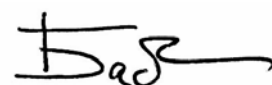


На правах рукописи



**Бабенко Павел Юрьевич**

**ЭФФЕКТЫ МНОГОКРАТНОГО ИОННОГО РАССЕЯНИЯ  
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТВЕРДЫХ  
РАСТВОРОВ**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор

**Шергин Андрей Петрович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор

**Девдариани Александр Зурабович**

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

**Пронин Игорь Иванович**

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_ часов \_\_\_ мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 в Учреждении Российской  
академии наук Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН по  
адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской  
академии наук Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.205.03,

кандидат физико-математических наук



А.М. Красильщиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Исследование взаимодействия ионов с поверхностью является одним из основных направлений физической электроники. В результате облучения поверхности ионами происходит множество процессов: распыление, рассеяние, эмиссия электронов и квантов, имплантация. В этом ряду изучение рассеяния весьма важно для выяснения закономерностей взаимодействия в системе ион-поверхность твердого тела, а также для развития методов элементного и структурного анализа.

Как известно, характерными особенностями энергетического спектра рассеянных частиц, являются пики однократного и двукратного рассеяния налетающего иона на атомах мишени и пик частиц отдачи. Большинство выполненных до настоящей работы исследований посвящено изучению однократного рассеяния и его применению для элементного анализа твердых тел. Этот вопрос разработан достаточно подробно, так как сигнал от однократно рассеянных частиц присутствует в спектре практически при любых условиях проведения эксперимента. Полученные в настоящей работе данные по однократному рассеянию медленных ионов полностью согласуются с результатами предшествующих исследований.

Эффект двукратного рассеяния изучен в меньшей степени. После предсказания [1] и последующего экспериментального подтверждения [2] исследованию эффекта двукратного рассеяния было посвящено существенно меньшее количество работ, чем однократному рассеянию. Вклад частиц, испытавших двукратное рассеяние, проявляется в энергетических спектрах только при определенных условиях, которые зависят от энергии бомбардирующих частиц, ориентации и типа мишени, угла наблюдения. Вид спектра эмитированных частиц, испытавших двукратное рассеяние, существенно зависит от их зарядового состояния (атомы или ионы).

В экспериментах по рассеянию анализируются либо полные потоки частиц с помощью времяпролетной методики, либо с помощью электростатического анализа только рассеянные ионы, составляющие лишь малую долю от полного потока. У каждой из этих методик есть свои достоинства и недостатки. В настоящей работе измеряются спектры заряженных частиц, поэтому изучение эффекта двукратного рассеяния для ионов является актуальной задачей. Чтобы решить эту задачу, необходимо измерить энергетические спектры положительных ионов для различных типов мишеней и параметров проведения эксперимента.

Актуальной представлялась разработка метода анализа кластерной составляющей в твердых растворах, применяемых при изготовлении приборов быстродействующей электроники. На момент начала настоящих исследований

не существовало прямых способов определения доли атомов Ge в твердом растворе SiGe, объединенных в кластеры.

В лаборатории Атомных столкновений в твердых телах ФТИ в спектрах отрицательных частиц, эмитированных при бомбардировке углеродной мишени ионами аргона, наблюдались широкие образования [3]. Было предположено, что эффект связан с эмиссией отрицательных ионов углерода в результате нескольких столкновений в твердом теле. Для установления природы обнаруженного эффекта необходимо было провести развернутые исследования спектров частиц, эмитированных из разных мишеней в широком диапазоне параметров взаимодействия ионов с поверхностью.

На момент выполнения настоящей работы, данные об отрицательно заряженных частицах, эмитированных при ионной бомбардировке поверхности, в литературе практически отсутствовали. Следовательно, изучение эмиссии отрицательных ионов представляло определенный интерес, как любое малоизученное явление.

### **Основные цели и задачи работы**

Измерение энергетических спектров положительных ионов, эмитированных при бомбардировке поверхности твердого тела ионами кэВ-энергий для малых ( $\leq 30^\circ$ ) углов рассеяния, и энергетических спектров положительных и отрицательных ионов и электронов, эмитированных под большим ( $\sim 129^\circ$ ) углом к направлению первичного пучка.

Выяснение вопроса, подчиняется ли эффект двукратного рассеяния ионов закономерностям, справедливым для нейтральных частиц.

Исследование вклада в энергетические спектры ионов, эмитированных в результате нескольких последовательных соударений в твердом теле.

Разработка метода количественной оценки кластерной фракции атомов Ge в твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием германия ( $x \sim 5\%$ ).

### **Научная новизна**

В энергетических спектрах положительных и отрицательных ионов, эмитированных при ионном облучении, обнаружены частицы, покинувшие твердое тело в результате нескольких последовательных парных соударений.

Впервые метод спектроскопии медленных рассеянных ионов и эффект двукратного ионного рассеяния применены для диагностики кластеров в твердых растворах SiGe.

### **Научная и практическая ценность**

Получен значительный объем данных об энергетических спектрах и о соотношении интенсивностей двукратно и однократно рассеянных ионов в

зависимости от сорта мишени в широком диапазоне масс, энергии налетающих частиц и угла наблюдения.

Показано, что эффект двукратного рассеяния ионов подчиняется закономерностям, справедливым для нейтральных частиц и может быть использован для структурного анализа поверхности твердых тел.

В спектрах отрицательных и положительных ионов, рассеянных под большим ( $129^{\circ}$ ) углом к направлению первичного пучка, обнаружены частицы, эмитированные в результате трех- и четырехкратных столкновений в твердом теле. Эмиссия этих частиц может быть объяснена селективирующей ролью поверхности твердого тела, подобной эффекту каналирования в кристаллах.

Разработан метод количественной оценки доли кластерной фракции атомов германия в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием германия  $x \sim 5 \div 10\%$ , основанный на спектроскопии медленных рассеянных ионов и эффекте двукратного ионного рассеяния.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты исследований докладывались на XVI, XVII и XVIII (приглашенный доклад) Международных конференциях по взаимодействию ионов с поверхностью (ВИП-2003, ВИП-2005 и ВИП-2007) и на 12<sup>-ом</sup> международном симпозиуме: Nanostructures: Physics and Technology в 2004 году. Результаты работы изложены в 9 публикациях – 4 статьях и 5 тезисах докладов в сборниках трудов конференций. Полный список публикаций автора приведен в конце автореферата.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Измерение энергетических спектров положительных ионов, рассеянных на малые  $\theta = 5 \div 30^{\circ}$  углы, и энергетических спектров положительных и отрицательных ионов и электронов, эмитированных под углом  $129^{\circ}$  к направлению первичного пучка. Диапазон энергий налетающих ионов  $\text{Ar}^+$   $E_0 = 1 \div 5$  кэВ. Мишени – C, Al, Si, Ti, Ge и In.
2. Установление закономерностей двукратного рассеяния для ионной компоненты рассеянных частиц.
3. Обнаружение частиц, покинувших твердое тело в результате нескольких последовательных парных соударений.
4. Разработка метода определения доли кластерной фракции атомов Ge в твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с  $x \sim 5\%$ , основанного на анализе однократного и двукратного рассеяния.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа содержит 142 страницы, в том числе 83 страницы машинописного текста, 59 рисунков, 1 таблицу и список литературы, включающий 87 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, обсуждена новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

### **Глава 1. Обзор работ по исследованию рассеяния при бомбардировке поверхности твердого тела ионами кэВ-энергий.**

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрены основные процессы, сопровождающие ионную бомбардировку твердого тела. Обсуждены результаты исследований. Обоснована необходимость постановки настоящих исследований.

При ионной бомбардировке поверхности из твердого тела эмитируются различные частицы: атомы, ионы, электроны, кванты. Энергетические спектры этих частиц содержат информацию о структуре мишени и характере взаимодействия в системе ион-поверхность.

В обзоре даны представления о кинематике столкновения иона с поверхностью, т.к. эта информация необходима для правильной идентификации пиков в энергетических спектрах рассеянных частиц. Рассмотрены межатомные потенциалы взаимодействия, наиболее часто используемые в расчетах сечений взаимодействия. Обсуждаются процессы перезарядки при рассеянии, т.к. вид энергетического спектра рассеянных частиц существенно зависит от того, какие частицы: атомы или ионы регистрируются. Определены неупругие потери энергии, возникающие в результате возбуждения и ионизации взаимодействующих частиц, приведены формулы для их оценки.

Рассматриваются история открытия и результаты последующих исследований эффекта двукратного рассеяния. В отличие от однократного рассеяния, которое на момент постановки настоящих исследований было достаточно подробно изучено, исследованию эффекта двукратного рассеяния и его применению для анализа поверхности твердых тел посвящено существенно меньшее число работ. Не наблюдались частицы, эмитированные в результате столкновений с кратностью больше двух. Практически не изучено образование

под действием ионной бомбардировки рассеянных отрицательных ионов. До начала нашей работы не существовало прямых способов определения доли атомов Ge в твердом растворе SiGe, объединенных в кластеры.

## Глава 2. Метод спектроскопии медленных рассеянных ионов (СМРИ).

Во второй главе дано описание экспериментальной установки и процедуры настройки ее параметров.

Для реализации целей настоящей работы требовалось измерить энергетические спектры положительных ионов для малых ( $\theta=0\div 30^\circ$ ) и большого ( $129^\circ$ ) углов наблюдения относительно направления первичного пучка ионов и спектры отрицательных ионов и электронов для угла наблюдения  $\theta=129^\circ$ .

Эти условия определили требования к диапазону измеряемых энергий частиц. Для углов наблюдения  $0\div 30^\circ$  энергии рассеянных ионов и ионов отдачи (для налетающего иона Ar с массой  $M_1=40$  а.е.м. и атомов мишени с  $M_2=9\div 115$  а.е.м.) лежат в диапазоне энергий  $E/E_0=0.5\div 1$ . Для угла наблюдения  $129^\circ$  энергии эмитированных ионов  $E/E_0=0\div 0.5$ .

Работа выполнена на экспериментальной установке СПЕКТР, созданной в ФТИ в 1997 году, для изучения энергетических спектров частиц, эмитируемых из твердых тел при ионной бомбардировке поверхности [3].

Источник ионов (дуоплазматрон) позволяет получать пучки положительно заряженных ионов в диапазоне энергий  $1\div 5$  кэВ. Система из двух электростатических линз и система из двух пар отклоняющих пластин позволяет фокусировать пучок на образец и получать плотность тока на мишень  $j\sim 10$  мкА/см<sup>2</sup>. Угол падения пучка на образец можно изменять в диапазоне  $\alpha=0\div 34^\circ$ . Ионы, рассеянные на малые углы  $\theta=0\div 30^\circ$ , анализировались электростатическим анализатором Юза-Рожанского с разрешением  $9\cdot 10^{-3}$ . Как правило, исследовался случай так называемого зеркального рассеяния, когда угол падения ионов на мишень  $\alpha$  равен половине угла рассеяния  $\theta$  ( $\alpha=\theta/2$ ). Частицы, эмитированные под углом  $\theta=129^\circ$  к направлению первичного пучка, анализировались по энергии в цилиндрическом анализаторе с разрешением  $4\cdot 10^{-2}$ . В этом эксперименте угол  $\alpha=10\div 20^\circ$ . Частицы детектировались каналными электронными умножителями ВЭУ-6.

Откачка рабочего газа источника осуществлялась высокопроизводительным турбомолекулярным насосом ВМН-150М, сверхвысокий вакуум в аналитической камере создавался магнитоэлектронным насосом НМД-0.4-1. Остаточное давление в аналитической камере составляло  $10^{-9}$  мм.рт.ст.

Перед началом измерений исследуемые образцы подвергались травлению пучком ионов аргона с энергией  $E_0=5$  кэВ. Под действием бомбардирующих частиц с поверхности стравливались внешние загрязненные слои вещества и

окислы. При вышеуказанных условиях проведения эксперимента число частиц, распыляемых с поверхности в процессе измерения, на 2-3 порядка больше, чем число молекул остаточного газа, падающих на поверхность за то же время, т.е. поверхность мишени "динамически" чистая.

Для изучения процессов однократного и многократного рассеяния, а также вылета частиц отдачи при ионной бомбардировке поверхности твердого тела в работе использована методика измерения энергетических распределений эмитированных положительных и отрицательных ионов.

### Глава 3. Результаты измерений и их обсуждение.

В третьей главе приводятся и обсуждаются результаты исследований.

В настоящей работе измерялись энергетические распределения положительных рассеянных ионов для малых ( $5 \div 30^\circ$ ) углов наблюдения и энергетические спектры положительных и отрицательных ионов и электронов, эмитированных "назад" ( $129^\circ$ ), при бомбардировке ионами  $Ag^+$  с энергией  $E_0 = 1 \div 5$  кэВ мишеней из C, Al, Si, Ge и In. Т.е., всесторонне исследовано проявление эффекта двукратного ионного рассеяния в различных экспериментальных условиях. Исследуемый диапазон энергий первичных ионов наиболее часто используется при диагностике поверхности. На рис. 1 приведен пример энергетического спектра рассеянных ионов  $Ag^+$  и ионов отдачи  $Al^+$  при бомбардировке мишени из Al ионами  $Ag^+$  с энергией 5 кэВ для угла наблюдения  $\theta = 14^\circ$ . На рисунке пик однократно рассеянных ионов  $Ag^+$  обозначен – SS, пик двукратно рассеянных – DS и пик, отвечающий частицам отдачи, – RS. Вертикальными линиями на рисунке обозначены энергии соответствующих пиков, рассчитанные для случая упругого рассеяния. Видно, что экспериментальные энергии рассеянных частиц заметно меньше рассчитанных. Разница вызвана неупругими потерями энергии при рассеянии.

Одной из задач настоящей работы было применение эффекта двукратного рассеяния для диагностики твердых растворов. Поскольку мы использовали электростатический анализ, нам необходимо было изучить эффект двукратного рассеяния для ионной компоненты. Целесообразно было использовать отношение интенсивностей двукратно и однократно рассеянных ионов  $I_D^+/I_S^+$ , и исследовать зависимость этого отношения от экспериментальных параметров.

Для расчета полных потоков рассеянных частиц  $I_D/I_S$  в работе Машковой и Молчанова [2] предложена формула:

$$I_D / I_S = \frac{\sigma(\theta_1, E_0) \cdot \sigma(\theta_2, E_1)}{\sigma(\theta, E_0) \cdot d^2} \quad (1)$$

где  $\sigma(\theta_1, E_0)$  и  $\sigma(\theta_2, E_1)$  – дифференциальные сечения рассеяния на первом и на втором атоме, соответственно, для двукратного рассеяния,  $\sigma(\theta, E_0)$  – дифференциальное сечение однократного рассеяния,  $E_0$  – первоначальная энергия иона,  $E_1$  – энергия иона после рассеяния на первом атоме,  $\theta_1, \theta_2$  – углы



рассеяния на первом и на втором атоме, соответственно,  $d$  – межатомное расстояние. Дифференциальные сечения рассеяния рассчитаны нами исходя из ЦБЛ потенциала взаимодействия.

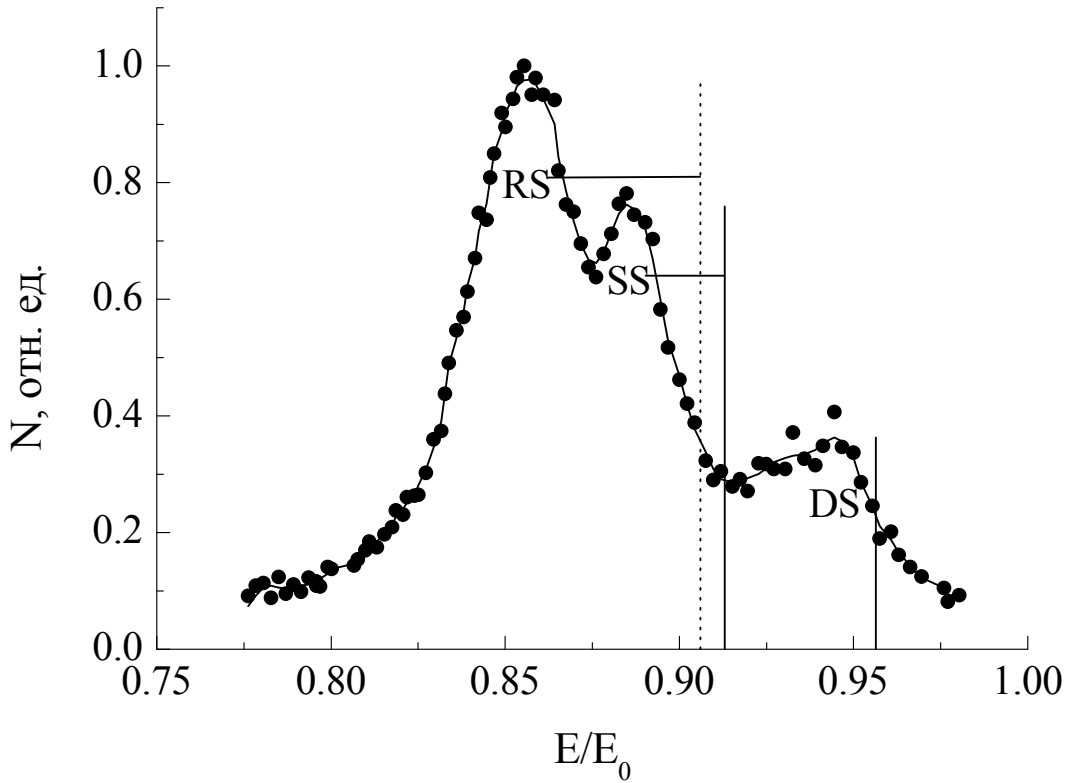


Рис. 1. Спектр ионов, эмитированных при бомбардировке мишени из Al ионами  $Ag^+$  с энергией 5 кэВ для угла наблюдения  $\theta=14^0$ .

Вертикальные линии – энергии, рассчитанные для случая упругого рассеяния.

На рис. 2 представлены экспериментальные отношения  $I_D^+/I_S^+$  и  $I_D/I_S$  для нейтральных частиц, рассчитанные по формуле (1), в зависимости от угла наблюдения для Al, Ge и In. Из рисунка видно, что ход измеренной нами зависимости  $I_D^+/I_S^+$  хорошо согласуется с расчетной зависимостью, но абсолютные величины отличаются. Это различие, скорее всего, связано с разницей в вероятности формирования зарядовой фракции однократно и двукратно рассеянных частиц.

Из сравнения полученных нами результатов и расчета следует, что эффект двукратного рассеяния для ионов ведет себя также как и в случае нейтральных атомов. Таким образом у нас были все основания применить эффект двукратного рассеяния для диагностических целей.

Перейдем к изложению еще одного из основных результатов диссертационной работы: обнаружению частиц, покинувших твердое тело в результате нескольких соударений.

В электронных спектрах, измеренных при бомбардировке углеродной мишени, наблюдались широкие куполообразные распределения, энергия которых изменялась прямо пропорционально начальной энергии пучка  $E_0$  [3].

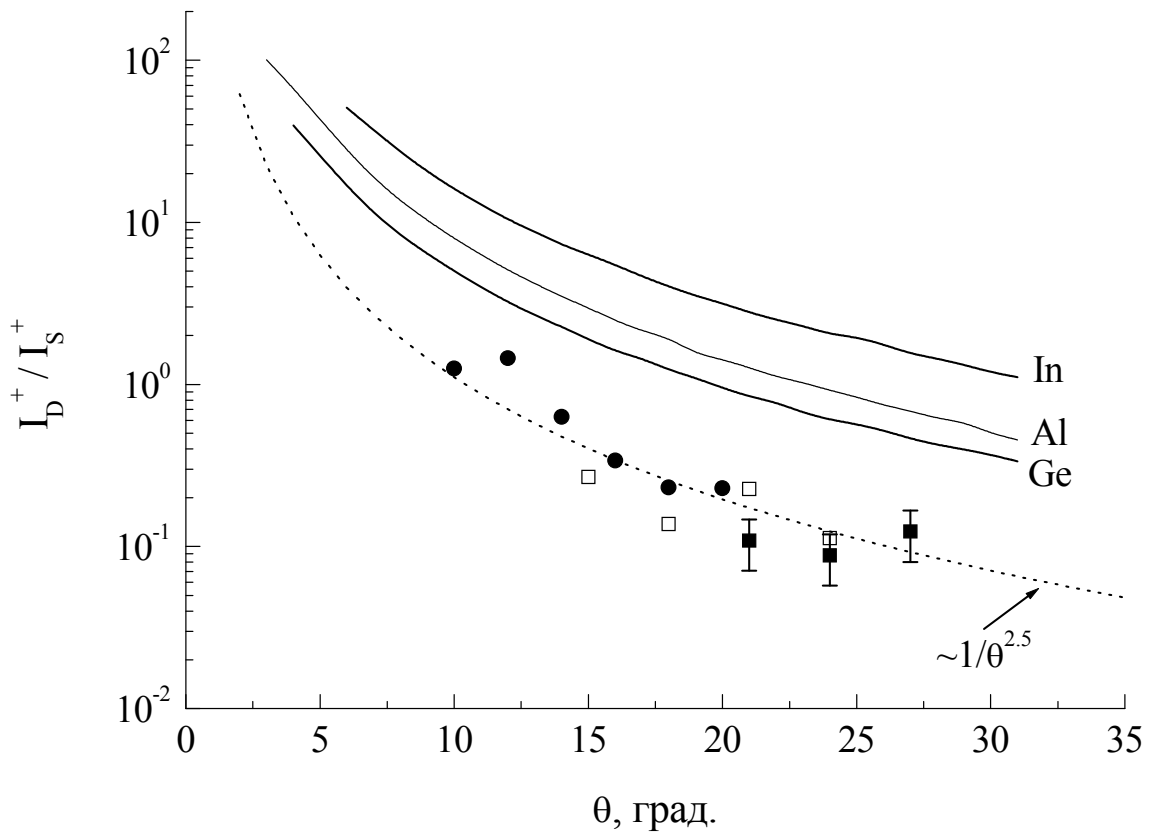


Рис. 2. Зависимость экспериментального отношения  $I_D^+ / I_S^+$  (значки) и расчета  $I_D / I_S$  (сплошные линии) от угла рассеяния для мишеней: Al (темные кружки), Ge и In (светлые и темные квадратики, соответственно). Энергия налетающих ионов  $Ag^+$   $E_0=5$  кэВ. Пунктир – зависимость  $I_D / I_S \sim 1/\theta^{2.5}$ .

Было предположено, что обнаруженные широкие распределения обусловлены эмиссией отрицательных ионов углерода, вылетевших из мишени в результате нескольких соударений атомов мишени друг с другом, т.к. выбивание частицы мишени в результате однократного соударения невозможно для углов больших  $\theta > 90^\circ$ . Для установления природы этого эффекта необходимо было провести развернутые исследования спектров частиц, эмитированных из разных мишеней в широком диапазоне параметров взаимодействия ионов с поверхностью.

На рис. 3 показаны энергетические спектры отрицательных частиц, эмитированных при бомбардировке кремниевой мишени Si. Хорошо виден пик оже-электронов при энергии примерно 100 эВ, который связан с образованием и распадом L-вакансии в кремниевых атомах. При больших энергиях в спектре видны два широких распределения. В отличие от оже-пика, положение этих максимумов изменяется прямо пропорционально первоначальной энергии пучка  $E_0$ , что согласуется с предположением об эмиссии атомов мишени в результате нескольких столкновений в твердом теле.

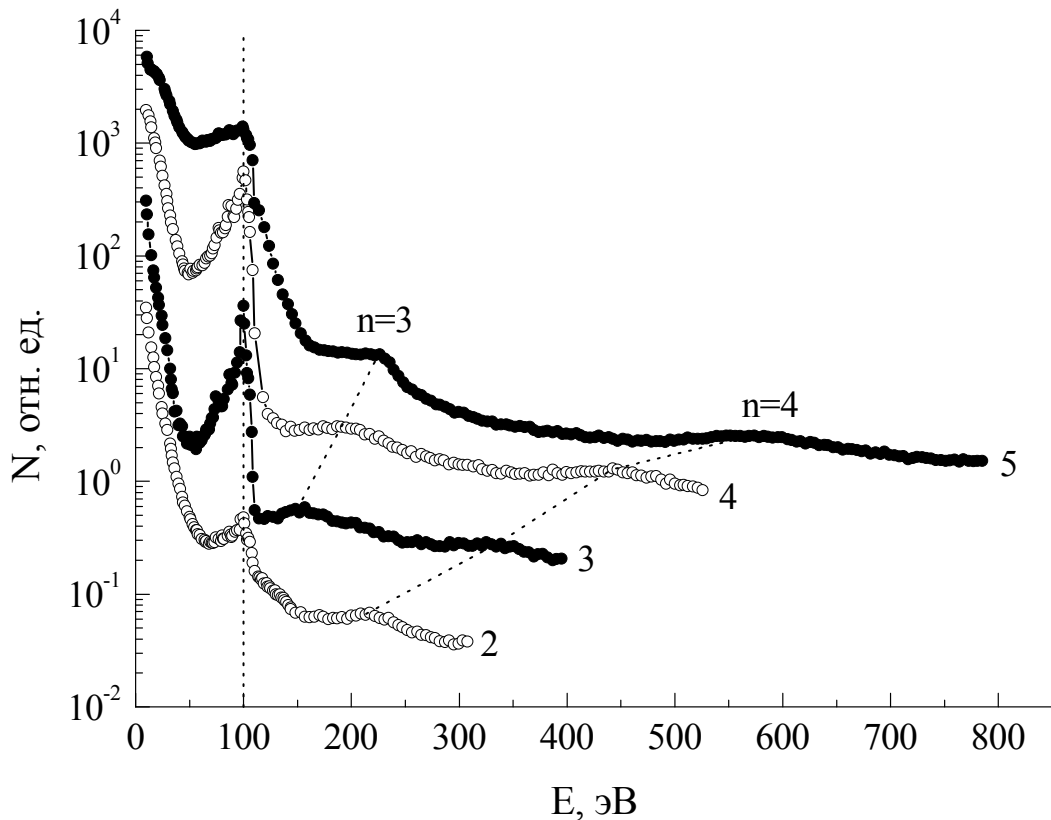


Рис. 3. Энергетические спектры отрицательных частиц, эмитированных при бомбардировке мишени из Si ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией  $E_0$ : 2÷5 кэВ (значения  $E_0$  указаны цифрами рядом с соответствующими кривыми). Угол наблюдения  $\theta=129^\circ$ . Максимумы, интерпретируемые нами как результат трех- и четырехкратных столкновений в твердом теле, соединены пунктирными линиями и обозначены  $n=3$  и  $n=4$ , соответственно.

На рис. 4 приведены энергии обнаруженных нами максимумов для мишеней из C, Si, Ge и In в зависимости от  $E_0$ .

Компактная группа точек в диапазоне энергий  $\sim 50 \div 250$  эВ соответствует низкоэнергетическим максимумам в спектрах эмитированных частиц. Видно, что энергии этих максимумов для всех исследованных мишеней с хорошей точностью прямо пропорциональны первоначальной энергии пучка  $E_0$ .

Такая зависимость от начальной энергии говорит о том, что обнаруженные максимумы могут быть результатом последовательности парных столкновений  $\text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{M}$ ,  $\{\text{M} + \text{M} \rightarrow \text{M}, \dots \text{M} + \text{M} \rightarrow \text{M}\}$ , где M – обозначение атома мишени.

Оценим энергию частицы отдачи после  $n$  таких соударений для случая упругого рассеяния. Формулу запишем при следующих упрощающих предположениях: траектории движения частиц лежат в одной плоскости, угол между направлением движения атома мишени и направлением первичного пучка ионов увеличивается после каждого столкновения, в последовательных

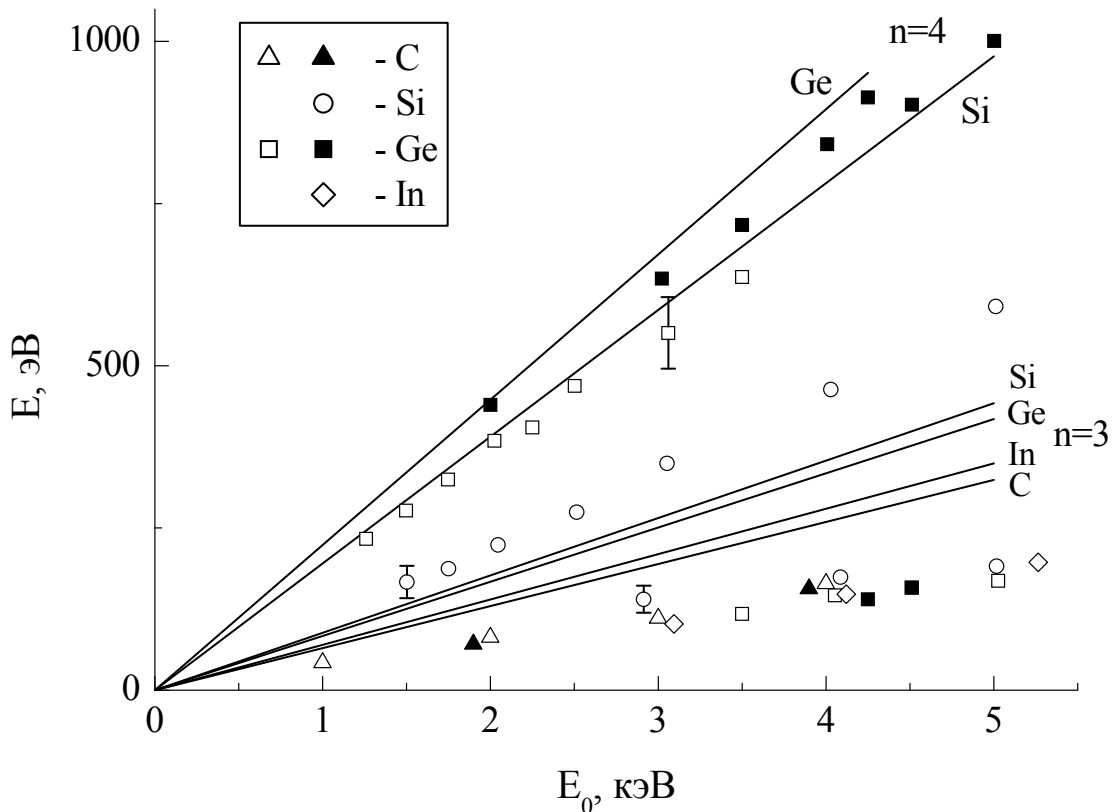


Рис. 4. Положение максимумов в ионных спектрах в зависимости от  $E_0$ . Значки – эксперимент. Пустые значки – данные для отрицательных ионов, сплошные – для положительных. Линии – расчет по формуле (2).

столкновениях атомов мишени между собой угол рассеяния частиц отдачи один и тот же. При сделанных допущениях получена следующая формула:

$$E_n = \frac{4 \cdot M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot \cos^2(\beta) \cdot \cos^{2(n-1)}\left(\frac{\theta - \beta}{n-1}\right) \cdot E_0, \quad (2)$$

где  $M_1$  – масса бомбардирующего иона,  $M_2$  – масса атома мишени,  $\beta$  – угол рассеяния частицы мишени в первом акте столкновения  $Ag+M \rightarrow M$ . При сравнении результатов расчета по формуле (2) с экспериментом необходимо принять во внимание, что формула написана для упругих соударений и, таким образом, дает завышенные значения энергий эмитированных частиц.

Энергии, рассчитанные по формуле для  $n=3$ , представлены на рисунке линиями. Разница между расчетными и экспериментальными данными в точности соответствует экспериментальной величине неупругой потери энергии  $Q/E_0=0.05$ . На рис. 4 также представлены экспериментальные энергии широких куполообразных распределений, обнаруженных в спектрах положительных и отрицательных частиц при больших энергиях, для мишеней из Si и Ge. Видно, что экспериментальные величины для германиевой мишени хорошо согласуются с зависимостью, рассчитанной для четырех

последовательных столкновений ( $n=4$ ). Существенное расхождение расчетных и экспериментальных энергий для четырехкратного рассеяния в случае кремниевой мишени может быть связано с различием траекторий движения частиц для существенно разных комбинаций партнеров соударения, и с бóльшим значением неупругой потери энергии из-за образования внутренней вакансии в атоме Si и последующего распада ее в результате оже-перехода.

Таким образом мы можем сделать вывод о том, что в работе обнаружены частицы мишени, рассеявшиеся на большие углы в результате трех- и четырехкратных соударений в твердом теле. Появление таких частиц можно объяснить селективирующей ролью поверхности твердого тела наподобие эффекта каналирования в кристаллах.

Перейдем к применению эффекта двукратного ионного рассеяния для диагностики твердых растворов SiGe, которые являются одним из перспективных материалов для применения в быстродействующей электронике. В то же время наличие кластеров Ge в растворе отрицательно сказывается на свойствах приборов.

Вначале для диагностики мы использовали традиционную спектроскопию медленных ионов, рассеянных на малые углы  $\sim 30^0$ . Идея метода состоит в следующем. Если образец SiGe содержит кластеры Ge, то в энергетическом спектре должен быть пик, отвечающий двукратному рассеянию бомбардирующих частиц на двух соседних атомах Ge. Долю атомов Ge содержащихся в твердом растворе в виде кластеров можно оценить сравнением относительной интенсивности пиков однократного и двукратного рассеяния ( $I_D^+/I_S^+$ ) для исследуемого образца с подобным отношением для чистого германия, который представляет собой стопроцентный кластер и используется как репер. К сожалению, в случае малоуглового рассеяния, выделить вклад двукратного рассеяния Ar на атомах Ge, нам удалось с очень невысокой точностью.

Выход из положения был найден путем перехода от спектроскопии ионов, рассеянных на малые ( $5 \div 30^0$ ) углы, к спектроскопии обратно рассеянных ионов ( $\theta=129^0$ ). С точки зрения диагностики кластеров Ge спектроскопия обратно рассеянных ионов дает следующие преимущества по сравнению с обычной спектроскопией ионов, рассеянных на малые углы:

Отсутствие в спектре ионов аргона  $Ar^+$ , рассеянных от кремниевых атомов, являющихся основной компонентой твердого раствора, т.к. критический угол рассеяния иона  $Ar^+$  на атоме Si равен  $44^0$ .

Отсутствие ионов отдачи  $Si^+$ , т.е. ионов матрицы, т.к. частицы отдачи вылетают под углами меньше  $90^0$ .

Практически полное отсутствие вклада от ионов  $Ar^+$ , последовательно рассеявшихся от Si и Ge атомов.

Выделение полезного сигнала также должно было улучшиться из-за того, что энергетический зазор ( $\Delta E/E_0$ ) между пиками однократного и двукратного рассеяния ионов  $Ar^+$  на атомах Ge возрастает с 0.05 до 0.13 при переходе от

угла наблюдения  $\theta=24^{\circ}$  к  $129^{\circ}$ . Отметим, что в последнем случае пики хорошо разделяются, и что более существенно, относительная интенсивность пиков однократного и двукратного рассеяния ( $I_D^+/I_S^+$ ) увеличивается в разы.

Образцы для исследования были предоставлены Институтом Роста Кристаллов (Institute of Crystal Growth, Berlin) и Центром физики наногетероструктур ФТИ. Проиллюстрируем результаты диагностики твердых растворов SiGe на конкретном примере.

На рис. 5 изображен используемый нами в качестве реперного энергетический спектр положительных ионов, эмитированных из чистого Ge при бомбардировке ионами  $Ar^+$ .

В спектре видны хорошо разделяющиеся пики однократного и двукратного рассеяния ионов  $Ar^+$  на атомах Ge. Широкое распределение, обозначенное MS, связано с многократными столкновениями в мишени, обнаруженными нами в настоящей работе. Крутая низкоэнергетическая часть спектра связана с распылением атомов мишени.

На рис. 6 изображен энергетический спектр положительных ионов, измеренный при бомбардировке образца SiGe. В этом спектре также видны хорошо разделяющиеся пики однократного и двукратного рассеяния ионов  $Ar^+$  на атомах Ge, с величиной  $I_D^+/I_S^+=0.44$ . Уменьшение отношения  $I_D^+/I_S^+$  с 2.34 для чистого Ge до 0.44 для исследуемого образца, связано с тем, что большинство атомов Ge в твердом растворе распределено равномерно, так что расстояние до второго атома Ge, на котором могло бы произойти повторное рассеяние иона Ar, велико. Отношение,  $[I_D^+/I_S^+(Si_{1-x}Ge_x)]/[I_D^+/I_S^+(Ge)]=0.19\pm 0.02$  дает оценку числа атомов Ge находящихся в растворе в виде кластеров. Следует отметить, что доля кластеров в 20% характерна для исследованных образцов.

В спектрах на рис. 5 и 6, правее пика двукратно рассеянных ионов  $Ar^+$  (DS) присутствуют ионы  $Ge^+$ , возникающие в результате четырех последовательных столкновений в твердом теле с участием атомов Ge (обозначены MS). Сравнение отношения интенсивности этого широкого распределения (MS) к интенсивности пика однократного рассеяния (SS) для мишеней из чистого Ge и твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$ , также может быть использовано для определения доли атомов германия, объединенных в кластеры (по аналогии с двукратным рассеянием). Экспериментальная величина отношения в этом случае  $0.18\pm 0.04$ , хотя и определенная с меньшей точностью, в пределах ошибки совпадает с долей кластеров, полученной из анализа интенсивностей двукратного и однократного рассеяния. Это является указанием на то, что кластеры достаточно большие  $\sim 100$  атомов, иначе мы бы не наблюдали четырехкратные столкновения.

Следует подчеркнуть, что аналогичные образцы, исследованные позднее независимым методом ЭПР в Лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках ФТИ, дали схожие цифры для доли кластерной фракции [4].

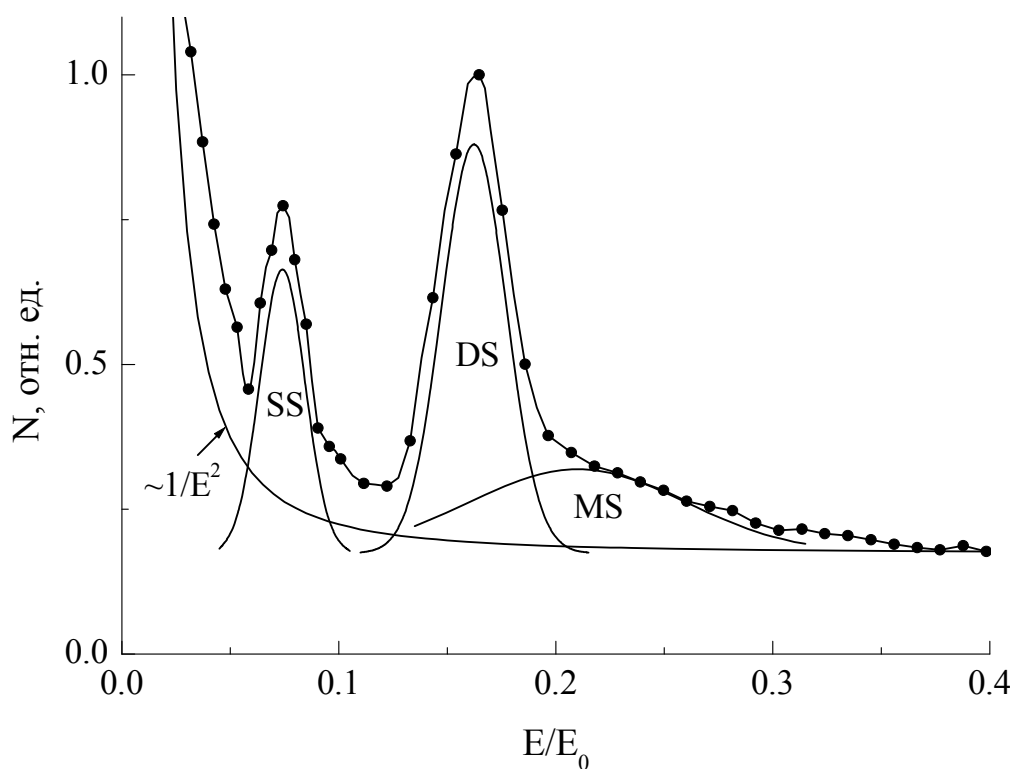


Рис. 5. Энергетический спектр ионов, эмитированных при бомбардировке мишени из Ge ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией  $E_0=3$  кэВ.

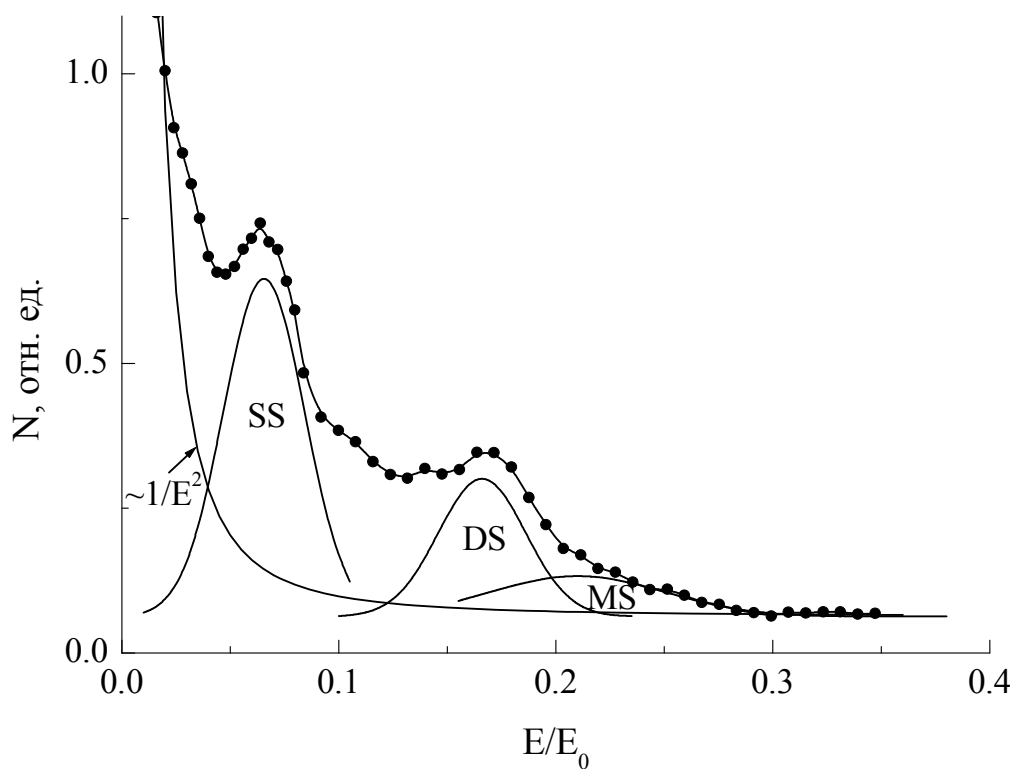


Рис. 6. Энергетический спектр ионов, эмитированных при бомбардировке образца  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x=5.8\%$ ) ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией  $E_0=4$  кэВ.

Нами также была продемонстрирована возможность диагностики тонких  $\sim 100$  нм пленок из SiGe. Исследование показало, что при используемой энергии налетающих ионов  $\text{Ar}^+$   $E_0=5$  кэВ и плотности тока  $j\sim 10$  мкА/см<sup>2</sup> пучок ионов  $\text{Ar}^+$  стравливает слой SiGe в 100 нм за время  $\sim 30$  минут. Этого времени с запасом хватает для проведения анализа образца.

Таким образом в работе предложен метод оценки концентрации кластерной фракции атомов Ge в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием германия ( $x\sim 5\%$ ). Метод основан на использовании спектроскопии медленных рассеянных ионов и эффекта двукратного ионного рассеяния. Показано, что метод спектроскопии медленных обратно рассеянных ионов обеспечивает хорошую точность и предел обнаружения.

## Заключение

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Измерены энергетические спектры частиц, эмитированных при ионной бомбардировке мишеней из Be, C, Al, Si, Ge и In. Диапазон энергий бомбардирующих ионов аргона  $\text{Ar}^+$   $E_0=1\div 5$  кэВ. Углы наблюдения  $\theta=5\div 30^\circ$  и  $129^\circ$  по отношению к направлению первичного пучка. Для "малых" углов измерены спектры положительно заряженных ионов (однократно и двукратно рассеянных ионов аргона и ионов отдачи). Для угла наблюдения  $129^\circ$  и мишеней из C, Si, Ge и In измерены спектры положительных ионов и отрицательно заряженных частиц (ионов и электронов).
2. Показано, что эффект двукратного рассеяния проявляется при работе с ионной компонентой рассеянных частиц, составляющей лишь малую долю в полном потоке рассеянных частиц, и подчиняется закономерностям, справедливым для нейтральных частиц. Это позволяет использовать анализ заряженной компоненты для диагностических целей.
3. В спектрах отрицательных и положительных ионов, рассеянных под большим ( $129^\circ$ ) углом к направлению первичного пучка, обнаружены частицы, эмитированные в результате трех- и четырехкратных столкновений в твердом теле. Эмиссия этих частиц может быть объяснена селективирующей ролью поверхности твердого тела, подобной эффекту каналирования в кристаллах.
4. Предложен метод определения доли кластеров в твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , основанный на спектроскопии медленных рассеянных ионов и эффекте двукратного ионного рассеяния. Разработана процедура количественной оценки доли кластеров Ge в образцах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .



5. Показано, что применение спектроскопии ионов, рассеянных назад для диагностики твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием примесных атомов Ge позволяет: уверенно выделять в энергетическом спектре пики одно- и двукратного рассеяния бомбардирующих ионов на атомах Ge. Точность определения доли кластеров Ge составляет 10%, а предел обнаружения кластерной фракции в исследуемых образцах 5%.
6. Показано, что метод спектроскопии медленных рассеянных ионов применим для диагностики элементных неоднородностей твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием германия, как в случае массивных образцов, так и тонких ( $\sim 100$  нм) пленок.

### Цитированная литература

1. Парилис Э. С., Тураев Н. Ю. К теории отражения ионов и атомов от поверхности твердого тела // Доклады АН СССР.– 1965.–Т. 161, №1.– С. 84–87.
2. Машкова Е. С., Молчанов В. А. Рассеяние ионов средних энергий поверхностями твердых тел.– М.: Атомиздат, 1980.– 256 с.
3. Шергин А. П., Шайкин А. В. Исследование столкновений ионов  $\text{Ne}^+$  и  $\text{Ar}^+$  с поверхностью Be, C, Al и Au методами электронной и ионной спектроскопии // Известия РАН (Сер. физ.).– 2002.–Т. 66, №4.–С. 467–471.
4. Вейнгер А. И., Забродский А. Г., Тиснек Т. В., Голощяпов С. И., Абросимов Н. В. Проявление в электронном парамагнитном резонансе эффекта кластеризации атомов Ge в сплавах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 < x < 0.057$ ) // Физика и техника полупроводников.– 2007.–Т. 41, №6.–С. 687–693.

### Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Шергин А. П., Бабенко П. Ю., Микушкин В. М. Исследование элементной неоднородности твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  методом спектроскопии медленных рассеянных ионов // Тез. докл. XVI Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП–2003.– Звенигород 2003.– т. 1.– с. 217–219.
2. Шергин А. П., Бабенко П. Ю., Микушкин В. М. Исследование элементной неоднородности твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  методом спектроскопии медленных рассеянных ионов // Известия РАН (Сер. физ.).– 2004.–Т. 68, №3.–С. 380–384.
3. Babenko P. Yu., Mikouskin V. M., Shergin A. P. Diagnostics of Ge clusters in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  alloy using the double ion scattering effect // 12-th International symposium, Nanostructures: Physics and Technology.– St.-Petersburg, Pushkin 2004.–p. 158–159.

4. Бабенко П. Ю., Шергин А. П. Эффект двукратного рассеяния и его использование для диагностики твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  // Тез. докл. XVII Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП–2005.– Звенигород 2005.– т. 1.– с. 221–223.
5. Бабенко П. Ю., Микушкин В. М., Шергин А. П. Эффект двукратного рассеяния и его использование для диагностики твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  // Журнал технической физики.–2005.–Т. 75, №12.–С. 82–88.
6. Бабенко П. Ю., Шергин А. П. Обнаружение эмиссии положительных и отрицательных ионов в результате трех– и четырехкратных столкновений в твердом теле при бомбардировке ионами аргона кэВ–энергий // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.–2006.–Т. 84, №7.– С. 451–454.
7. Бабенко П. Ю., Шергин А. П. Диагностика твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  методом спектроскопии медленных ионов, рассеянных назад // Письма в Журнал технической физики.–2007.–Т. 33, №9.–С. 37–43.
8. Бабенко П. Ю., Шергин А. П. Применение спектроскопии медленных обратно рассеянных ионов в фундаментальных и прикладных исследованиях (приглашенный доклад) // Тез. докл. XVIII Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП–2007.– Звенигород 2007.– т. 1.– с. 228–233.
9. Бабенко П. Ю., Шергин А. П. Спектроскопия медленных обратно рассеянных ионов для диагностики твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  // Тез. докл. XVIII Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП–2007.– Звенигород 2007.– т. 1.– с. 271–274.