoNi. Эти оценки неплохо согласуются с полученными в данной работе результатами по влиянию магнитного фазового перехода на ВИЭ Ni и FeCoNi.

Существование широкого максимума температурной зависимости тока вторичных ионов  $\text{Ni}^+$ , в отличие от узкого для коэффициента распыления, объясняется в работе следующими причинами. Анализ литературных данных показывает, что имплантация ионов аргона в ГЦК кристалл приводит к формированию в приповерхностном слое ГПУ

решетки. ГПУ фаза никеля является метастабильной и стабилизируется радиационными дефектами и возникающими локальными упругими напряжениями. При увеличении температуры, начиная с  $T=200^{\circ}\text{C}$ , происходит отжиг дефектов и изменяются условия образования ГПУ фазы. При этом в приповерхностном слое содержатся как ГПУ, так и ГЦК фазы никеля. Доля последней будет увеличиваться с ростом температуры, при которой происходит облучение образца. В зависимости от фазового состава приповерхностного слоя значение  $T_c$  изменяется в пределах  $50^{\circ}\text{C}$ . Принимая во внимание эти факты, можно предположить, что магнитный фазовый переход в модифицированном ионной бомбардировкой слое никеля протекает не при постоянной температуре, а в некотором диапазоне температур. Поэтому изменения зависимости  $I^+(T)$  ВИЭ никеля происходят в широком температурном интервале.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии типа первичного пучка на температурную зависимость ВИЭ никеля, которое также связано со свойствами модифицированного ионной бомбардировкой приповерхностного слоя. Как показал РФЭС анализ, внедренные химически активные ионы азота и кислорода, занимая междоузельные положения в кристаллической решетке, образуют химические соединения с атомами никеля: нитриды ( $\text{Ni}_3\text{N}$  и  $\text{Ni}_4\text{N}$ ) и оксид ( $\text{NiO}$ ) никеля, соответственно, магнитные свойства которых отличаются от ферромагнетика никеля.

Оксид никеля является антиферромагнетиком. Таким образом, магнитные свойства приповерхностного слоя, из которого происходит эмиссия вторичных частиц, изменяются при бомбардировки ионами  $\text{O}_2^+$ . Поэтому отсутствие особенностей температурной зависимости ВИЭ никеля, облученного ионами  $\text{O}_2^+$ , обусловлено отсутствием магнитного фазового перехода в приповерхностном слое образца.

Нитрид никеля является парамагнетиком. А наблюдаемые изменения зависимости  $I^+(T)$  в области магнитного фазового перехода, происходящего в объеме образца, связаны с разложением парамагнитного нитрида никеля, которое начинается с  $T=360^{\circ}\text{C}$  и особенно быстро происходит при  $T>420^{\circ}\text{C}$ .

Особенности распыления заряженных частиц при бомбардировке поверхности магнитных материалов ионами химически активных газов имеют практический интерес. Он заключается в том, что бомбардировкой ионами химически активных газов можно изменять магнитные свойства поверхности. Свидетельством этого являются полученные температурные зависимости ВИЭ никеля. Поскольку толщина модифицированного слоя определяется энергией и углом падения ионов, которыми можно легко управлять, то имеется возможность создавать структуры с различными магнитными свойствами заданной толщины, в том числе, нанометрового масштаба.

В пятой главе представлены результаты экспериментального изучения распыления диоксида кремния и кремния ионами инертного аргона и химически активного азота. Результаты предыдущей главы показывают, что облучение поверхности металлов ионами активных газов приводит к формированию в приповерхностном слое химических соединений, которые изменяют свойства поверхности, в том числе эмиссионные. Более детальное исследование состава и структуры модифицированного ионной бомбардировкой слоя и их влияние на распыление изучено при распылении кремния (Si) и диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>).

При распылении диоксида кремния получены следующие значения коэффициентов распыления:  $Y=1.1$  ат/ион как для Si, так и для SiO<sub>2</sub> в случае бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> (угол падения 5° от нормали) и 0.55 и 1.1 ат/ион для Si и SiO<sub>2</sub>, соответственно, при бомбардировке ионами N<sub>2</sub><sup>+</sup>. Коэффициент распыления SiO<sub>2</sub> ионами азота в 1.75 больше коэффициента распыления Si. Если учесть, что энергия связи атомов в SiO<sub>2</sub> почти в два раза больше чем в Si, а плотности атомов в Si и термическом SiO<sub>2</sub> достаточно близки, то объяснить полученные данные в рамках каскадной модели распыления не представляется возможным. В то же время характер угловой зависимости коэффициента распыления (рис.5) как для N<sub>2</sub><sup>+</sup>, так и Ar<sup>+</sup> ионной бомбардировки соответствует каскадному механизму распыления ( $Y \sim \cos^{-n} \theta$ ,  $n \approx 2.3$ ).

С помощью РЭОС установлено, что облучение образцов ионами Ar<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> изменяет состав поверхности SiO<sub>2</sub> до SiO<sub>1.67</sub> и SiO<sub>1.7</sub>N<sub>0.4</sub>, соответственно. Причем он слабо зависит от угла падения пучка. Спектральная линия N1s, полученная с помощью РФЭС представляет собой сумму двух ярко выраженных пиков (рис.6). Первый соответствует связанному азоту в SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> (положение пика ~397 эВ, концентрация ~80%), а второй N-N паре (~402 эВ). Уменьшение концентрации кислорода в приповерхностном слое обусловлено преимущественным распылением более легкой компоненты соединения.

Анализ имеющихся литературных данных показывает, что превышение кремния в его оксиде или нитриде более, чем на 10% от стехиометрического состава, приводит к выделению сверхстехиометрического кремния в отдельную чисто кремниевую фазу. Таким образом, измерения состава поверхности показывают, что модифицированный ионной бомбардировкой слой представляет собой диоксид или оксинитрид (в случае N<sub>2</sub><sup>+</sup> облучения) кремния с включением кластеров кремния и молекулярного азота.

Масс-спектрометрическое исследование остаточной атмосферы вблизи поверхности образца позволило отметить повышение пиков с массой 44 а.е.м. при распылении SiO<sub>2</sub> ионами Ar<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> и 30 а.е.м. в случае бомбардировки пучком ионов N<sub>2</sub><sup>+</sup>.

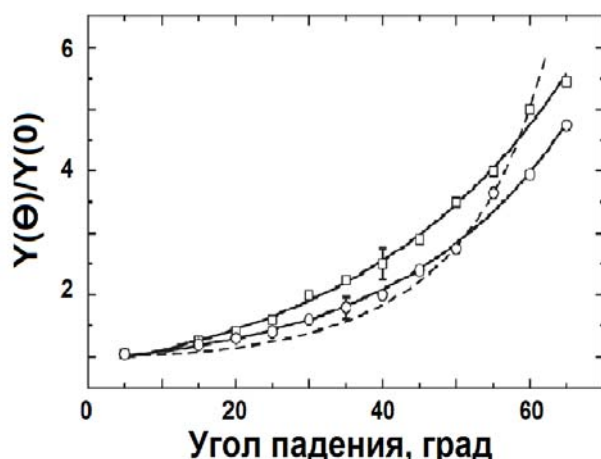


Рис.5 Угловая зависимость коэффициентов распыления  $\text{SiO}_2$  пучком ионов  $\text{Ar}^+$  (—○—) и  $\text{N}_2^+$  (—□—); -----  $Y = \cos^{-2.3} \theta$

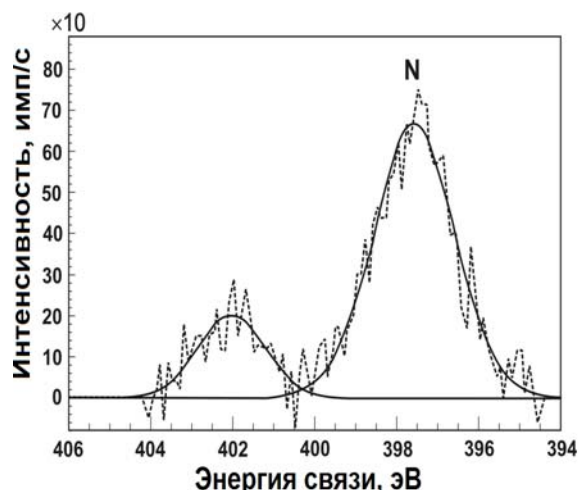


Рис.6. Фотоэлектронная спектральная линия N1s имплантированного в  $\text{SiO}_2$  азота

Специально проведенное исследование позволило идентифицировать эти пики SiO (44 а.е.м.) и NO (30 а.е.м.).

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о наличии, в дополнение к каскадному механизму, химического канала в распылении диоксида кремния ионами азота и аргона. Он заключается в протекании в приповерхностном слое химических реакций, в результате которых происходит образование и последующем высвобождении газовых молекул  $\text{SiO}_{(г)}$  и  $\text{NO}_{(г)}$  (случай  $\text{N}_2^+$  бомбардировки) с энергиями, соответствующими температуре образца. Выполненный термодинамический расчет химического равновесия показал, что наиболее вероятными являются реакции:



Приведенные результаты анализа состава поверхности с помощью оже-электронной и фотоэлектронной спектроскопии указывают на наличие в приповерхностном слое необходимых реагентов для этих реакций – свободного кремния и молекулярного азота.

Обобщение полученных результатов позволило заключить, что механизм распыления диоксида кремния ионами химически активного азота и инертного аргона, включает в себя как физический (каскадный), так и химический механизмы. Наряду с каскадами соударений, в приповерхностном слое происходит образование газовых молекул, которые слабо связаны с поверхностью. Их эмиссия начинается после

установления стационарного режима распыления, т.е. после удаления слоя толщиной, сравнимой с проективным пробегом ионов.

Анализ приповерхностного слоя кремния, распыляемого ионами азота, выполненный методами ВИМС, РЭОС, РФЭС и ИКФС, позволил установить следующие закономерности.

Полученные результаты послойного ВИМС анализа показывают, что при углах падения  $\theta < 40^\circ$  концентрация азота в приповерхностном слое кремния составляет  $n_N = 5.8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и соответствует содержанию азота в стехиометрическом  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Толщина модифицированного слоя, определялась из кривых  $n_N(d)$ , как глубина  $d_N$ , на которой концентрация азота уменьшается в два раза от значения на поверхности. Величина  $d_N$  является функцией энергии ионов  $\text{N}_2^+$  и угла падения. При увеличении угла падения происходит уменьшение толщины модифицированного слоя. При  $\theta > 40^\circ$  изменяется форма профилей  $n_N(d)$ , и концентрация азота в приповерхностном слое становится меньше, чем в стехиометрическом нитриде кремния, что объясняется ростом коэффициента распыления и увеличением его вклада в процесс формирования нитридного слоя (рис. 7).

Исследование угловой зависимости состава поверхности методом РЭОС показало, что при углах падения  $\theta \leq 35^\circ$  состав приповерхностного слоя практически не изменяется и соответствует нитриду кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) с избыточным содержанием азота. Облучение Si пучком ионов  $\text{N}_2^+$  при углах падения  $\theta > 35^\circ$  формирует поверхностный слой с избыточным содержанием кремния (рис.8).

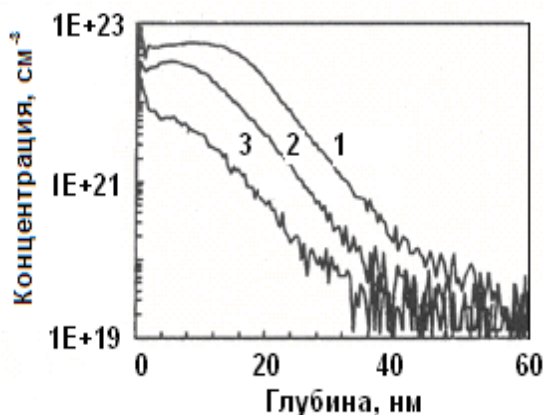


Рис.7. Послойные профили распределения N в приповерхностном слое Si, облученного пучком ионов 9 кэВ  $\text{N}_2^+$  при углах падения  $20^\circ$  (1),  $45^\circ$  (2) и  $70^\circ$  (3).

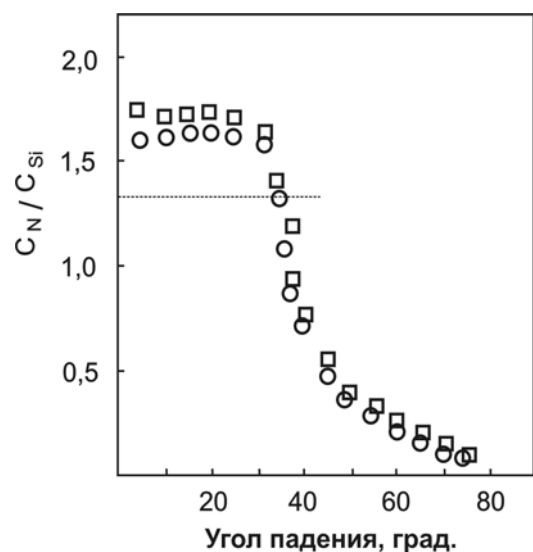


Рис.8. Угловая зависимость состава поверхности Si, облученного ионами  $\text{N}_2^+$  с энергией: O - 1.5 кэВ; □ - 9 кэВ.

Исследования процесса формирования нитридного слоя в кремнии, выполненные с помощью ИКФС, показали, что, начиная с доз  $2 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, в спектрах появляются два слабых пика при  $\nu \sim 1000$  и  $770$  см<sup>-1</sup>, которые соответствуют поглощению молекулы N<sub>2</sub>. С увеличением дозы облучения начинается формирование полосы поглощения с максимумами в области  $820$  см<sup>-1</sup> и  $500$  см<sup>-1</sup>, свидетельствующие об образовании в приповерхностном слое нитрида кремния. При этом увеличиваются амплитуда и площадь полосы поглощения  $820$  см<sup>-1</sup>, что указывает на рост числа Si-N связей. Рост концентрации имплантированного азота сопровождается изменением формы линии. Вплоть до доз  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> при нормальном падении пучка полоса поглощения, соответствующая аморфному нитриду кремния, имеет сложную структуру и включает дополнительные линии поглощения в области  $\nu \sim 1000-900$  см<sup>-1</sup>, которые более выражены в случае бомбардировки поверхности ионами с меньшими энергиями. При увеличении угла падения ионного пучка происходит уменьшение толщины модифицированного слоя и концентрации внедренного азота. Это сопровождается уменьшением амплитуды полосы поглощения и изменением формы линии, которые в случае наклонного падения содержат ярко выраженные особенности при  $\nu \sim 1000-900$  см<sup>-1</sup> (рис.9).

Исходя из механизма ИК поглощения нитрида кремния, можно заключить, что при концентрации азота, меньше значения, необходимого для образования стехиометрического Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, модифицированный слой представляет собой смесь аморфизованного кремния и нитрида кремния. Как видно из рис.9 включения Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

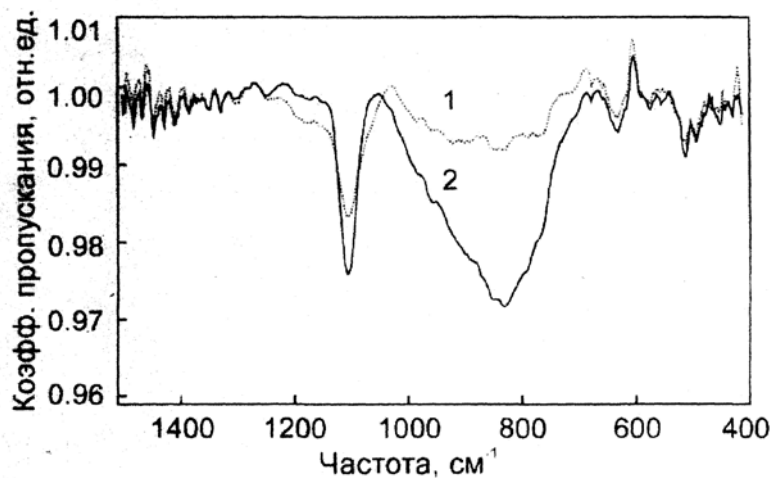


Рис.9. ИК Фурье спектр поглощения кремния, облученного ионами N<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией 9 кэВ при углах падения 20° (1) и 70° (2). Доза облучения  $5 \cdot 10^{17}$  ион·см<sup>-2</sup>.

присутствуют вблизи поверхности при углах падения  $70^\circ$ , когда концентрация азота на порядок меньше, необходимой для формирования стехиометрического нитрида кремния.

Существование нитридной фазы в модифицированном слое кремния при наклонном падении пучка ионов азота ( $\theta=45^\circ$ ) подтверждается также анализом поверхности методом РФЭС. Проведенные измерения показали, что положение пика N1s (396.2 эВ) соответствует положению линии N1s в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Положение и ширина пика Si2p после бомбардировки поверхности ионами  $\text{Ar}^+$  принимают значения 98.5 эВ и 1.7 эВ, соответственно. Облучение образца ионами  $\text{N}_2^+$  приводит к смещению пика Si2p на  $\sim 1$  эВ и уширению до  $\sim 4$  эВ за счет его высокоэнергетичной части. Разложение спектральной линии показывает, что она может быть представлена в виде суммы двух пиков с положениями максимумов 98.5 и 100 эВ, ширина каждого из которых не превышает 2 эВ, с приблизительно равными площадями. Первый из них соответствует химически не связанным атомам Si, а второй – атомам Si в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Таким образом, можно предположить, что при данных условиях бомбардировки, приповерхностный слой представляет собой смесь Si и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

На основании результатов анализа поверхности кремния, облученного ионами азота, можно заключить, что приповерхностный слой построен следующим образом. На глубинах  $d$  от поверхности, где  $n_N$  соответствует стехиометрическому  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , формируется слой аморфного нитрида кремния, который при меньших  $n_N$  переходит в область аморфного кремния с включениями  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . При бомбардировке поверхности при  $\theta \geq 35^\circ$  приповерхностный слой представляется смесью кластеров аморфных Si и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Причем доля кремния увеличивается с ростом угла падения.

Выполненное изучение модифицированного слоя Si, позволило установить и объяснить различия в распылении кремния ионами азота и аргона. Измеренные абсолютные значения коэффициентов распыления Si ионами 9 кэВ  $\text{N}_2^+$  и 4.5 кэВ  $\text{Ar}^+$  при нормальном падении пучков составили  $0.27 \pm 0.03$  атом/N и  $1.2 \pm 0.1$  атом/ион, соответственно. Измерение угловой зависимости коэффициентов распыления  $Y(\theta)$  выявило особенность ее поведения в случае бомбардировки поверхности ионами азота пучком (рис.10). При углах падения  $\theta \geq 30^\circ$  наблюдается резкий рост коэффициента распыления. Увеличение  $Y$  при изменении  $\theta$  от 0 до  $60^\circ$  почти в два раза превышает аналогичное возрастание коэффициента распыления при бомбардировке кремния пучком аргона. Распыление Si ионами  $\text{Ar}^+$  приводит к зависимости  $Y(\theta) \sim \cos^{-n} \theta$ , ( $n \approx 2$ ). Такой ход зависимости  $Y(\theta)$  описывается каскадным механизмом распыления [2] и



объясняет рост  $Y$  при увеличении  $\theta$  ростом плотности энергии, выделяемой ионным пучком вблизи поверхности.

Установленное строение модифицированного бомбардировкой ионами азота слоя кремния позволило объяснить аномальный рост коэффициента распыления при увеличении угла падения. Согласно [2], коэффициент распыления  $Y \sim E_b^{-1}$ , где  $E_b$  – энергия связи атомов на поверхности. При бомбардировке поверхности Si инертными ионами значение  $E_b$  остается неизменным при всех углах падения ионов. Поэтому поведение  $Y(\theta)$  определяется каскадным механизмом и  $Y(\theta) \sim \cos^{-n} \theta$ .

Облучение кремния ионами азота изменяет состав приповерхностного слоя от  $\text{Si}_3\text{N}_4$  до Si при росте  $\theta$  от 0 до  $70^\circ$ . Химический состав слоя, сформированного ионной

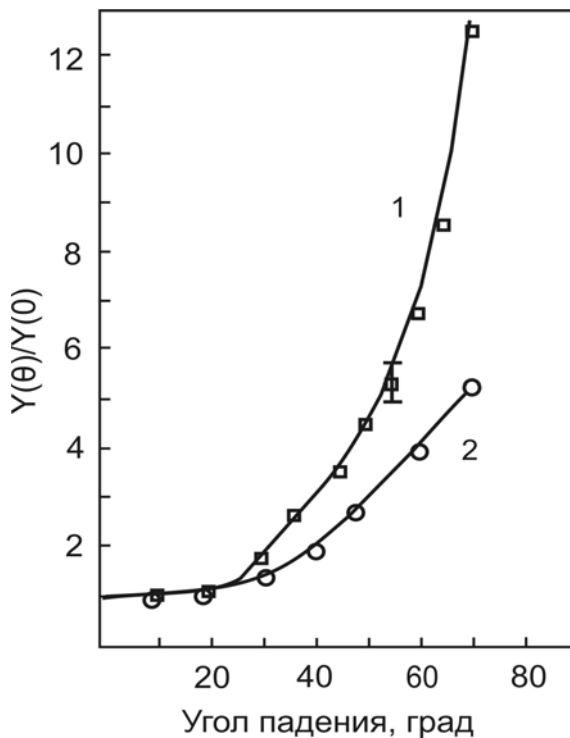


Рис.10. Угловая зависимость коэффициента распыления Si ионами  $\text{N}_2^+$  (1) и  $\text{Ag}^+$  (2) с энергиями 9 и 4,5 кэВ, соответственно.

бомбардировкой при различных углах падения ионов, определяет значение средней энергии связи  $E_{bcp}$ . Ее можно представить в виде суммы:  $E_{bcp} = E_b(\text{Si}) \cdot f_{\text{Si}} + E_b(\text{Si}_3\text{N}_4) \cdot f_c$ , где  $E_b(\text{Si})$  и  $f_{\text{Si}}$  – энергия связи атомов Si и его доля в приповерхностном слое, а  $E_b(\text{Si}_3\text{N}_4)$  и  $f_c$  – энергия связи соединения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и его содержание в слое. Известно, что азот формирует в кремнии связи Si-N, более прочные, чем связи Si-Si (энергии разрыва этих связей составляют 3.7 и 2.4 эВ, соответственно). Анализ литературных

данных показал, что энергия связи атомов на поверхности  $\text{Si}_3\text{N}_4$  почти в два раза превышает  $E_b$  для Si. При достижении стационарного режима распыления, каждый

распыленный имплантированный атом азота замещается падающим, и состав модифицированного слоя при дальнейшей бомбардировке остается неизменным. В этом случае распыление Si с  $E_b(\text{Si})$  химически активными ионами  $\text{N}_2^+$  можно рассматривать как распыление приповерхностного слоя со средней энергией связи  $E_{bcp}$  пучком “инертных” ионов  $\text{N}_2^+$ . Тогда полученная угловая зависимость коэффициента распыления кремния азотом может быть объяснена участием в распылении двух механизмов: каскадного и химического. Последний заключается в

изменении энергии связи  $E_{bav}$  от значений  $E_b(Si_3N_4)$  (при углах падения  $\theta < 35^\circ$ ), до значений  $E_b(Si)$  (при  $\theta > 60^\circ$ ). Поскольку коэффициент распыления инертными ионами  $Y \sim E_b^{-1}$ , рост зависимости  $Y(\theta)$  при  $\theta > 35^\circ$  происходит как за счет увеличения энергии, выделяющейся вблизи поверхности ( $\sim \cos^{-n} \theta$ ), так и вследствие уменьшения  $E_{bav}$ .

**В шестой главе** предложена модель формирования волнообразного рельефа (ВР) на поверхности кремния при ионной бомбардировке.

ВР образуется на поверхности проводников, полупроводников и диэлектриков при облучении ионами как инертных, так и химически активных газов. Наиболее подробно экспериментально изучен процесс зарождения и развития ВР на поверхности кремния. Установлено, что ВР рельеф образуется в определенном диапазоне углов падения ионов, ширина которого определяется энергией и типом первичного пучка. Эти же параметры определяют длину волны рельефа ( $\lambda$ ) и глубину ( $d$ ), на которой происходит зарождение ВР. Следует отметить, что значения этих величин характерны для каждого набора экспериментальных условий (тип первичных ионов, их энергия и угол падения). Экспериментально установлено, что глубина  $d$  (или доза облучения  $D$ ) является наименьшей при использовании ионов азота. Она на порядок меньше, чем при облучении Si ионами  $O_2^+$ , и на два порядка меньше, чем при использовании ионов  $Ar^+$ . Механизм формирования ВР до сих пор не совсем понятен.

Детерминистская теория эрозии [4], основанная на зависимости скорости распыления от локального угла падения, описывает эволюцию поверхности гиперболическим уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{J}{\rho} \cos^2 \theta \frac{\partial}{\partial \theta} [Y(\theta_0 - \theta) \cos(\theta_0 - \theta)] \frac{\partial \theta}{\partial x}; \quad \frac{\partial}{\partial x} z(x, t) = \operatorname{tg} \theta(x, t), \quad (8)$$

где  $J$  - плотность потока ионов,  $Y(\theta_0 - \theta)$  - коэффициент распыления,  $\rho$  - плотность атомов решетки,  $\theta_0$  - угол бомбардировки,  $\theta$  - угол между осью Z и нормалью к поверхности.

Уравнение (8) применимо только до тех пор, пока можно пренебречь тем обстоятельством, что точки внедрения первичного и эмиссии вторичного ионов пространственно разделены, а локальные углы  $\theta(x)$  в этих точках могут быть различны. Решения уравнения (8) различными авторами (в том числе выполненное в данной работе методом характеристик) показывают, что развитие исходного рельефа на поверхности возможно, если его масштаб превосходит один микрон. ВР субмикронного масштаба, который наблюдается в экспериментах, сглаживается.

Для объяснения зарождения и развития ВР уравнение (8) дополняется производными более высокого порядка, которые описывают поверхностную диффузию атомов, поверхностное натяжения и другие явления.

В данной работе предложена модель, в которой исходный рельеф представляет собой сумму рельефа микронного масштаба, на который накладывается рельеф нанометрового масштаба. Она построена в рамках теории распыления [2] с учетом геометрических факторов, которые учитывают зависимость коэффициента распыления  $Y$  от локального угла падения  $\theta$  и продольной координаты  $x$ , лежащей в плоскости падения первичного иона (рис.11).

В результате такого подхода получается уравнение, содержащее два слагаемых:

$$\tilde{z} \frac{\partial \bar{z}}{\partial t} = -\frac{J \cos(\Theta_0 - \bar{\Theta})}{\rho \cos \bar{\Theta}} Y(\Theta_0 - \bar{\Theta}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tilde{z}}{\partial t} = -\frac{J}{\rho} Y(\Theta_0 - \bar{\Theta}) \left( \frac{\beta}{l} - \frac{\alpha}{l \cos(\Theta_0 - \bar{\Theta})} \right) \left[ \frac{l_x}{\beta - \alpha / \cos(\Theta_0 - \bar{\Theta})} \times \right. \\ \left. \times \frac{\partial}{\partial x} \tilde{z}(x - l_x) - \tilde{z}(x) + \tilde{z}(x - l_x) \right] \quad (10)$$

Здесь  $\bar{z}$  и  $\tilde{z}$  вертикальные размеры микроскопического и нанометрового рельефов, соответственно.

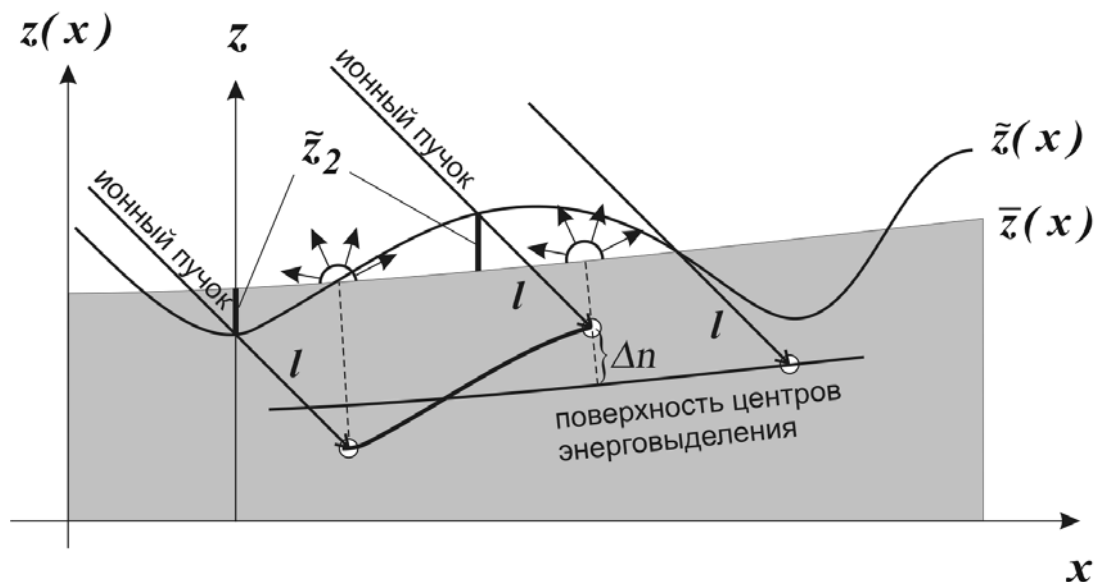


Рис.11. Влияние субмикронной топографии  $\tilde{z}_2$  в точке внедрения первичного иона  $x - l_x$  на коэффициент распыления в точке  $x$  в рамках каскадного механизма распыления [2].

Уравнения (9) и (10) представляют математическую модель эволюцию поверхностной топографии при ионном распылении поверхности. Уравнение (10) принадлежит к классу уравнений с отклоняющимся аргументом. В рамках данной модели развитие поверхностной топографии происходит только благодаря нелокальной связи скорости понижения поверхности с ее рельефом, определяемой параметром  $l_x$ . При  $l_x = 0$  (10) преобразуется в  $\partial \tilde{z} / \partial t = 0$ , означающее прекращение какой-либо эволюции субмикронной поверхностной топографии.

Предложенный подход к моделированию эрозии поверхности твердых тел при ионной бомбардировке приводит к известной детерминистской модели (9), дополненной уравнением с отклоняющимся аргументом, имеющим волновое решение и описывающим эрозию топографии субмикронного масштаба.

В работе приведен анализ решения уравнения (10). Показано, что наличие неоднородностей имеющих размер более 30 нм приводит к зарождению волнообразного рельефа.

Экспериментальным подтверждением выводов, вытекающих из предложенной модели, являются результаты изучения влияния созданной на поверхности исходной топографии на скорость зарождения ВР. Установлено, что неоднородности, созданные на поверхности Si различными способами, значительно уменьшают глубину зарождения ВР при облучении Si ионами азота.

**Седьмая глава** посвящена исследованию возможностей ионного распыления для получения поверхностных слоев с заданными свойствами.

Были проведены эксперименты по изучению ионно-стимулированного перемешивания на границе пленка подложка. В качестве исходных образцов использовались пленки Ni толщиной 80, 120 и 200 нм на Al. Распыление образцов ионами 80 кэВ  $Ag^+$  производилось при температурах мишеней от 20 до 370°C. Анализ образцов *in situ* методом РОР показал, что нагрев образцов до 380°C не приводит к заметной диффузии атомов пленки и подложки и к образованию интерметаллических соединений.

На рис.12 представлены данные о составе приповерхностного слоя, полученные из концентрационных профилей, для пленок Ni толщиной 80 и 200 нм, подвергнутых ионной бомбардировке при различных температурах. Видно, что облучение образцов при  $T < 300^\circ\text{C}$  не приводит к заметной взаимной диффузии атомов пленки и подложки. При  $T \geq 300^\circ\text{C}$  в приповерхностном слое наблюдаются концентрации, соответствующие фазам  $\alpha'$  ( $Ni_3Al$ ) и  $\beta'$  ( $NiAl$ ), как для пленок толщиной 80 нм, так и для пленок с толщиной 200 нм.

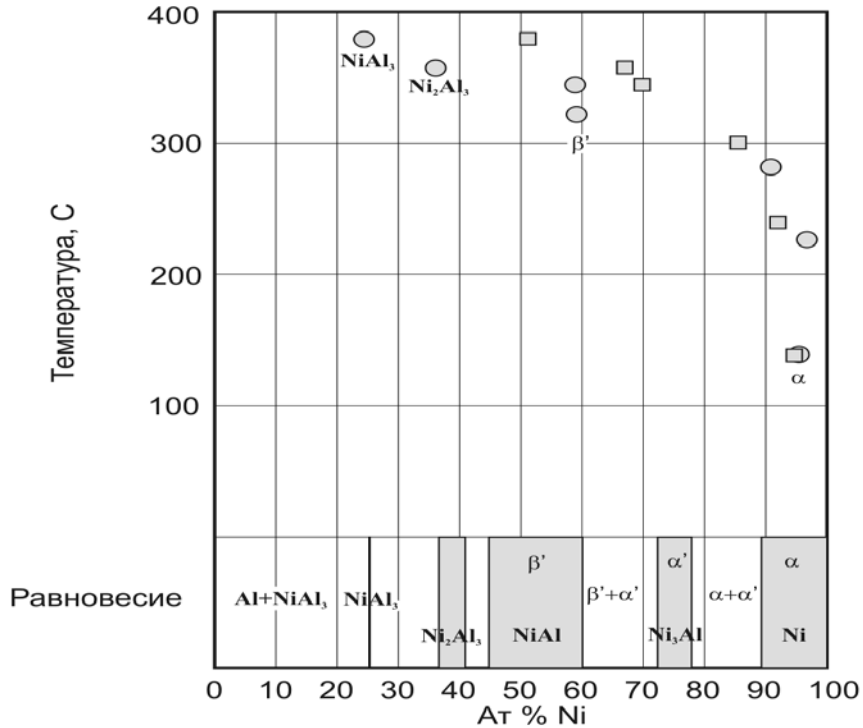


Рис.12. Фазовый состав интерметаллических соединений, сформированный вблизи границы пленка-подложка ионной бомбардировкой при различных температурах облучения. ( О - толщина пленки 80 нм; □ - толщина пленки 200 нм ).

Облучение пленок при температурах 360 и 370°C приводит к формированию практически однородных слоев, состав которых отвечает фазам Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> и NiAl<sub>3</sub>, соответственно.

Следует отметить, что проективный пробег ионов Ag<sup>+</sup> с энергией 80 кэВ в никеле составляет около 50 нм и с учетом распыления ионы будут достигать границы пленка – подложка при дозах близких к 10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup> для пленок толщиной 80 нм. Характер температурной зависимости количества Al, оказавшегося в слое Ni, для таких образцов предполагает участие механизма радиационно–стимулированной диффузии (РСД) в ионном перемешивании. Определенные значения критической температуры для РСД и энергия активации по результатам составляют ~230°C и 0.6 эВ, что неплохо согласуется с литературными данными ранее выполненных работ. Таким образом, в работе показана возможность получения интерметаллических слоев с заданным составом подбором параметров ионной бомбардировки, толщины пленки и температуры образца.

Кроме того, разработана методика изготовления упрочняющих покрытий на основе бинарных и тройных соединений нитридов металлов (Ti, Cr) с применением ионного ассистирования. Получены и исследованы покрытия из TiN, CrN, Cr<sub>2</sub>N, (Ti<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>)N. Проведен анализ химического и фазового состава пленок, их структуры и микротвердости

от условий ионной бомбардировки и осаждения. Установлено, что большинство полученных пленок имеет, в основном, кубическую решетку с преимущественным выходом грани (111) на поверхность. Показано, что при повышенной плотности тока ассистирующего пучка ионов азота возможно изготовление плотных покрытий  $\text{CrN}$  стехиометрического состава с микротвердостью, достигающей 30 ГПа. Максимальная микротвердость трехкомпонентного покрытия, составляющая более 30 ГПа, наблюдалась для пленок с  $x=0.7$ , которые представляют собой твердый раствор на основе  $(\text{TiCr}_2)\text{N}$ .

**В Заключение** приведены основные выводы работы.

1. Созданы две экспериментальные установки для исследования

- процессов распыления твердых тел ионами инертных и химически активных газов низких энергий методом масс-спектрометрии вторичных ионов, нейтральных распыленных частиц и десорбированных с поверхности образца при ионной бомбардировке;

- процессов распыления и ионного перемешивания с анализом *in situ* образцов методом Резерфордского обратного рассеяния.

2. Установлено увеличение примерно в 1,5 раза коэффициента распыления монокристалла кобальта при ГПУ→ГЦК перестройке кристаллической решетки. Изменение распыления  $\text{Co}$  при полиморфном превращении объяснено уменьшением прозрачности кристалла в ГЦК фазе, что подтверждается хорошим совпадением экспериментально полученных результатов с оценками, выполненными в рамках имеющейся теории распыления.

3. Обнаружено возрастание коэффициента распыления гадолиния при переходе гадолиния из ферро- в парамагнитное состояние. Величина изменения составляет ~15% и слабо зависит от типа первичных ионов инертных газов. В окрестности точки Кюри температурная зависимость коэффициента распыления имеет острый максимум, который почти в два раза превышает коэффициент распыления в парамагнитном состоянии.

4. Предложено объяснение изменения коэффициента распыления при магнитном превращении, связанное с увеличением потенциала взаимодействия и, как следствие, энергии связи атомов на поверхности в ферромагнитном состоянии. Приведены количественные оценки возможного изменения энергии связи, основанные на расчете изменения межатомного потенциала взаимодействия при переходе  $\text{Gd}$  из ферро- в парамагнитное состояние, которые хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами.

5. Обнаружено, что при облучении образцов ионами инертных газов выход вторичных ионов уменьшается на ~40% при полиморфном  $\alpha \rightarrow \beta$  превращении в поликристаллическом кобальте и переходе моно- и поликристаллического никеля из ферро- в парамагнитное состояния. В то же время, такое превращение в FeCoNi сплаве сопровождается увеличением ВИЭ на ~50%. Знаки изменения эмиссии вторичных ионов противоположны изменению коэффициентов распыления этих образцов в области фазовых переходов.

6. Анализ полученных и имеющихся экспериментальных данных и существующих моделей образования ВИЭ дает основание заключить, что существенную роль в поведении температурной зависимости ВИЭ в области фазовых переходов играют изменения энергии связи атомов на поверхности  $E_b$  при таких превращениях. Оценки, выполненные в рамках моделей, включающих эту величину в явном виде, хорошо согласуются с полученными результатами по изменению ВИЭ при магнитном фазовом переходе.

7. Установлено, что облучение поверхности никеля ионами химически активных газов кислорода и азота существенным образом изменяет характер поведения температурной зависимости ВИЭ  $I^+(T)$  в области магнитного фазового превращения. В этом случае исчезают особенности выхода вторичных ионов в окрестности точки Кюри. Полученные результаты позволяют, во-первых, рассматривать вторичную ионную эмиссию в качестве метода исследования магнитного состояния поверхности образцов при их облучении ионами инертных газов. Во-вторых, дают возможность использовать бомбардировку магнетиков ионами химически активных газов для изменения магнитных свойств приповерхностного слоя (толщина которого определяется энергией и углом падения ионов).

8. Показано, что в распылении диоксида кремния ионами аргона и азота, наряду с каскадным механизмом, принимает участие химический механизм распыления, который заключается в образовании и десорбции газовых молекул SiO и NO. Это приводит к тому, что скорость распыления SiO<sub>2</sub> ионами Ar<sup>+</sup> практически такая же, как скорость распыления Si, а ионами N<sub>2</sub><sup>+</sup> почти в два раза выше. При этом энергия связи атомов на поверхности Si почти в два раза выше по сравнению с SiO<sub>2</sub>.

9. Исследования состава приповерхностного слоя, выполненные различными методами анализа поверхности, показали, что бомбардировка кремния ионами азота приводит к формированию вблизи поверхности слоя сплошного нитрида кремния при углах падения  $\theta < 35^\circ$ . При больших углах падения приповерхностный слой представляет собой смесь аморфного Si и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

10. Обнаружено существенное различие в поведении угловой зависимости коэффициентов распыления кремния ионами аргона и азота. Показано, что это различие обусловлено изменением энергии связи атомов на поверхности при увеличении  $\theta$  в случае бомбардировки поверхности пучком ионов  $N_2^+$ , что и приводит к значительно более быстрому росту коэффициента распыления Si ионами  $N_2^+$ , чем ионами  $Ar^+$ .

11. Предложена модель эрозии поверхности, которая объясняет образование волнообразного рельефа при наличии на ней топографических неоднородностей субмикронного масштаба. В основе модели лежит учет зависимости коэффициента распыления не только от локального угла падения ионов, но и от продольной координаты на поверхности в плоскости падения пучка. Результат моделирования подтвержден экспериментально при изучении процесса зарождения волнообразного рельефа на исходной поверхности, имеющей топографические неоднородности.

12. Показано, что облучение поверхности ионами инертных и химически активных газов позволяет получать защитные покрытия с заданным составом и свойствами. Бомбардировка пленок металлов ионами инертных газов при повышенных температурах дает возможность получения интерметаллических покрытий, состоящих из материалов пленки и подложки. При этом состав покрытия определяется толщиной пленки, дозой облучения и температурой, а его толщина может значительно превосходить проективный пробег ионов.

Бомбардировка напыляемых металлических пленок ионами азота низкой энергии дает возможность получать нитридные тройные и двойные покрытия на основе титана и хрома с высокими значениями микротвердости и коррозионной износостойкостью.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Бачурин В.И., Журавский В.Е., Харламочкин Е.С., Юрасова В.Е. Распыление гадолиния в ферромагнитном и парамагнитном состоянии. – Письма в ЖТФ, 1981, т.7, с. 730-733.
2. Bachurin V.I., Kharlamochkin E.S., Kuvakin M.V., Yurasova V.E. Temperature dependence of the sputtering of gadolinium in magnetic phase transition. – In: Phenomena in ionized gases: Contr. Papers XVI ICPIG, Minsk, 1981, v.1, p. 465-466.
3. Кувакин М.В., Харламочкин Е.С., Бачурин В.И. Изменение межатомного потенциала взаимодействия в гадолинии при магнитном фазовом переходе. – Поверхность, 1982, т.1, с. 89-92.
4. Бандурин Ю.А., Бачурин В.И., Дробнич В.Г., Поп С.С., Черныш В.С., Юрасова В.Е. Ионно-фотонная эмиссия кобальта при полиморфном превращении. - Письма в ЖТФ, 1982, т.8, вып.12, с. 760-763.



5. Bandurin Y.A., Bachurin V.I., Drobnych V.G., Pop S.S., Chernysh V.S., Yurasova V.E. Ion-photon emission of Co during polymorphic transition. - Proceeding of X Vacuum Congress, Madrid, 1983, p. 73 -74.
6. Бачурин В.И., Черныш В.С., Ширков А.В., Шмелев А.Ю. Температурная зависимость вторичной ионной эмиссии никеля, кобальта, инвара. – Поверхность, 1982, т.1, с. 70-75.
7. Бачурин В.И., Левин В.Л., Мордвинцев В.М., Симакин С.Г., Смирнов В.К. Исследование слоистых магнитных пленок методом ВИМС и ЭОС. - Тез. докл. Всесоюз. семинара “Диагностика поверхности ионными пучками”, Одесса, 1990, с.153-154.
8. Бачурин В.И., Гаврилов Э.Л., Никитин А.М. Установка для исследования распыленных частиц методом масс-спектрометрии. - Матер. 11 Межд. конф. ВИП, Москва, 1993, т.1, с.153-155.
9. Бачурин В.И., Никитин А.М., Самойлов В.Н., Татур А.Э., Ястржембский В.И., Исследование поверхностного механизма преимущественного распыления двухкомпонентных мишеней. - Матер. 11 Межд. конф. ВИП, Москва, 1993, т.1, с.134-136.
10. Бачурин В.И., Никитин А.М., Самойлов В.Н., Татур А.Э., Ястржембский В.И., Исследование поверхностного механизма преимущественного распыления двухкомпонентных мишеней. - Известия РАН, сер. физ., 1994, т.58, с.102-104.
11. Бачурин В.И., Кривелевич С.А., Фаррел Дж., Юрасова В.Е. Ионно-стимулированные процессы в пленках Ni на Al в области температур, включающей точку Кюри. - Матер. 12 Межд. конф. ВИП, Москва 1995, т.1, с.18-21.
12. Colligon J.S., Farrel G., Bachurin V.I., Yurasova V.E. RBS/Ion implanter facility for in-situ ion-surface studies. – Radiat. Eff., 1996, v. 138, p. 195-202.
13. Бачурин В.И., Лепшин П.А., Смирнов В.К., Чурилов А.Б. Исследование процесса формирования нитрида кремния при бомбардировке поверхности ионами азота. - Матер. 13 Межд. конф. ВИП, Москва 1997, т.2, с. 317 – 319.
14. Бачурин В.И., Лепшин П.А., Смирнов В.К., Чурилов А.Б. Исследование процесса формирования нитрида кремния при бомбардировке поверхности ионами азота. - Известия РАН, сер. физ., 1998, т.62, с.703 -709.
15. Бачурин В.И., Лепшин П.А., Смирнов В.К., Чурилов А.Б. Инфракрасная спектроскопия поверхности кремния, подвергнутого бомбардировке ионами азота. - Письма в ЖТФ, 1998, т.24, с.16 – 23.
16. Bachurin V.I., Churilov A.B., Potapov E.V., Smirnov V.K., Makarov V.V., Danilin A.B. Formation of thin silicon nitride layers on Si by low energy N<sub>2</sub><sup>+</sup> ion bombardment.- NIMB, 1999, v. 147, p.316 – 319.

17. Смирнов В.К., Бачурин В.И., Лепшин П.А., Потапов Е.В., Чурилов А.Б. Исследование приповерхностного слоя в кремнии, облученном ионами низких энергий. - Труды VIII Межнац. совещ. "Радиационная физика твердого тела", Москва, 1998, с. 126–130.
18. Бачурин В.И., Потапов Е.В., Смирнов В.К., Чурилов А.Б. Формирование тонких нитридных пленок облучением поверхности кремния низкоэнергетичными ионами азота. - Тез. докл. Всеросс. конф. "Микро- и нанoeлектроника", Москва, 1998, с. Р 1-38.
19. Смирнов В.К., Лепшин П.А., Бачурин В.И., Кибалов Д.С., Потапов Е.В., Данилин А.Б. Геометрия и внутреннее строение индивидуальной волны волнообразного микрорельефа на поверхности кремния. – Тез. докл. Всеросс. научно-техн. конф. "Микро- и нанoeлектроника 98", Москва, 1998, Р 3-28.
20. Бачурин В.И., Лепшин П.А., Смирнов В.К. Угловые зависимости распыления кремния ионами азота. - Матер. 14 Межд. конф. ВИП, Москва 1999, т.1, с.62-65.
21. Смирнов В.К., Кибалов Д.С., Лепшин П.А., Бачурин В.И. Влияние топографических неоднородностей на процесс образования волнообразного микрорельефа на поверхности кремния. – Матер. 14 Межд. конф. ВИП, Москва 1999, т.1, с.70-73.
22. Смирнов В.К., Кибалов Д.С., Лепшин П.А., Бачурин В.И. Влияние топографических неоднородностей на процесс образования волнообразного микрорельефа на поверхности кремния. – Известия РАН, сер. физ., 2000, т. 64, с. 626-631.
23. Bachurin V.I., P.A.Lepshin, Smirnov V.K. Angular dependences of surface composition, sputtering and ripple formation on silicon under  $N_2^+$  ion bombardment. - Vacuum, 2000, v. 56, p.241 – 245.
24. Бачурин В.И., Смирнов В.К. Исследование распыления диоксида кремния ионами азота и аргона. - Матер. 15 Межд. конф. ВИП, Москва, 2001, т.1, с. 93 - 96.
25. Биркган С.Е., Бачурин В.И., Рудый А.С., Смирнов В.К. Моделирование развития поверхностной топографии кремния при ионном распылении. - Матер. 15 Межд. конф. ВИП, Москва, 2001, т.1, с.97-100.
26. Биркган С.Е., Рудый А.С., Смирнов В.К., Бачурин В.И. Моделирование нестационарного распыления твердых тел. - Матер. 16 Межд. конф. ВИП, Москва, 2003, 2003, с. 69-72.
27. Бачурин В.И., Миннебаев К.Ф., Насретдинов А.А. Температурная зависимость вторичной ионной эмиссии никеля. - Матер. 16 Межд. конф. ВИП, Москва, 2003, т.1, с. 339-342.
28. Кривелевич С.А., Цырулев А.А., Бачурин В.И. Моделирование ионного синтеза скрытых диэлектрических слоев. - Матер. 16 Межд. конф. ВИП. Т.2. – Москва, 2003. - С. 94-97.

29. Birkgan S.E., Bachurin V.I., Rudy A.S., Smirnov V.K. Modelling of surface topography development during ion sputtering of solids. - *Rad. Eff. & Defects in Solids*, 2004, v.159, p. 163-172.
30. Бачурин В.И., Миннебаев К.Ф., Насретдинов А.А. Температурная зависимость вторичной ионной эмиссии никеля. - *Известия РАН, сер. физ.* 2004, т.68, с.390 – 392.
31. Кривелевич С.А.,Цырулев А.А., Бачурин В.И. Моделирование ионного синтеза скрытых диэлектрических слоев. - *Поверхность*, 2004, N5, с. 40-43.
32. Бачурин В.И., Вишняков В.М., Коллигон Д.С., Миннебаев К.Ф., Юрасова В.Е. Упрочняющие покрытия на основе тройных соединений. – *Поверхность*, 2005, №4, с. 106-110.
33. Бачурин В.И, Кривелевич С.А. Ионно-индуцированное фазообразование в системе Al-Ni. - *Матер. 17 Межд. конф. ВИП. Т.1.* – Москва, 2005, с.91-94.
34. Кривелевич С.А., Бачурин В.И., Бучин Э.Ю.,Денисенко Ю.И.,Селюков Р.В. Ионный синтез скрытых изолирующих силикатных слоев. - *Матер. 17 Межд. конф. ВИП. Т.2.* – Москва, 2005, с.175-178.
35. Vishnyakov V.M., Bachurin V.I., Minnebaev K.F., Valizadeh R., Teer D.G., Colligon J.S., Vishnyakov V.V., Yurasova V.E. Ion assisted deposition of titanium chromium nitride. – *Thin Solid Films*, 2006, v. 497, p.189-195.
36. Rudy A.S., Bachurin V.I., Smirnov V.K. Nanoscale model of surface erosion by ion bombardment. - *Rad. Eff. & Defects in Solids*, 2006, v. 161, p. 319-329.
37. Кривелевич С.А., Бачурин В.И., Бучин Э.Ю., Денисенко Ю.И., Селюков Р.В. Ионный синтез скрытых изолирующих силикатных слоев. – *Поверхность*, 2006, т. 70, с. 883-885.
38. Бачурин В.И., Кривелевич С.А., Потапов Е.В., Чурилов А.Б. Изучение взаимодействия ионов аргона и азота с поверхностью диоксида кремния. - *Поверхность*, 2007, №3, с. 19-23.

#### **Цитируемая литература**

1. Onderdelinden D. Single crystal sputtering including the channeling phenomenon. – *Can. J. Phys.*, 1968, v.46, p. 739-745.
2. Sigmund P. Collision theory of displacement damage, ion range and sputtering. – *Rev. Roum. Phys.*, 1972, v. 17, p. 823-1105.
3. Schroerer J.M., Rhodin T.N., Bradley R.C. A quantum mechanical model for ionization and excitation of atoms during sputtering. – *Surf. Sci.*, 1973, v. 34, p. 571-580.
4. Carter G. The physics and application of ion beam erosion. – *J. Phys. D: Appl.Phys.*, 2001, v. 34, p. R1-R22.