

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

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

На правах рукописи

Патракеев Андрей Станиславович

УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ОДНО- И
ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность: 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2006 г.

Работа выполнена в Лаборатории взаимодействия ионов с веществом Отдела физики атомного ядра НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук
Черныш Владимир Савельевич
(физический факультет МГУ)

доктор физико-математических наук
Шульга Владимир Иванович
(НИИЯФ МГУ)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Курнаев Валерий Александрович (МИФИ)

доктор физико-математических наук
Афанасьев Виктор Петрович (МЭИ)

Ведущая организация: ГОУВПО «МАТИ» - Российский
Государственный Технологический
Университет имени К.Э. Циолковского

Защита диссертации состоится « 23 » марта 2006 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета К 501.001.06 в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Адрес: 119992, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, 19 корпус, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 22 » февраля 2006 г.

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

Чуманова О.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Изучение угловых распределений атомов, распылённых ионами с энергией $E_0 = 1-10$ кэВ, представляет большой интерес для теории распыления и многочисленных приложений. Этот диапазон энергий лежит между припороговой областью, в которой основным механизмом распыления является первичное выбивание, т.е. распыление поверхностных атомов за счет удара непосредственно бомбардирующими ионами, и областью высоких энергий, где преобладает распыление за счёт каскада атомных столкновений. В кристаллических материалах возможны механизмы распыления, обусловленные упорядоченным расположением атомов мишени. Указанные механизмы распыления действуют, как правило, одновременно, конкурируя друг с другом, и отделить их один от другого в условиях эксперимента крайне сложно.

Линейная каскадная теория распыления Зигмунда, предполагающая изотропный каскад атомных столкновений в бесконечной неупорядоченной среде, предсказывает угловое распределение распылённых атомов по закону косинуса с максимумом эмиссии в направлении нормали к поверхности: $Y \sim \cos\theta$, где θ – угол эмиссии. Однако многочисленные экспериментальные исследования и расчеты, выполненные методом компьютерного моделирования, показали, что угловое распределение распыленных атомов зависит от параметров пучка и сорта мишени и может сильно отличаться от косинусного. С учётом этого был предложен ряд поправок к теории, но вопрос о природе углового распределения распыленных атомов оказался настолько сложным, что предпринятых усилий оказалось явно недостаточно.

Большой интерес в этой связи представляет изучение распыления кремния и германия, которые, как известно, становятся аморфными уже на начальной стадии ионного облучения. Это позволяет исключить из рассмотрения механизмы, связанные с упорядоченным расположением атомов, и изучать роль

механизмов первичного выбивания и каскадного распыления. Следует, однако, отметить, что первые эксперименты по распылению кремния и германия ионами аргона в интервале энергий 1-10 кэВ дали противоречивые результаты: авторами были получены как надкосинусные ($Y \sim \cos^n \theta$, $n > 1$), так и подкосинусные ($n < 1$) угловые распределения. В связи с этим возникла необходимость проведения новых экспериментальных и компьютерных исследований в этой области.

Дополнительную информацию о механизмах формирования углового распределения эмитированных частиц можно получить при изучении распыления двухкомпонентных мишеней. Уже первые исследования в этой области обнаружили нестехиометричный выход компонентов по углу эмиссии. Теоретически было показано, что на формирование потока атомов существенное влияние должен оказывать градиент концентрации компонентов в двух верхних слоях мишени. Была также высказана идея о существенном влиянии радиационно-стимулированной сегрегации Гиббса (РССГ), что позднее было подтверждено экспериментально. Однако все последующие экспериментальные исследования угловых распределений были посвящены изучению влияния соотношений масс и энергий связи компонентов. При этом роль такого важного параметра как концентрация компонентов не была изучена.

Еще в середине 70-х годов прошлого века было обнаружено, что при бомбардировке кремния ионами, падающими под углом к нормали, на его поверхности образуются волнообразные структуры нанометрового диапазона (нановолны). При этом ожидалось, что при нормальном падении пучка на поверхности будут формироваться квантовые точки (нанохолмы). Большой интерес к такого рода структурам определяется их важной ролью в создании новых оптоэлектронных и квантовых устройств. Однако лишь несколько лет назад была опубликована работа, в которой упорядоченный нанорельеф был обнаружен при облучении поверхности (001) Si ионами Ar^+ с энергией порядка 1 кэВ. В связи с этим представляло интерес изучить влияние параметров

ионного облучения на характеристики нанорельефа кремния и германия при более высоких энергиях ионов.

Решению указанных задач и посвящена настоящая диссертация.

Целью диссертационной работы является:

1. Экспериментальное и компьютерное исследование угловых распределений частиц при распылении аморфных Si и Ge ионами Ar^+ с энергией 1-10 кэВ.
2. Исследование влияния концентрации атомов на угловые распределения компонентов при распылении Ni-Pd сплавов.
3. Анализ роли различных механизмов в формировании потока вещества при распылении одно- и двухкомпонентных мишеней.
4. Изучение процесса формирования рельефа поверхности при ионном облучении Si и Ge.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены новые экспериментальные и расчетные данные об угловых распределениях атомов при распылении аморфных Si и Ge. Выявлены факторы, определяющие форму этих распределений.
2. Впервые изучено влияние концентрации компонентов на угловые распределения атомов при распылении Ni-Pd сплавов.
3. Предложена новая методика анализа угловых распределений распылённых компонентов, позволяющая определить послойный вклад атомов мишени в поток распылённого вещества.
4. Изучено образование нанорельефа на поверхности Si и Ge при нормальном падении ионов Ar^+ с энергией 10 кэВ.

Научная и практическая ценность.

1. Результаты исследований угловых распределений частиц при распылении аморфных Si и Ge важны для дальнейшего развития теории распыления, а также позволяют увеличить эффективность методов анализа состава материалов, содержащих кремний и германий (вторично-ионная масс-спектрометрия, масс-спектрометрия распылённых нейтралей и др.).

2. Обнаруженное изменение относительного выхода компонентов при облучении двухкомпонентных сплавов Ni_xPd_y показало необходимость учёта концентрации составляющих атомов для развития количественных методов определения состава мишеней.
3. Исследование нанорельефа показало, что параметры облучения и выбор материала мишени позволяют управлять геометрическими параметрами рельефа, формирующегося на поверхности полупроводников при ионной бомбардировке.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Угловые распределения распылённых атомов Si и Ge описываются функцией $\cos^n \theta$ и являются надкосинусными, причём значения n для Ge превышают значения n для Si.
2. Более высокие значения n для Ge определяются вкладом распыления обратно рассеянными ионами (эффект массы) и более сильным поверхностным рассеянием распыленных атомов.
3. Эффект массы наблюдается также при распылении Ni-Pd сплавов при изменении концентрации компонентов.
4. Характер сегрегации компонентов при облучении Ni-Pd сплавов может изменяться в зависимости от концентрации составляющих атомов.
5. Из анализа угловых распределений частиц, распылённых из Ni-Pd сплавов, можно определить вклад различных слоёв в поток распылённого вещества.
6. На поверхности Si и Ge при облучении ионами Ar^+ с энергией 10 кэВ формируется нанорельеф, характеристики которого определяются параметрами ионного облучения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и симпозиумах, в том числе на XXXII и XXXV Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. (Москва, 2002, 2005), 8-ом Российско-японском симпозиуме по взаимодействию быстрых заряженных

частиц с твердым телом (Киото, Япония, 2002), 16-ой Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Звенигород, 2003), 15-ом Международном совещании по неупругим столкновениям ионов с поверхностью (Мие, Япония, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, список которых приведён в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Работа содержит 126 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка, 4 таблицы и библиографию из 100 наименований.

Содержание диссертации

Во введении дано обоснование актуальности темы представленной работы, формулируются цели исследования, показана новизна и значимость работы, излагаются выносимые на защиту положения, а также приводятся сведения об апробации работы.

В главе 1 содержится обзор экспериментальных и теоретических работ по изучению угловых распределений (УР) частиц, расплётённых из одно- и двухкомпонентных мишеней.

В начале обзора даётся краткое определение характеристик, используемых при описании распыления, рассмотрены экспериментальные и теоретические работы по распылению однокомпонентных мишеней. Отмечено, что полученные в экспериментах УР, как правило, хорошо описываются функцией:

$$Y \sim \cos^n \theta, \quad (1)$$

где параметр n может быть как меньше, так и больше единицы. Эти результаты находятся в противоречии с линейной каскадной теорией Зигмунда [1], которая предсказывает $n = 1$. При уточнении теории в качестве основных факторов, приводящих к формированию надкосинусных УР, рассматривались два механизма: некомпенсированное рассеяние вылетающих атомов на поверхностных атомах мишени [2] и анизотропия каскада атомных

столкновений [3]. Учёт поверхностного рассеяния, выполненный в работе [2], привёл к следующему выражению для n :

$$n = 1 + (8/3)NC_0^{3/2}, \quad (2)$$

где N – атомная плотность мишени и C_0 – константа. Из формулы (2) следует, что учёт нескомпенсированного рассеяния приводит к надкосинусным УР. В области энергий 1-10 кэВ влияние анизотропии каскада атомных столкновений на УР при нормальном падении пучка является сравнительно слабым [3].

Следует отметить, что в экспериментальных работах по распылению Si и Ge [4-7] наблюдался значительный разброс значений n , что затрудняло сравнение теории с экспериментом и не позволяло выявить вклад различных механизмов в формирование надкосинусных УР.

В обзоре рассмотрены также особенности распыления многокомпонентных мишеней. Отмечено, что основным эффектом при распылении мишеней сложного состава является селективное распыление, которое приводит к образованию изменённого слоя на поверхности образца с составом, отличным от объёмного, и толщиной порядка глубины проникновения первичных ионов. Было также обнаружено сильное влияние РССГ на пространственное перераспределение компонентов мишени при ионном облучении.

Завершается обзор обсуждением работ, посвящённых экспериментальным и теоретическим исследованиям формирования рельефа с характерными размерами нанометрового диапазона под действием ионного облучения. Основное внимание уделено работам, в которых облучение различного рода мишеней проводилось по нормали к поверхности образца.

В главе 2 представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерных расчётов угловых распределений частиц, распылённых из кремния и германия.

Эксперименты проводились на сверхвысоковакуумной ионно-лучевой установке. Образцы облучались сепарированным по массе пучком ионов Ag^+ . Пучок падал по нормали к поверхности мишени. Диаметр пучка на мишени составлял 1,5 мм. Давление остаточных газов в камере образца не превышало

10^{-8} торр. Плотность ионного тока в зависимости от энергии пучка составляла $0,05 \div 0,15$ мА/см², а флуенсы бомбардирующих ионов были $\sim 10^{18}$ ион/см². Температура мишени в процессе облучения была близка к комнатной, что значительно меньше температур отжига дефектов.

Для измерения угловых распределений использовалась коллекторная методика. Анализ напылённого на коллектор материала проводился на электростатическом ускорителе ЭГ-8 НИИЯФ МГУ с помощью метода резерфордского обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 1,5 МэВ.

Моделирование проводилось с помощью программы OKSANA [8], основанной на приближении парных столкновений и предусматривающей учёт слабых одновременных взаимодействий на больших расстояниях. Неупорядоченная (аморфная) мишень моделировалась вращением кристаллического блока атомов, причём процедура вращения повторялась от столкновения к столкновению. В качестве парного межатомного потенциала использовались потенциалы Вильсона-Хагмарка-Бирсака (WHB), Зиглера-Бирсака-Литтмарка (ZBL), Ленца-Йенсена (LJ), а также потенциал Мольера-Робинсона (MR), который представляет собой экранированный кулоновский потенциал в форме Мольера с универсальной длиной экранирования $a_s = 0.075 \text{ \AA}$, предложенной Робинсоном. Неупругие потери энергии рассчитывались по формуле Фирсова. Тепловые колебания атомов мишени считались некоррелированными и рассматривались по модели Дебая. Для эжектируемых атомов на поверхности мишени задавался плоский потенциальный барьер.

На рис. 1 показаны УР атомов, расплётённых из монокристаллов Si (а) и Ge (б) ионами Ag^+ с энергией 6 кэВ, а также их аппроксимация с помощью функции (1).

Рис. 2 демонстрирует зависимость n от энергии ионов для случая бомбардировки кремния. Отметим слабую энергетическую зависимость значения n , полученную в настоящей работе, и надкосинусную форму УР расплётённых атомов во всём диапазоне использованных энергий. На рисунке показаны также результаты предыдущих экспериментальных исследований.

Видно, что в работах [4, 5] наблюдается сильное изменение формы УР, которые могут быть как надкосинусными [4], так и подкосинусными [5]. Из рисунка видно, что для кремния формула (2) дает хорошее согласие с экспериментальными данными.

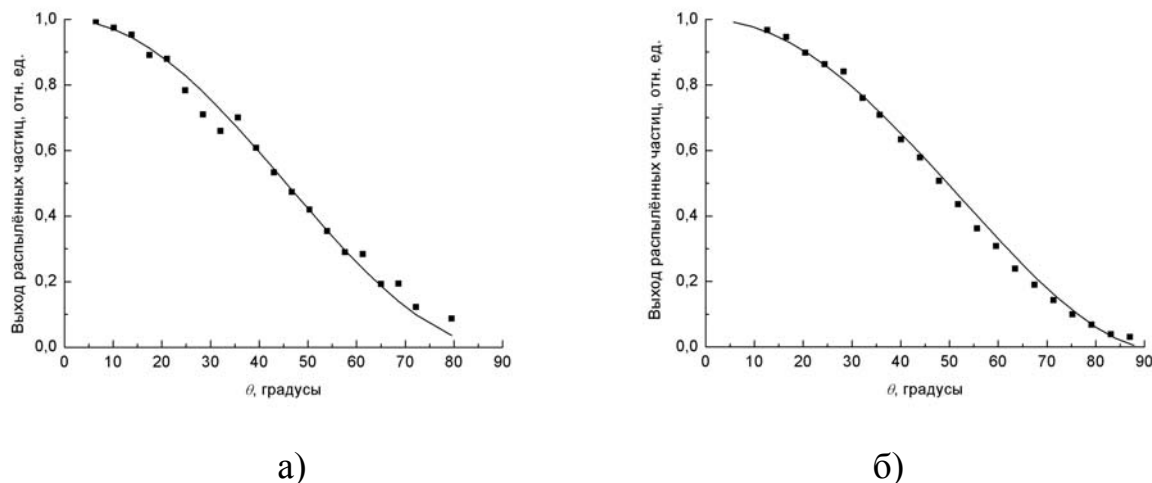


Рис. 1. Угловое распределение атомов, распылённых из монокристалла кремния (а) и германия (б) ионами Ag^+ с энергией 6 кэВ. ■ – экспериментальные данные, — — аппроксимация функцией (1) при $n = 1,3$ и $1,65$ для Si и Ge соответственно.

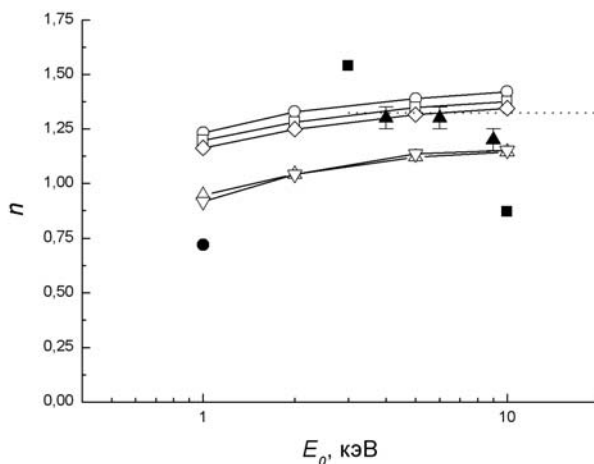


Рис. 2. Энергетическая зависимость n для случая бомбардировки кремния ионами Ag^+ . Эксперимент: ▲ – результаты настоящей работы, ■, ● – результаты работ [4, 5] соответственно. – расчёт по формуле (2). Компьютерное моделирование при различных потенциалах: ○—○ – WHB, □—□ – ZBL, ◇—◇ – LJ, Δ—Δ – MR, ▽—▽ – комбинированный потенциал WHB/MR.

Для германия зависимость n от энергии ионов изображена на рис. 3. Видно, что экспериментальные и расчетные значения n , полученные в данной работе, существенно превышают единицу, причем экспериментальные значения n имеют значительно меньший разброс, чем в работах [6, 7]. Наилучшее согласие результатов компьютерного моделирования с экспериментом наблюдается при использовании потенциала ZBL. Отметим, что для германия в отличие от кремния формула (2) не дает удовлетворительного согласия с экспериментом.

Отметим, что значения n для германия превышают соответствующие значения n для кремния. Это объясняется более сильным нескомпенсированным рассеянием атомов Ge, а также «эффектом массы», который связан с отражением ионов Ag от более тяжелых атомов Ge. Отраженные частицы, двигаясь в мишени под небольшими углами к поверхности, могут порождать атомы отдачи вблизи направления нормали, что и приводит к росту n . В случае же бомбардировки Si ионами Ag обратное однократное рассеяние невозможно.

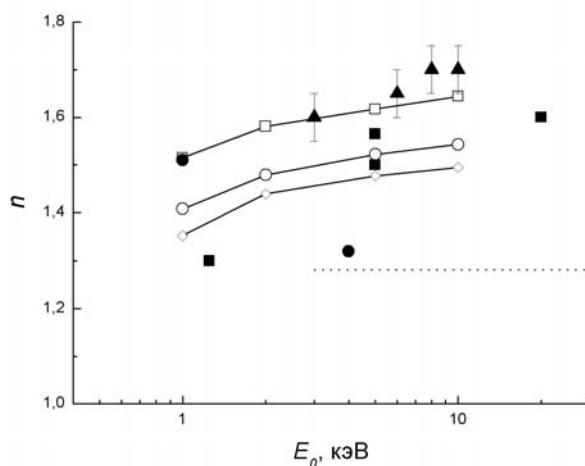


Рис. 3. Энергетическая зависимость n для случая бомбардировки германия ионами Ag^+ . Эксперимент: ▲ – результаты настоящей работы, ■, ● – результаты работ [6, 7] соответственно. – расчёт по формуле (2). Компьютерное моделирование при различных потенциалах; обозначения см. в подписи к рис. 2.

Таким образом, проведённые эксперименты и результаты компьютерного расчёта позволили оценить вклад различных механизмов в формирование потока распылённого вещества. Учёт нескомпенсированного рассеяния распылённых атомов на поверхностных атомах мишени позволяет объяснить надкосинусную форму УР лишь в случае распыления Si. В случае распыления германия этого недостаточно и необходимо также учесть эффект обратного рассеяния ионов.

Глава 3 посвящена исследованию угловых распределений частиц при распылении сплавов Ni_xPd_y с переменной концентрацией компонентов.

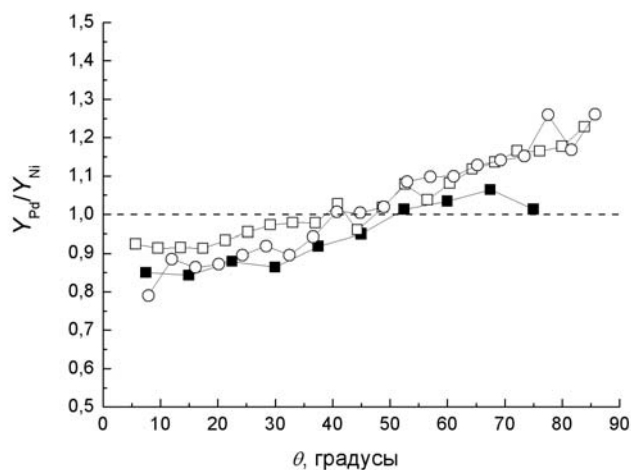


Рис. 6. Угловая зависимость относительного выхода компонентов для сплава Ni_5Pd при облучении ионами Ar: ○ – результаты настоящей работы для энергии ионов 10 кэВ, □ – 3 кэВ, ■ – результаты работы [9] для энергии ионов 15 кэВ.

На рис. 6 показана зависимость относительного выхода Y_{Pd}/Y_{Ni} от угла эмиссии частиц при распылении сплава Ni_5Pd . Приведены также результаты работы [9]. Относительный выход нормирован на объёмный состав образца. Из рисунка следует, что при облучении Ni_5Pd ионами аргона с энергиями от 3 до 15 кэВ происходит сужение угловых распределений атомов Ni, что, в свою очередь, свидетельствует о сегрегации атомов Pd на поверхность образца. Кроме того, из рисунка следует, что в нашем эксперименте был достигнут

стационарный режим распыления и состав распылённого потока соответствует объёмному составу образца.

При увеличении концентрации Pd в образце до достижения эквипотомного состава, т.е. для NiPd, угловая зависимость относительного выхода Y_{Pd}/Y_{Ni} аналогична полученной для сплава Ni₅Pd. Это означает, что для NiPd механизмы радиационно-стимулированных процессов, происходящих на поверхности мишени, не изменяются.

Однако при дальнейшем увеличении концентрации палладия (т.е. в случае распыления NiPd₅) наблюдается резкое изменение характера угловой зависимости относительного выхода компонентов: в направлениях близких к нормали поверхности образца поток распылённого вещества обогащён атомами Pd. Таким образом, в этом случае происходит сегрегация Ni на поверхность облучаемой мишени. Чтобы исключить влияние возможных погрешностей методики POP при изучении угловых распределений NiPd₅, измерения относительного выхода компонентов проводились также с помощью рентгеновского микроанализа.

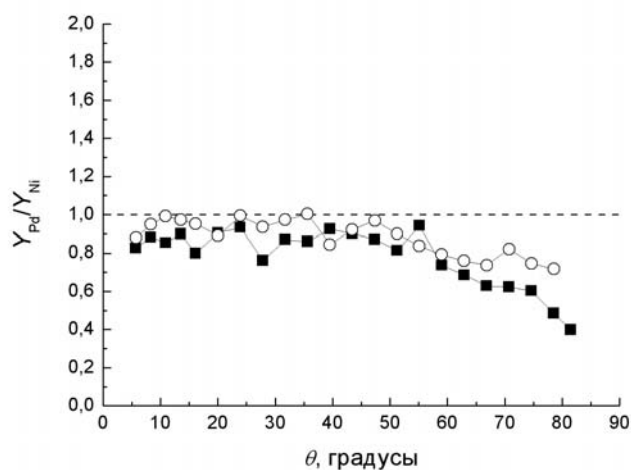


Рис. 7. Угловая зависимость относительного выхода компонентов для сплава NiPd₅, облучённого ионами аргона с энергией 3 кэВ при использовании различных методик анализа: ■—■ — резерфордовское обратное рассеяние, ○—○ — рентгеновский микроанализ.

Зависимости относительного выхода компонентов от угла эмиссии распылённых частиц, измеренные методами POP и микроанализа, сравниваются на рис. 7. Видно, что полученные данные хорошо согласуются друг с другом.

Таким образом, проведенные исследования угловой зависимости относительного выхода компонентов показали, что при изменении концентрации компонентов в сплавах Ni_xPd_y происходит изменение элемента, сегрегирующего на поверхность мишени.

Очевидно, что характер сегрегации атомов должен сильно влиять на состав поверхности мишени при облучении. В настоящей работе исследования состава поверхности образцов Ni_xPd_y были проведены методом Оже-спектроскопии с помощью Оже-спектрометра фирмы «Varian». Давление остаточных газов в камере спектрометра составляло $3\div 4 \times 10^{-9}$ мм.рт.ст. Образцы облучались “in situ” ионами Ar^+ с энергией 3 кэВ, падающими по нормали к поверхности образца. Доза облучения составляла 2×10^{17} ион/см².

Зависимость отношения Оже-сигнала Y_{Pd}/Y_{Ni} для образцов Ni_5Pd , Ni_3Pd , $NiPd$, $NiPd_3$ и $NiPd_5$ представлена на рис. 8.

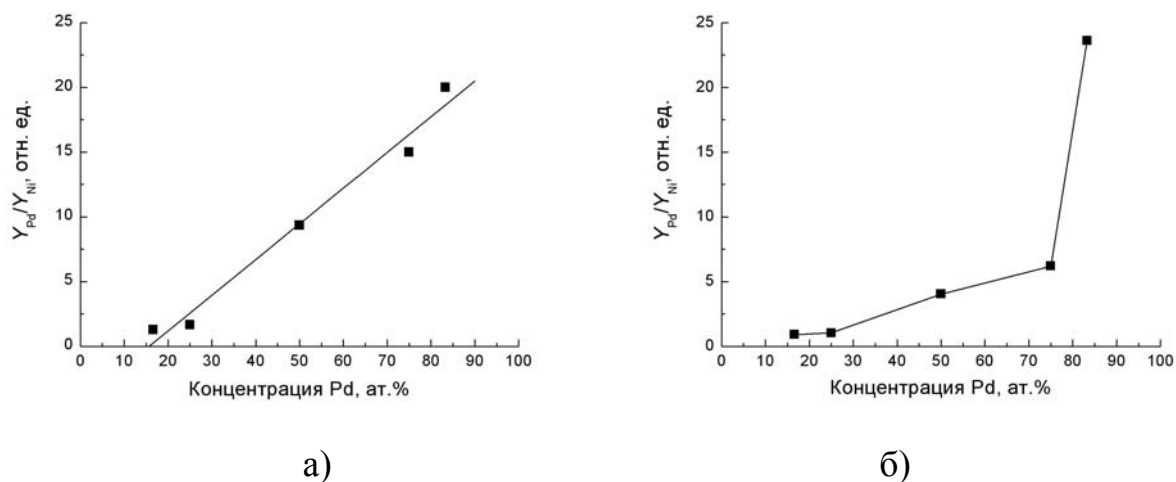


Рис. 8. Зависимость относительного Оже-сигнала от концентрации Pd для сплавов Ni_xPd_y : а) до облучения ионами Ar^+ , б) после облучения ионами Ar^+ .

Резкое изменение зависимости после облучения ионами Ar^+ (рис. 8 б) при переходе от $NiPd_3$ к $NiPd_5$ свидетельствует о том, что происходит смена сегрегирующего и, следовательно, более распыляемого элемента. Так, если в сплаве $NiPd_3$ таким элементом является Pd, то в $NiPd_5 - Ni$.

Заключительный раздел третьей главы содержит результаты измерений угловых распределений атомов. Показано, что для сплавов Ni_5Pd и $NiPd$ угловые распределения Pd хорошо аппроксимируется функцией (1). В то же время попытки аппроксимации углового распределения атомов Ni приводят к высоким значениям параметра n и не дают удовлетворительного описания экспериментальной зависимости выхода атомов Ni для всего диапазона углов эмиссии θ . На рис. 9 для примера приведены угловые распределения атомов Ni и Pd, распылённых из сплава Ni_5Pd ионами Ar^+ с энергией 10 кэВ. Аналогичные распределения были получены для атомов Ni и Pd, распылённых из сплавов Ni_5Pd и $NiPd$ ионами Ar^+ с энергией 3 кэВ.

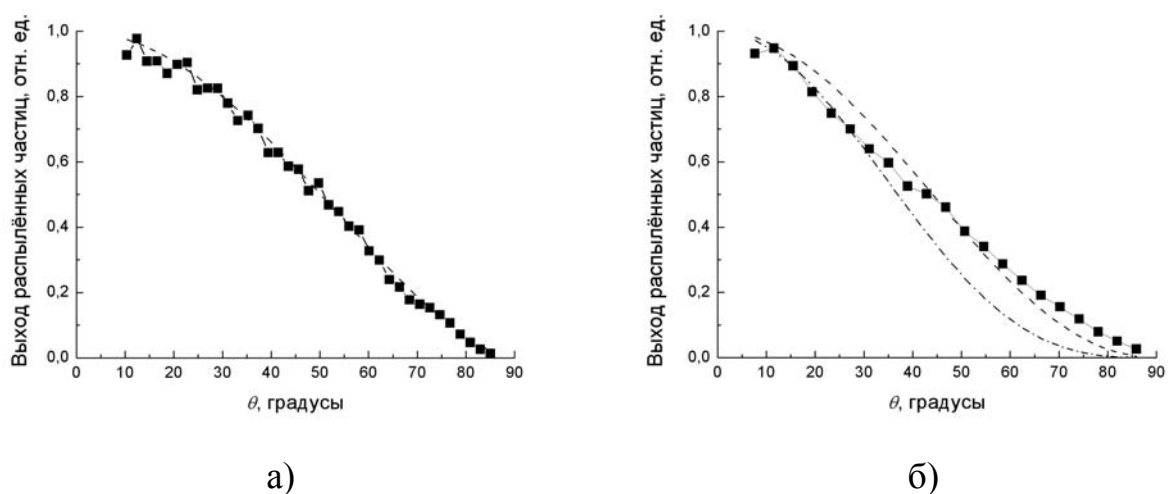


Рис. 9. Аппроксимация функцией (1) углового распределения палладия (а) и никеля (б) при распылении сплава Ni_5Pd : а) ■ – эксперимент, – – – - аппроксимация при $n = 1,56$; б) ■ – эксперимент, – – – - аппроксимация при $n = 2,1$, -·- - аппроксимация при $n = 3,1$.

Как отмечено выше, при распылении Ni_5Pd и $NiPd$ радиационно-стимулированная сегрегация Гиббса приводит к обогащению поверхностного

слоя мишени атомами палладия. В результате в тонком приповерхностном слое образуется резкий градиент концентрации компонентов. В этой ситуации атомы Ni, вылетающие из второго слоя, проходят через кольцо атомов Pd, насыщающих верхний слой, и фокусируются в узкое «пятно». Таким образом, полный поток распылённого Ni можно разделить на две составляющие: атомы, распыляющиеся из верхнего слоя, и атомы, распыляющиеся из второго слоя. Первая часть потока хорошо описывается функцией (1) и определяется атомами, распылёнными за счёт каскадного механизма. Вторая часть представляет долю атомов, эмитированных из подповерхностного слоя и имеющих более узкое распределение. Такое разделение потока позволяет оценить не только вклад в распыление каскадного механизма, но и вычислить вклад одного из элементов в поток распылённого вещества, распыляемого из второго слоя, т.е. определить вклад поверхностных слоёв с разрешением в один монослой. Этот вклад можно найти как разность экспериментальной и аппроксимирующей кривых (рис. 10).

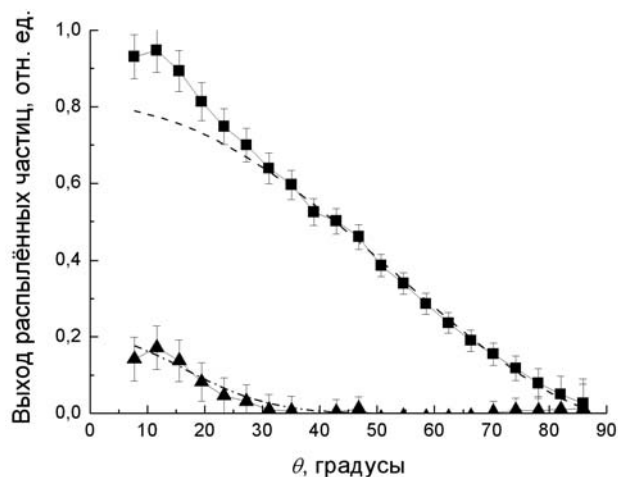


Рис. 10. Разделение потока распылённого никеля на «каскадную» и «поверхностную» части в случае распыления сплава Ni₅Pd : ■ — эксперимент, — — — аппроксимация «каскадной» части при $n = 1,45$, ▲ — угловое распределение «поверхностной» части потока, — · — её аппроксимация.

Отметим, что в случае распыления сплава NiPd₅ наблюдалась обратная картина: угловое распределение Ni хорошо аппроксимировалось функцией (1), тогда как при аппроксимации распределения Pd приходилось прибегать к разделению потока распылённого вещества с использованием процедуры, описанной выше.

В таблице 1 приведены значения параметра n «каскадной» части потока при распылении NiPd-мишеней ионами Ar⁺ с энергией 3 и 10 кэВ. Видно, что при переходе от Ni₅Pd к NiPd значения n как для Ni, так и для Pd возрастают. Это может быть объяснено рассмотренным выше эффектом массы. Однако, при переходе от NiPd к более тяжёлой мишени – NiPd₅ наблюдается уменьшение значений параметра n . Такое поведение n объясняется тем, что в этом случае резко меняется характер сегрегации: в сплаве NiPd₅ на поверхность сегрегирует Ni.

3 кэВ	Ni ₅ Pd	NiPd	NiPd ₅
Ni	1.56	1.89	1.65
Pd	1.45	1.7	1.67

10 кэВ	Ni ₅ Pd	NiPd	NiPd ₅
Ni	1.67	1.8	1.57
Pd	1.56	1.75	1.63

Таблица 1. Значения n в случае распыления сплавов Ni_xPd_y ионами аргона.

В главе 4 приводятся результаты изучения формирования нанорельефа на поверхности кремния и германия под действием ионной бомбардировки.

Исследование нанорельефа при облучении полупроводников представляет особый интерес в связи с тем, что в работах [10, 11] была продемонстрирована возможность формирования упорядоченных наноструктур на поверхности монокристалла Si при облучении ионами Ar⁺ с энергией 1,2 кэВ. Однако на

момент выполнения работы было неясно, можно ли управлять параметрами рельефа, изменяя характеристики ионного облучения. В связи с этим в настоящей работе проводилось изучение рельефа, формирующегося на Si и Ge под действием ионной бомбардировки. Такая информация интересна также с точки зрения возможного влияния рельефа на форму угловых распределений.

Исследование топографии проводилось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47-PRO с продольным разрешением 15 Å.

Рис. 12 показывает зависимость средней высоты наноструктур на поверхности Si и Ge от дозы облучения ионами Ag^+ . Видно, что при всех дозах бомбардирующих ионов высота нанорельефа у Ge превышает высоту наноструктур на Si. Это, по-видимому, связано с тем, что при использованной энергии ионов коэффициент распыления Ge примерно в 4 раза выше, чем Si, и, следовательно, при одинаковых дозах облучения эрозия поверхности Ge происходит быстрее. Отметим, что при дозе $\sim 10^{18}$ ион/см² высота нанорельефа на Si достигает стационарного значения и в дальнейшем слабо изменяется с увеличением дозы. Из рисунка также следует, что для Ge на начальной стадии облучения наблюдается сглаживание первоначального рельефа поверхности, а при увеличении дозы облучения наблюдается формирование рельефа с характерным размером порядка нескольких нанометров.

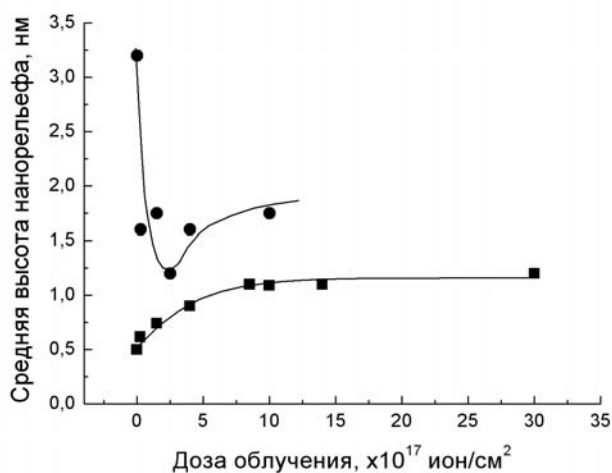


Рис. 12. Зависимость средней высоты нанорельефа для Ge (●) и Si (■) от дозы облучения при бомбардировке ионами Ag^+ с энергией 10 кэВ.

При сравнении полученных данных с результатами низкоэнергетичного ионного облучения Si [11] была обнаружена чёткая корреляция между размерами каскада столкновений и шириной наноструктур. Обобщённая картина параметров представлена в табл. 2, где кроме геометрических размеров приводятся значения среднего проективного пробега бомбардирующих ионов $\overline{R_p}$.

Из табл. 2 видно также, что при увеличении энергии от 1,2 кэВ [10] до 10 кэВ высота наноструктур на Si уменьшается почти в шесть раз. Это связано, по-видимому, с тем, что при увеличении энергии бомбардирующих ионов возрастает и коэффициент распыления. В этом случае возрастает скорость распыления поверхности и, как следствие, происходит “сглаживание” рельефа. Таким образом, эти результаты свидетельствуют о связи параметров рельефа как с характеристиками бомбардирующего пучка, так и с выбором материала мишени.

Энергия ионов Ar ⁺	Si	Ge
1,2 кэВ [10]	55 / 6 / 4	
10 кэВ	100 / 1 / 13,7	70 / 1,7 / 9,5

Таблица 2. Значения ширины наноструктур L , высоты наноструктур H и среднего проективного пробега $\overline{R_p}$ ($L / H / \overline{R_p}$) в нм.

Однако в настоящей работе при использованных нами параметрах ионной бомбардировки упорядочение рельефа ни на Ge, ни на Si не наблюдалось. Это показал Фурье-анализ АСМ-изображений поверхности образцов после облучения.

Из табл. 2 видно, что во всех рассмотренных случаях $H \ll L$. Это позволяет сделать вывод о слабом влиянии формирующегося нанорельефа на форму угловых распределений при распылении Si и Ge ионами Ar^+ низких энергий.

Основные результаты и выводы

1. На базе метода Резерфордского обратного рассеяния разработана методика проведения экспериментов по распылению, которая позволила измерить УР для Si и Ge с более высокой точностью по сравнению с работами, опубликованными ранее.
2. Полученные угловые распределения распылённых атомов Si и Ge хорошо описываются функцией $Y \sim \cos^n \theta$ (где θ – угол эмиссии) и являются надкосинусными. Изучены зависимости параметра n от начальной энергии ионов и типа бомбардирующих ионов. Установлено, что значения n для Ge превышают значения n для Si во всём исследованном диапазоне энергий.
3. Проведенный компьютерный анализ позволил выявить вклад различных механизмов в формирование потока распылённых частиц. Показано, что в случае распыления Si учёт нескомпенсированного рассеяния распылённых атомов на поверхностных атомах мишени даёт хорошее согласие с экспериментальными результатами. При распылении Ge необходимо также учесть анизотропию каскада атомных столкновений, возникающую за счёт обратного рассеяния ионов на атомах мишени (эффект массы).
4. На примере сплавов Ni_xPd_y впервые изучено влияние концентрации компонентов на УР атомов. Установлено, что при распылении NiPd наблюдаются более узкие УР компонентов по сравнению со случаем распыления Ni_5Pd , что объясняется влиянием эффекта массы.
5. При переходе от NiPd к $NiPd_5$ обнаружено сильное изменение характера УР: в случае NiPd по нормали к поверхности преимущественно

распыляется никель, а при распылении NiPd_5 – палладий. Установлено, что это связано с изменением характера сегрегации атомов на поверхность: в сплаве NiPd сегрегирующим элементом является Pd, а в NiPd_5 – Ni.

6. Предложена новая методика анализа угловых распределений распылённых компонентов, позволяющая выявить вклад атомных слоёв в распылённый поток.
7. Бомбардировка Si и Ge ионами Ar^+ по нормали к поверхности приводит к образованию рельефа с характерными размерами порядка нескольких нанометров. Параметры рельефа определяются материалом мишени и зависят от энергии бомбардирующих ионов и дозы облучения.
8. При распылении Si и Ge ионами Ar^+ низких энергий поверхность мишени остаётся практически гладкой и, следовательно, формирующийся рельеф не должен оказывать заметного влияния на форму угловых распределений.

Список цитируемой литературы

1. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твёрдых тел. / Под ред. Р. Бериша. - Москва: Мир, 1984, 336 с.
2. Sigmund P. Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 1987. – V. 27. – P. 1-20.
3. Roosendaal H.E., Sanders J.B. On the energy distribution and angular distribution of sputtered particles // Rad. Eff. – 1980. – V. 52. – P. 137-144.
4. Okutani T., Shikata M., Ichimura S., Shimizu R. Angular distribution of silicon atoms sputtered by keV Ar^+ ions // J. Appl. Phys. – 1980. – V. 51. – P. 2884-2887.
5. Tsuge H., Esho S. Angular distribution of sputtered atoms from polycrystalline metal targets // J. Appl. Phys. – 1981. – V. 52. – P. 4391-4395.

6. Andersen H. H., Stenum B., Sorensen T., Whitlow H.J. Angular distribution of particles sputtered from Cu, Pt and Ge targets by keV Ar⁺ ion bombardment // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 1985. – V. 6. – P. 459-465.
7. Chini T.K., Tanemura M., Okuyama F. Angular distribution of sputtered Ge atoms by low keV Ar⁺ and Ne⁺ ion bombardment // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 1996. – V. 119. – P. 387-391.
8. Shulga V.I. Depth-dependent angular distribution of sputtered atoms // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 1999. – V. 155. – P. 382-394.
9. Andersen H.H., Stenum B., Sorensen T., Whitlow H.J. Surface segregation during alloy sputtering and implantation // Nucl. Instr. Meth. – 1983. – V. 209-210. – P. 487-494.
10. Gago R., Vazquez L, Cuerno R. et al. Production of ordered silicon nanocrystals by low-energy ion sputtering // Appl. Phys. Lett. – 2001. – V. 78. – P. 3316-3318.
11. Gago R., Vazquez L., Cuerno R. et al. Nanopatterning of silicon surfaces by low-energy ion-beam sputtering: dependence on the angle of ion incidence // Nanotechnology – 2002. – V. 13. – P. 304-308.

Список публикаций по теме диссертации

1. Черныш В.С., Куликаускас В.С., Хайдаров А.А., Патракеев А.С. Влияние концентрации компонентов на распыление сплавов. Тезисы докладов XXXII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2002. С.191.
2. Chernysh V.S., Kulikauskas V.S., Patrakeev A.S., Shulga V.I. Sputtering of Si under low energy ion bombardment. Abstracts of the 8-th Japan-Russian International Symposium on Interaction of Fast Charged Particles with Solids, Kyoto, Japan. 2002. P.27.
3. Патракеев А.С., Черныш В.С., Шульга В.И. Угловые распределения атомов при распылении кремния ионами аргона низких энергий // Поверхность. – 2003. – № 8. – С. 18.

4. Патракеев А.С., Черныш В.С., Шульга В.И. Распыление кремния ионами аргона с энергией 1-10 кэВ. Материалы 16-й Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». Москва. 2003. С.166.
5. Chernysh V.S., Kulikauskas V.S., Patrakeev A.S., Abdul-Cader K.M., Shulga V.I. Angular distribution of atoms sputtered from silicon by 1-10 keV Ar ions // Rad. Eff. Def. Sol. – 2004. – V.159. – P.149-155.
6. Chernysh V.S., Haidarov A.A., Patrakeev A.S., Shulga V.I., Uzbiakov A.S. Sputtering Mechanisms of One- and Multicomponent Targets. Abstracts of the 15-th International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions. Mie, Japan. 2004. P.81.
7. Черныш В.С., Патракеев А.С., Шульга В.И., Разгуляев И.И. Распыление аморфного германия низкоэнергетичными ионами. Тезисы докладов XXXV Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2005. С.104. (принята к печати в журнал «Поверхность»)
8. Черныш В.С., Патракеев А.С., Емельянов В.И., Узбяков А.С., Кудрявцев А.В. Формирование нанорельефа при ионном облучении поверхности кремния и германия. Тезисы докладов XXXV Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2005. С.118.

Заказ №821. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «Петрораш»

г. Москва, ул. Палиха-2а, тел. 250-92-06

www.postator.ru