

На правах рукописи

Паршин Анатолий Сергеевич

**СПЕКТРОСКОПИЯ НЕУПРУГО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ
СОЕДИНЕНИЙ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Красноярск – 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева)

Научный консультант

Пчеляков Олег Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом роста и структуры полупроводниковых материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Козаков Алексей Титович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, зав. отделом рентгеновской и электронной спектроскопии, зав. лабораторией физики поверхности и гетероструктур ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ФГАОУ ЮФУ)

Мягков Виктор Григорьевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатории физики магнитных пленок Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)

Коханенко Андрей Павлович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (НИ ТГУ)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ)

Защита состоится “15” ноября 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» по адресу: 664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 20

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета

Автореферат разослан “___” _____ 2017г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.074.04,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Б.В. Мангазеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время интенсивно ведутся работы по исследованию нового класса низкоразмерных полупроводниковых и магнитных материалов и разработке на их базе нового поколения приборов и устройств для нанофотоники, наноэлектроники и спинтроники.

Анализ энергетического распределения электронов, эмитированных поверхностью твердого тела, широко используется для исследования элементного состава и химических связей в современных методах анализа поверхности и наноструктур, таких как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), электронная Оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ).

Если в РФЭС и ЭОС рутинным стал количественный анализ элементного состава, химических связей элементов, распределения элементов по глубине, то методики количественного анализа в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов практически отсутствуют. Это связано со сложностью анализа спектров потерь отраженных электронов, состоящих, как правило, из большой группы неразрешенных по энергии пиков потерь энергии электронов различной природы, искаженных фоном неупругих электронов.

Прогресс намечался в 90-х годах прошлого столетия, когда несколько групп зарубежных исследователей стали активно разрабатывать теории взаимодействия низкоэнергетических электронов с твердым телом в рамках модели диэлектрического отклика.

Фундаментальной характеристикой взаимодействия электронного пучка с веществом является сечение неупругого рассеяния по потерям энергии, которое играет важную роль в количественном анализе с использованием различных методов электронной спектроскопии. Этот параметр определяет среднюю длину неупругого пробега электронов, фон электронных спектров, вклад поверхностных возбуждений в электронный спектр. Дважды дифференциальное сечение неупругого рассеяния электронов связано с комплексной диэлектрической проницаемостью материала.

На основе этих работ были разработаны алгоритмы расчета из экспериментальных спектров потерь энергии отраженных электронов спектров сечения неупругого рассеяния электронов (произведения дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов и средней длины неупругого рассеяния электронов в твердом теле). Анализ этих спектров позволяет развивать количественные методики анализа физико-химических свойств материалов, поскольку в них отсутствуют пики

кратных потерь и фон неупругих электронов, а интенсивности спектральных линий выражены в абсолютных единицах измерений.

Цели и задачи.

Целью работы является развитие и программная реализация нового подхода к количественному анализу элементного состава твердотельных наноструктур элементарных полупроводников, магнитных металлов и их соединений в рамках теории диэлектрического отклика сечения неупругого рассеяния электронов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие конкретные научно-технические задачи:

- разработать пакет компьютерных программ для моделирования на основе теории диэлектрического отклика спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов для композитных структур с произвольным соотношением концентраций компонентов, слоистых структур с произвольным количеством слоев, произвольной толщины и переменной концентрацией компонентов в каждом слое.
- провести комплексные экспериментальные исследования спектров сечения неупругого рассеяния электронов по потерям энергии для чистых полупроводников, металлов, их соединений, являющихся компонентами наногетероструктур на основе полупроводниковых материалов с целью выявления их особенностей и отличий;
- получить методами молекулярно-лучевой эпитаксии, термическим испарением в вакууме различные композитные, слоистые структуры с контролируемыми физико-химическими характеристиками;
- экспериментально исследовать спектры сечения неупругого рассеяния электронов по потерям энергии, фотоэлектронные и Оже-электронные спектры в полученных структурах в зависимости от технологических условий их формирования;
- проанализировать спектры сечения неупругого рассеяния отраженных электронов в полученных структурах с применением оригинальных методик компьютерного моделирования и разложения спектров на элементарные составляющие;

Научная новизна.

- Разработан пакет компьютерных программ для моделирования на основе теории диэлектрического отклика спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов. Программы позволяют моделировать спектры композитных структур с произвольным соотношением концентраций компонентов из известных диэлектрических функций составляющих материалов. Моделирование спектров сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых структурах (пленка-подложка, пленка-интерфейс-подложка), структур

- с произвольным количеством слоев, произвольной толщины и переменной концентрацией компонентов в каждом слое основывается на модифицированной модели количественного анализа рассеяния электронов на границе двух сред с разными диэлектрическими функциями.
- Разработана и апробирована на примере структуры диоксид кремния/кремниевая подложка методика послойного анализа слоистых структур базирующаяся на компьютерном моделировании в рамках теории диэлектрического отклика сечения неупругого рассеяния электронов многослойной структуры состоящей из различных материалов с произвольным количеством слоев, произвольной толщины и переменной концентрацией компонентов в каждом слое и сравнении результатов моделирования с экспериментальными спектрами, полученными при разных энергиях первичных электронов.
 - Проведены комплексные сравнительные исследования спектров характеристических потерь энергии отраженных электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов в элементарных полупроводниках (Si, Ge) и переходных металлах (Fe, Mn). Установлены отличительные особенности этих спектров, связанные с влиянием фона неупругих электронов и кратных потерь энергии на возбуждение объемных и поверхностных плазмонов.
 - Проведены экспериментальные исследования спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов в композитных структурах переходных металлов (Fe, Mn) и кремния. Впервые показана возможность определения элементного состава этих материалов из анализа спектров сечения неупругого рассеяния электронов.
 - Исследованы спектры сечения неупругого рассеяния электронов в германии и его твердых растворах с кремнием. Впервые обнаружено возрастание максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов германия и его соединений с кремнием для энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ. Показано, что абсолютная величина этого максимума пропорциональна содержанию Ge в твердом растворе Ge_xSi_{1-x} .
 - Проведены экспериментальные исследования спектров сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых структурах системы Fe-Si, полученных при различных технологических условиях. Сравнение экспериментальных спектров с расчетными для композитных и слоистых структур системы Fe-Si показало необходимость учета образования силицидов железа в исследованных структурах, синтезированных не только при высоких температурах, но и комнатной. Показана перспективность использования разработанной

- методики для количественного исследования механизмов образования силицидов в слоистых структурах системы кремний-железо.
- Разработана и апробирована методика разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si, Fe и Mn на элементарные составляющие в виде трехпараметрических функций универсальных сечений неупругого рассеяния электронов. Показано, что применение этой методики для спектров, полученных при разных энергиях первичных электронов, позволяет установить природу (объемную или поверхностную) каждого элементарного возбуждения в спектре. Разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные составляющие дает возможность более точного определения энергии объемного плазмона в образце, что является важным для количественного анализа элементного состава.
 - Впервые исследованы спектры сечения неупругого рассеяния электронов силицидов различного фазового состава. Изучены закономерности спектров, их особенности в сравнении со спектрами элементарных Si и Fe. Установлено, что при всех энергиях первичных электронов в интервале от 300 до 3000 эВ основной максимум в спектрах силицидов железа представляет собой суперпозицию неразрешенных по энергии пиков объемного и поверхностного плазмонов. Разложение спектров на элементарные составляющие позволило определить энергии объемного и поверхностного плазмонов в силицидах железа. Определены параметры диэлектрических функций различных фаз силицидов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Выбор материалов для исследований продиктован их практической значимостью для разработки принципиально новых устройств нанофотоники и спинтроники.

Разработанные и апробированные новые методики анализа физико-химических свойств композитных и слоистых наноструктур полупроводниковых и магнитных материалов с использованием спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов позволяют существенно повысить контроль качества технологических процессов формирования наногетероструктур для практического использования в устройствах и приборах нового поколения.

Представленные в работе новые подходы и методики исследования полупроводниковых и магнитных материалов могут быть распространены на широкий круг материалов, имеющих большое значение для фундаментальной науки и перспективы практического использования в наукоемких технологиях.

Представленные в диссертационной работе результаты исследований были выполнены в рамках проектов ФЦП «Научные и научно-

педагогические кадры инновационной России», АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» и др.

Материалы, представленные в диссертации, использованы при подготовке курсов лекций «Физика поверхности и границ раздела» и «Электронная спектроскопия поверхности твердых тел», читаемых автором на протяжении многих лет, студентам старших курсов направления «Физика» Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева.

Методология и методы исследования.

Образцы для исследования были получены на современных технологических установках методами молекулярно-лучевой эпитаксии, термического испарения в условиях высокого и сверхвысокого вакуума.

Все экспериментальные результаты были получены с использованием современного аналитического оборудования: сверхвысоковакуумных электронных спектрометров, реализующих различные методы электронной спектроскопии, сканирующих зондовых микроскопов, аппаратуры для исследования малоуглового рентгеновского рассеяния и др.

Численное моделирование спектров сечения неупругого рассеяния электронов из диэлектрических функций составляющих структуры материалов проводилось в программных пакетах, реализованных на языке программирования C⁺⁺. Обработка экспериментальных спектров проводилась с использованием лицензионных программных пакетов QUASES[™] XS REELS (Quantitative Analysis of Surfaces by Electron Spectroscopy cross section determined by REELS), CASA XPS (Computer Aided Surface Analysis for X-ray Photoelectron Spectroscopy), OriginPro 8.5.1.

Положения, выносимые на защиту

1. Новый подход в количественном анализе элементного состава твердотельных наноструктур, заключающийся в моделировании в рамках теории диэлектрического отклика дифференциального сечения неупругого рассеяния отраженных электронов.
2. Для двухкомпонентных композитных структур Fe_xSi_{1-x} и Mn_xSi_{1-x} установлены в первом приближении линейные зависимости максимумов спектров сечения неупругого рассеяния электронов от атомных концентраций составляющих компонентов. Для исследованных структур максимум спектров можно рассматривать как параметр, определяющий атомные концентрации компонентов.
3. Методика послойного анализа многослойных многокомпонентных структур, заключающаяся в том, что экспериментальные спектры сечения неупругого рассеяния электронов, полученные при разных

значениях энергии первичных электронов, и, следовательно, для разной глубины анализа, сравниваются с модельными спектрами, рассчитанными для слоистой структуры, состоящей из произвольного числа дискретных слоев, в каждом из которых варьируются концентрации исходных компонентов. Распределение элементов по глубине определяется наилучшим совпадением экспериментальных и модельных спектров для всех энергий первичных электронов, т.е. для разных глубин анализа. Методика апробирована на примере слоистой структуры диоксид кремния/кремний и слоистых структур железо-кремний.

4. Впервые зарегистрированный эффект возрастания максимума произведения дифференциального сечения неупругого рассеяния и длины неупругого пробега электронов в твердых растворах Ge и Si при энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ, величина которого пропорциональна содержанию Ge. Этот эффект может быть использован для количественного анализа элементного состава системы Ge_xSi_{1-x} .
5. Установлены закономерности образования различных фаз силицидов железа при формировании слоистых структур Fe/Si, полученных при различных температурах роста в условиях сверхвысокого вакуума с использованием результатов компьютерного моделирования дифференциального сечения неупругого рассеяния отраженных электронов.
6. Методика изучения тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов, заключающаяся в разложении этих спектров на элементарные пики в виде универсальных функций сечения неупругого рассеяния электронов Тоугарда, позволяющая более точно, чем в СХПЭЭ определить энергии потерь объемных и поверхностных плазмонов и их интенсивности, природу различных элементарных пиков потерь. Применение этой методики для анализа спектров различных силицидов железа, в которых пики объемных и поверхностных плазмонов не разрешены по энергии позволило разделить вклады объемных и поверхностных возбуждений в этих материалах.

Степень достоверности и апробация результатов.

Научная обоснованность выводов, изложенных в диссертационной работе, обеспечивается использованием апробированных методик проведения экспериментов и обработки экспериментальных результатов, непротиворечивостью результатов, полученных различными методами. Достоверность экспериментальных результатов, представленных в диссертационной работе, определяется использованием современного

технологического и экспериментального оборудования, использованием лицензионных пакетов компьютерных программ.

Основные результаты работы были представлены на региональных, российских и международных конференциях, среди которых:

- XIX, XX, XXI Международные школы-семинары “Новые магнитные материалы микроэлектроники”, Москва, 2004; Москва, 2006; Москва, 2009;
- I, IV Euro-Asian Symposiums “Trends in MAGnetism” EASTMAG-2004, Krasnoyarsk, 2004, EASTMAG-2010, Ekaterinburg, 2010;
- II, III, Российские совещания по росту кристаллов и пленок кремния и исследованию их физических свойств и структурного совершенства, Кремний 2004, Иркутск, 2004, Кремний 2006, Красноярск, 2006;
- III International Conference “Fundamental Problems of Physics”, Kazan, 2005;
- VII, XII Российские конференции по физике полупроводников, Москва 2005, Ершово 2015;
- X, XV Международные симпозиумы «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород 2006, 2011;
- X, XIII, XVIII, XIX, XX, Международные научные конференции, посвященные памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения», Красноярск 2006, 2009, 2014, 2015, 2016;
- International Conferences “Functional Materials” ICFM-2007, ICFM-2011, ICFM-2013, Ukraine, Krimea, Partenit, 2007, 2011, 2013;
- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Moscow 2008;
- 3rd International Conference “Physics of electronic materials” Kaluga 2008;
- Workshop "Trend in nanomechanics and nanoengineering" Krasnoyarsk, 2009;
- II, III Международные симпозиумы «Нанотехнологии, энергетика и космос» Черногловка, Россия 2011, Алматы, Казахстан 2013;
- Конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур, Новосибирск 2014;
- Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2015», Новосибирск 2015.
- Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке». Москва, 2015.
- Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». Санкт-Петербург, 2016.
- XI Конференция и X Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе – Кремний-2016, Новосибирск, 2016.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 56 печатных трудах. Из них 23 статьи опубликованы в российских рецензируемых журналах, журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и перечень ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты, полученные в диссертационной работе, вошли в материалы учебного пособия «Электронная спектроскопия поверхности твердых тел». Список основных публикаций автора по теме диссертационной работы приведен в конце диссертации.

Личный вклад автора заключается в выборе направления исследований, постановке задач, выборе концепции проведения экспериментов. Автору принадлежит решающая роль в анализе результатов и их обобщении. Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены автором лично, либо под его научным руководством аспирантами и сотрудниками Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 319 страниц. Диссертация содержит 139 рисунков и 30 таблиц. Список цитируемой литературы включает 193 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния исследований в области электронной спектроскопии поверхности твердых тел. Приведен обзор физических принципов, лежащих в основе современных методов исследования, обладающих высокой поверхностной чувствительностью: фотоэлектронной спектроскопии, электронной Оже-спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов.

Значительное внимание уделено анализу влияния неупругого рассеяния электронов в приповерхностной области твердого тела на количественный анализ в электронной спектроскопии. Приведен обзор экспериментальных и теоретических работ, обосновывающих возможность вычисления из экспериментальных спектров потерь энергии отраженных неупругих электронов произведения сечения неупругого рассеяния

электронов и средней длины неупругого пробега. Зависимость этого произведения от энергии потерь, можно рассматривать как спектр сечения неупругого рассеяния электронов, поскольку средняя длина неупругого пробега электронов практически не изменяется в небольшом интервале (приблизительно 50 эВ) энергетических потерь.

Представлен обзор литературы по теоретическим работам, использующих теорию диэлектрического отклика для вычислений из диэлектрической функции материала функцию потерь и сечение неупругого рассеяния электронов в различных средах.

По результатам анализа литературных данных обосновывается вывод о возможности использования спектров сечения неупругого рассеяния электронов для количественного анализа элементного состава, распределения элементов по глубине многокомпонентных композитных и слоистых структур с применением компьютерного моделирования этих спектров из диэлектрических функций составляющих материалов.

Во **второй главе** представлены краткие сведения о спектрометрах, технологических установках и экспериментальных методиках, используемых при выполнении диссертационной работы.

Раздел 2.1 посвящен описанию сверхвысоковакуумных электронных спектрометров, используемых при выполнении работы для регистрации электронных спектров.

Основные эксперименты по электронной спектроскопии были проведены на сверхвысоковакуумном фотоэлектронном спектрометре «SPECS» Центра коллективного пользования Красноярского научного центра СО РАН. Получение и исследование композитных структур систем Fe-Si и Mn-Si выполнены с использованием сверхвысоковакуумного электронного спектрометра фирмы RIBER LAS-2000 Центра коллективного пользования «Наноструктуры» («Технологии наноструктурирования полупроводниковых, металлических, углеродных, биоорганических материалов и аналитические методы их исследования на наноуровне») при Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. Ряд экспериментов с многослойными структурами Fe/Si были проведены с помощью электронного спектрометра 09ИОС-03, встроенного в сверхвысоковакуумный многомодульный технологический комплекс «АНГАРА» Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН. Комплекс разработан и изготовлен в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН.

Эксперименты по изучению поверхностных возбуждений и контролю термической очистки кремниевых подложек проведены на базе комплекса аппаратуры по исследованию вторично-эмиссионных свойств поверхности твердых тел кафедры технической физики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Комплекс изготовлен на кафедре Физической

электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

В **разделе 2.2** представлены характеристики технологических установок, используемых для изготовления исследуемых образцов.

Наногетероструктуры элементарных полупроводников Si и Ge и их твердых растворов получены на многокамерных комплексах молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) «Катунь 100», разработанных и изготовленных в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН.

Получение слоистых структур системы железо-кремний осуществлялось методом термического испарения в сверхвысоком вакууме на многомодульном технологическом комплексе «АНГАРА», оснащенном электронным спектрометром с энергоанализатором типа цилиндрическое зеркало 09ИОС-03, в Институте физики имени Л.В. Киренского СО РАН. Регистрация Оже-электронных спектров и спектров характеристических потерь энергии электронов осуществлялась *in situ* непосредственно в сверхвысоковакуумной камере комплекса.

Для формирования поликристаллических пленок металлов большой толщины на кремниевых подложках и получения слитков силицидов переходных металлов использовалась установка вакуумного напыления УВН-2М-1 лаборатории физики магнитных пленок Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

В заключительном **разделе 2.3** главы обсуждены возможности лицензионных программных продуктов, которые были использованы для обработки экспериментальных спектров потерь энергии отраженных электронов, рентгеновских фотоэлектронных и электронных Оже-спектров.

Для математической обработки экспериментальных спектров потерь энергии отраженных электронов с целью вычисления зависимости произведения средней длины неупругого пробега и дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов от энергии потерь (спектров сечения неупругого рассеяния электронов) использовался программный пакет QUASES™ XS REELS (Quantitative Analysis of Surfaces by Electron Spectroscopy cross section determined by REELS).

Рентгеновские фотоэлектронные спектры обрабатывались с помощью программы обработки данных CasaXPS и базы данных элементной чувствительности для используемого в спектрометре SPECS анализатора, которые входят в состав программно-аппаратного комплекса прибора

В **третьей главе** представлены результаты разработки пакета компьютерных программ моделирования сечения неупругого рассеяния отраженных электронов в рамках теории диэлектрического отклика и определения параметров диэлектрической функции из экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния.

В разделе 3.1 изложен алгоритм расчета в модели Юберо-Тоугаарда (Yubero-Tougaard) взаимодействия электрона с веществом с известной диэлектрической функцией при пересечении им границы полубесконечной среды. В простейшей геометрии экспериментов в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов быстрый электрон прилетает из вакуума ($x = -\infty$) со скоростью v и энергией E_0 в полубесконечную среду и пересекает поверхность в точке $x = 0$. Электрон зеркально отражается на глубине $x = a$ среды и затем покидает твердое тело в отрицательном направлении оси x . Эффективное дифференциальное сечение неупругого рассеяния электрона с энергией E_0 и потерявшего энергию $\hbar\omega$ после прохождения в твердом теле пути x_0

$$K_{eff}(E_0, \hbar\omega, x_0) = \frac{-2e^2}{\hbar^2 v^2 \pi} \operatorname{Re} \left\{ i \int dk_{\perp} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \frac{k_{\perp}}{k_{\perp}^2 + y^2} \right\} + \frac{-2e^2}{\hbar^2 v \omega \pi} \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left\{ i \int dk_{\perp} \frac{k_{\perp}^2}{(k_{\perp}^2 + y^2)^2} \times \left[8yk_{\perp} \cos(ya) e^{-k_{\perp}a} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon(1+\varepsilon)} + (k_{\perp}^2 - y^2) \right] \right. \quad (1) \\ \left. \times \sin(2ya) \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) - 2yk_{\perp} e^{-2k_{\perp}a} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon(1+\varepsilon)} - 2yk_{\perp} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \left(1 + 2\cos^2(ya) \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \right\}$$

Здесь ε – комплексная диэлектрическая функция материала, k_{\perp} – перпендикулярная границы раздела компонента волнового вектора, $y = \omega/v$.

По своему физическому смыслу $K_{eff}(E_0, \hbar\omega, x_0)$ определяет вероятность того, что электрон потеряет энергию $\hbar\omega$ на единицу потери энергии на всем пути x_0 .

Для сравнения с экспериментальными результатами необходимо проинтегрировать эффективное дифференциальное сечения рассеяния электрона по всем возможным траекториям. Если предположить, что неупругие рассеяния независимы, то вероятность рассеяния на пути, пройденном электроном, дается распределением Пуассона и тогда сечение однократного рассеяния $K_{sc}(E_0, \hbar\omega)$, усредненное по всем траекториям электронов,

$$K_{sc}(E_0, \hbar\omega) = \frac{1}{\lambda^2} \int_0^{\infty} x e^{-x/\lambda} K_{eff}(E_0, \hbar\omega, x) dx. \quad (2)$$

Комплексная диэлектрическая функция среды, согласно модели Друде-Линдхарда, представлена в расчетах в виде суперпозиции лоренцовых осцилляторов, каждый из которых имеет свою собственную частоту ω_i , силу A_i и коэффициент затухания γ_i :

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \sum_i \frac{A_i}{(\omega_i + k^2 / 2)^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_i}. \quad (3)$$

Число осцилляторов, частота, сила и коэффициент затухания каждого из них обычно определяют из оптических данных или экспериментов по неупругому рассеянию электронов.

В диссертационной работе эта модель была развита для структуры пленка-подложка, композитной структуры, состоящей из нескольких материалов с различными диэлектрическими функциями, слоистых структур с произвольным количеством слоев разных материалов. В наиболее общем случае пакет программ позволяет моделировать сечение неупругого рассеяния электронов в многослойной структуре с произвольным количеством слоев произвольной толщины, в каждом из которых может варьироваться состав.

Раздел 3.2 посвящен описанию модифицированной модели Юберо-Тоугаарда для расчета сечения неупругого рассеяния при рассеивании электронов в неоднородных слоистых структурах: пленка-подложка, пленка-интерфейс-подложка, островковая пленка.

При расчете сечения неупругого рассеяния в таких структурах исходили из того, что вклад в сечение неупругого рассеяния электронов, потерявших энергию в результате неупругого взаимодействия на определенном расстоянии x от поверхности слоистой структуры, определяется диэлектрическими свойствами среды в данной области структуры с соответствующей весовой функцией. Это справедливо, если размеры частиц, из которых состоит неоднородная среда, сравнимы или больше длины неупругого пробега электрона. В этом случае электрон испытывает хотя бы одну потерю в среде с соответствующими диэлектрическими свойствами.

При этих предположениях интегральное сечение однократного неупругого рассеяния в структуре, состоящей из тонкой пленки, нанесенной на подложку из материала с другими диэлектрическими свойствами, будет суммой эффективных сечений в пленке и подложке:

$$\begin{aligned} \lambda K_{sc}(E, \hbar\omega) = & \frac{1}{\lambda_f} \int_0^{2d} x \exp(-x/\lambda_f) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_f) dx + \\ & + \frac{1}{\lambda_s} \int_{2d}^{\infty} x \exp(-x/\lambda_s) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_s) dx \end{aligned} \quad (4)$$

где индексы f и s относятся соответственно к длине свободного неупругого пробега и диэлектрической функции для верхнего слоя (пленки) и подложки; d – толщина пленки.

Этот подход был развит нами для трехслойной модели пленки, которая более полно отражает реальные структуры, сформированные при различных механизмах роста пленки на подложках, учитывающей взаимную диффузию материала пленки и подложки, а также островковый рост пленки (рисунок 1).

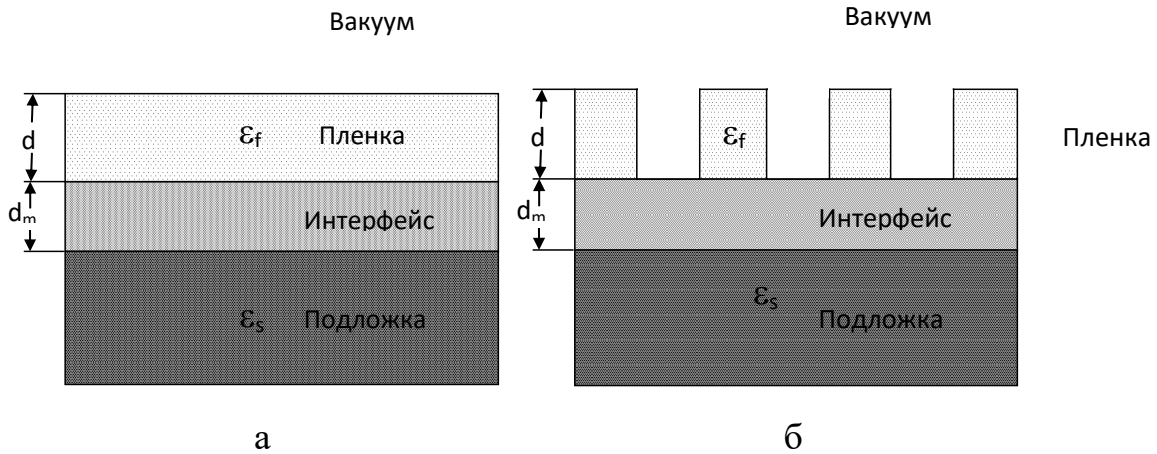


Рисунок 1. Трехслойные структуры для сплошной (а) и островковой (б) пленок

В модели используются три варианта распределения элементов пленки и подложки в интерфейсе, которые описываются функцией распределения компонентов $M(x)$: объемная доля материала пленки в интерфейсе постоянна по глубине; линейная зависимость материала пленки и подложки в интерфейсе; экспоненциальное изменение содержания материалов.

Для такой модели трехслойной структуры

$$\begin{aligned}
 \lambda K s c_i(E, \omega) = & \frac{1}{\lambda_f} \int_0^{2d} x \exp(-x/\lambda_f) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_f) dx + \\
 & + \int_{2d}^{2(d+dm)} \left[\frac{x \exp(-x/\lambda_f) M(x) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_f)}{\lambda_f} + \right. \\
 & \left. + \frac{x \exp(-x/\lambda_s)(1 - M(x)) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_s)}{\lambda_s} \right] dx \quad (5) \\
 & + \frac{1}{\lambda_s} \int_{2(d+dm)}^{\infty} x \exp(-x/\lambda_s) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_s) dx
 \end{aligned}$$

Первый интеграл описывает неупругое рассеяние электронов в пленке, второй - в интерфейсе с заданной функцией распределения компонентов пленки и подложки $M(x)$ и третий - в подложке.

Если верхний слой структуры представляет собой островковую пленку (рисунок 1б) с высотой прямоугольных островков d и отношением площади, занимаемой островками к общей площади слоистой структуры θ (степень заполнения поверхности островками), то доля электронов, испытавших процессы неупругого рассеяния с потерей энергии в подложке, интерфейсе и пленке будет равна θ . Остальная $(1-\theta)$ часть электронов не взаимодействует с материалом пленки и потери энергии электронов происходят только в подложке и интерфейсе. В этом случае расчет интегрального сечения неупругого рассеяния производится по формуле:

$$\lambda K_{sc_{isl}}(E, \omega) = \lambda K_{sc_i}(E, \omega) - (1-\theta) \frac{1}{\lambda_f} \int_0^{2d} x \exp(-x/\lambda_f) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_f) dx. \quad (6)$$

В разделе 3.3 представлена компьютерная программа MLCS (Multi-layered cross-sections) предназначенная для расчета интегрального сечения неупругого рассеяния электронов в трехслойных структурах, где верхний слой может быть как в виде сплошной пленки, так и в виде островков, а промежуточный слой может состоять частично из материалов верхнего и нижнего слоев.

Входными параметрами являются энергия первичных электронов, толщина пленки, толщина промежуточного слоя, степень покрытия островков (в случае модели с островками), длины свободного неупругого пробега электронов в пленке и подложке, параметры диэлектрических функций материалов пленки и подложки, максимальное значение $\hbar\omega$ рассчитываемых значений потерь энергии. На первом этапе рассчитываются, с использованием заданных параметров A_i, ω_i, γ_i , диэлектрические функции материалов пленки и подложки. Затем, с заданным шагом и в заданном диапазоне рассчитывается эффективное сечение неупругого рассеяния электронов в верхнем и нижнем слое как функция потери энергии электронов. Из полученных эффективных сечений, а также с учетом толщины пленки d , в итоге определяется произведение длины неупругого свободного пробега и сечения неупругого рассеяния электронов в трехслойной структуре. Результаты могут быть выведены на экран и сохранены в текстовом файле для дальнейшей обработки.

Раздел 3.4 посвящен описанию компьютерной программы расчета из экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов параметров осцилляторов диэлектрической функции в представлении Друде-Линдхарда.

Для расчета параметров диэлектрической функции материала в программу необходимо ввести определенную из эксперимента зависимость произведения сечения неупругого рассеяния и длины

неупругого свободного пробега электронов в данном материале от энергии потерь ($K\lambda(\hbar\omega)$). Входными параметрами являются также энергия первичных электронов и длина неупругого свободного пробега электронов в материале.

Расчет параметров диэлектрической функции сводится к минимизации функции $D(A, \gamma, \omega)_n = \sum [K_m(\omega_i) - K_i(\omega_i)]^2$, где $K_m(\omega_i)$ – модельное сечение неупругого рассеяния (рассчитывается согласно модели Юберо-Тоугаарда), ω_i и $K_i(\omega_i)$ – массивы с экспериментальными значениями потерь энергии и соответствующими им значениями сечения неупругого рассеяния. n – число осцилляторов.

В заключительном **разделе 3.5** главы представлена программа, моделирующая наиболее общий случай распределения компонентов в многослойной структуре с произвольным числом слоев.

Сечение неупругого рассеяния в такой структуре:

$$\lambda K_{sc}(E, \hbar\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{nv} \frac{V_j}{\lambda_i} \int_{di}^{di+Di} x \exp(-x/\lambda_i) K_{eff}(E, \omega, x, \varepsilon_j) dx, \quad (7)$$

где суммирование по i идет по слоям ($i = 1$ для самого верхнего слоя и $i = n$ для самого нижнего слоя, т.е. подложки). Суммирование по j идет по материалам компонентов отдельного слоя. V_j – объемная доля компонента j . Нижний предел интегрирования di соответствует удвоенному расстоянию от поверхности структуры до начала i -го слоя ($d0=0$), верхний предел интегрирования равен $di + Di$, где Di – удвоенная толщина i -го слоя (Dn равно бесконечности).

Программная реализация этого алгоритма расчетов аналогична предыдущим реализациям программ для слоистых структур, только в данном случае нет привязки к числу слоев, и сечение неупругого рассеяния электронов может быть задано суммой произвольного количества численных интегралов, число которых соответствует количеству слоев в моделируемой структуре.

В **главе 4** приведены результаты исследования тонких пленок диоксида кремния на кремнии с использованием новой методики определения элементного состава, толщины пленки на подложке с другими диэлектрическими параметрами, распределения элементов по толщине слоистой структуры путем сравнения модельных и экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов.

В **разделе 4.1** приведены результаты детального анализа образцов монокристаллического кремния и диоксида кремния методами СХПЭЭ, РФЭС, ЭОС.

Сложная тонкая структура спектров характеристических потерь энергии электронов исследована после численного дифференцирования

исходных спектров. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с многочисленными литературными данными.

В разделе 4.2 представлен детальный сравнительный анализ спектров сечения неупругих электронов эталонных образцов кремния и диоксида кремния.

Положение основного максимума в спектрах сечения неупругого рассеяния электронов в SiO_2 , в отличие от Si , для представлений спектров, как в интегральной, так и в дифференциальной формах, заметно смещается в сторону высоких энергий потерь с возрастанием энергии первичных электронов. Смещение результирующего максимума в спектре можно связать с изменением относительных интенсивностей близко расположенных отдельных пиков различной природы (объемной или поверхностной) при возрастании энергии первичных электронов. Интенсивности объемных и поверхностных потерь ведут себя противоположным образом с изменением энергии первичных электронов и, как следствие, с изменением глубины анализа.

В разделе 4.3 приведены результаты компьютерного моделирования спектров сечения неупругого рассеяния эталонных образцов Si и SiO_2 и определения параметров осцилляторов Друде-Линдхарда этих материалов. Параметры диэлектрических функций кремния и диоксида кремния определены для 5 энергий первичных электронов 300, 600, 1200, 1900 и 3000 эВ.

Раздел 4.4 посвящен результатам компьютерного моделирования спектров сечения неупругого рассеяния электронов в двухслойных структурах пленки диоксида кремния на кремниевой подложке. Представлены результаты, полученные для 3 образцов с толщинами пленки SiO_2 1.8, 3.2 и 7 нм.

Соотношение между концентрациями диоксида кремния и кремния для образца толщиной 7 нм было определено разложением фотоэлектронного спектра Si 2p на составляющие. Эффективные концентрации Si и SiO_2 в приповерхностном слое структуры $\text{SiO}_2(7 \text{ нм})/\text{Si}(001)$ толщиной сравнимой с глубиной анализа в фотоэлектронной спектроскопии определены также моделированием спектров сечения неупругого рассеяния электронов с помощью программы MLCS (Multi Layered Cross Section). Предполагалось однородное распределение кремния и диоксида кремния по толщине приповерхностного слоя. Эффективные концентрации Si и SiO_2 в приповерхностном слое выбирались те, для которых получено наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных спектров. Получены сопоставимые количественные результаты, что свидетельствует о правильности выбранной модели расчета спектров сечения неупругого рассеяния электронов из теории диэлектрического отклика.

На следующем этапе проведена апробация предложенной методики определения толщины пленки для структуры пленка SiO_2 на монокристаллической кремниевой подложки кристаллографической ориентации (001). Толщина слоя диоксида кремния по данным эллипсометрических измерений составляла 1.8 нм.

Для определения толщины пленки диоксида кремния в структуре по результатам спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов проведено моделирование $K\lambda$ -спектров в предположении совершенной границы раздела пленка-подложка. При вычислениях использовались параметры осцилляторов Друде-Линдхарда полученные для эталонных образцов Si и SiO_2 . Толщина слоя диоксида определялась из условия совпадения максимальных расчетных и экспериментальных значений спектров сечения неупругого рассеяния электронов, как наиболее чувствительного параметра к изменению толщины слоя диоксида кремния. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Определение толщины слоя SiO_2 из сравнения экспериментальных и расчетных спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов

Энергия электронов, эВ	$\lambda_{K_{\max}}$, эВ ⁻¹	Толщина SiO_2 , нм
600	0.0482	1.80
1200	0.0635	2.00
1900	0.0744	2.25
3000	0.0862	2.35
Среднее значение		2.1 ± 0.2

Получено удовлетворительное согласие результатов моделирования с эллипсометрическими данными, однако заметно монотонное увеличение эффективной толщины слоя диоксида с возрастанием энергии первичных электронов и, следовательно, глубины анализа. Это может быть связано, например, с неоднородным распределением диоксида кремния по толщине структуры.

В разделе 4.5 представлены результаты послойного анализа распределения диоксида кремния по толщине в структуре $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ с толщиной пленки диоксида кремния 3.2 нм.

В основе количественного послойного анализа слоистых структур лежит тот факт, что вклад в итоговое однократное сечение неупругого рассеяния электронов, достигших разной глубины от поверхности структуры определяется распределением Пуассона. Это распределение зависит от длины свободного неупругого пробега электронов λ , которая существенно возрастает с увеличением энергии электронов. Следовательно, варьируя энергию первичных электронов, можно менять вклад электронов в спектр потерь энергии отраженных электронов, рассеянных на разных глубинах структуры. Максимальный вклад в итоговое однократное сечение неупругого рассеяния вносят электроны, рассеянные на глубине, равной половине длины свободного неупругого пробега электронов для соответствующей энергии. Максимальная глубина анализа при увеличении энергии электронов от 300 до 3000 эВ увеличивается более чем в 5 раз. Из этого анализа следует, что при

неоднородном распределении диоксида кремния в приповерхностном слое кремниевого образца эффективная толщина пленки SiO₂, определяемая в модели резкой границы пленка SiO₂ – подложка Si, будет существенно зависеть от выбора энергии первичных электронов.

На основе компьютерной программы моделирования спектров сечения неупругого рассеяния многослойных структур, разработан алгоритм моделирования спектров для слоистых структур с произвольным количеством слоев, произвольной толщиной каждого слоя и переменной концентрацией компонентов в каждом слое (рисунок 2).

На первом этапе расчета загружаются экспериментальные спектры сечения неупругого рассеяния (λK – спектры) для определенных энергий первичных электронов E_{0i} (i – номер спектра). Затем задается сценарий расчетов, в котором указывается общее число экспериментальных спектров m , число слоев в моделируемой структуре k , толщина каждого слоя d_n (n – номер



Рисунок 2. Алгоритм расчета профиля концентрации

слоя), объемные доли V_{jn} каждого компонента j в слое n . В каждом слое имеется возможность задавать различные распределения компонентов по толщине слоя. При однородном распределении объемная доля каждого компонента остается постоянной по толщине слоя. Возможно задание линейного и экспоненциального распределений с различным показателем экспоненты. Причем в каждом слое начало распределения согласуется с конечным значением предыдущего слоя, а конец – с началом следующего слоя. При задании распределения в виде функции соответствующий слой разбивается на 10 подслоев.

За критерий согласия между расчетом и экспериментом выбрана сумма квадратов разностей между максимальными значениями экспериментальных λK_{max}^{exp} и расчетных λK_{max}^{mod} спектров. Суммирование производится по экспериментальным спектрам для всех энергий первичных электронов. Процедура вычисления повторяется необходимое число раз с измененными параметрами сценария, касающимися распределения концентраций компонентов в каждом слое заданной толщины или толщины слоя интерфейса с функциональным распределением в нем концентраций компонентов пленки и подложки. Из полученного массива сумм квадратов разностей между максимальными значениями экспериментальных и расчетных спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов выбирается наименьшее значение, которое и определяет профиль распределения компонентов в исследуемой структуре.

На рисунке 3 слева показана моделируемая структура пленки диоксида кремния с эффективной толщиной 3,2 нм на кремниевой

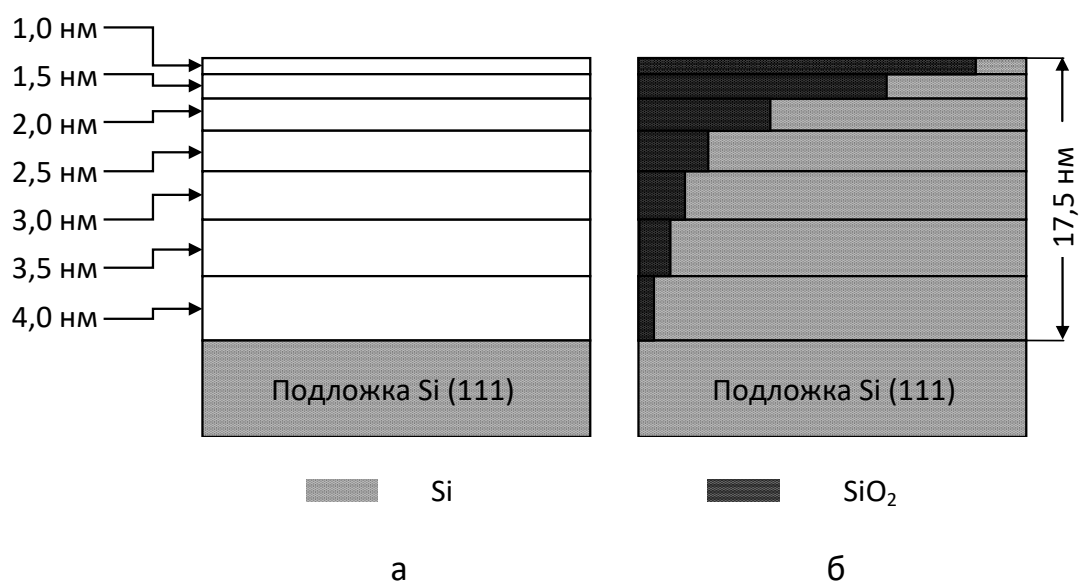


Рисунок 3. Моделируемая структура а) и расчетные профили концентраций для SiO₂(3,2 нм) /Si(111) б).

подложке. Путем варьирования объемных долей кремния и диоксида кремния в каждом слое, в предположении, что в пределах каждого слоя она однородна, находили распределение компонентов по толщине с наименьшим значением $\sum_i (\lambda K_{max}^{exp} - \lambda K_{max}^{mod})^2$. На рисунке 3б представлено определенное по этому алгоритму распределение объемных концентраций компонентов.

В главе 5 представлены результаты исследований методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов (характеристических потерь энергии и сечения неупругого рассеяния электронов) двухкомпонентных структур Fe_xSi_{1-x} , Mn_xSi_{1-x} и Ge_xSi_{1-x} с различными соотношениями составляющих компонент с целью изучения возможности нового подхода в количественном анализе двухкомпонентных систем из вычисленных по экспериментальным спектрам характеристических потерь энергии отраженных электронов произведений средней длины неупругого пробега и дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов.

Раздел 5.1 посвящен результатам исследования спектров потерь энергии отраженных электронов системы Fe_xSi_{1-x} . Образцы получены совместным испарением Fe и Si на кремниевую подложку в условиях сверхвысокого вакуума в камере приготовления образцов электронного спектрометра LAS-2000. Состав пленок варьировался путем изменения скорости напыления Fe при постоянной скорости напыления Si. Атомные концентрации определены из экспериментальных дифференциальных Оже-спектров методом коэффициентов элементной чувствительности.

Максимальные значения зависимостей $\lambda K(T)$ в спектрах сечения неупругого рассеяния отраженных электронов, которые являются количественной мерой вероятности потерять энергию (на единицу энергии), при энергии потерь соответствующей максимуму, при однократном рассеянии, т.е. при прохождении электроном расстояния, равном средней длине неупругого пробега, для кремния и железа существенно отличаются. Поскольку эти максимальные значения λK_{max} определяются из спектров сечения неупругого рассеяния электронов в абсолютных, а не в относительных единицах, как в спектрах характеристических потерь энергии отраженных электронов, первые для количественного анализа оказываются предпочтительными по отношению ко вторым. Следовательно, величина λK_{max} в первом приближении может служить мерой относительных концентраций Fe и Si в структуре Fe_xSi_{1-x} .

Полученные экспериментальные зависимости λK_{max} от содержания железа в структуре Fe_xSi_{1-x} для энергий первичных электронов 300 и 600 эВ представлены на рисунке 4. Как видно из приведенных результатов, для обеих энергий первичных электронов наблюдается линейная зависимость λK_{max} от x .

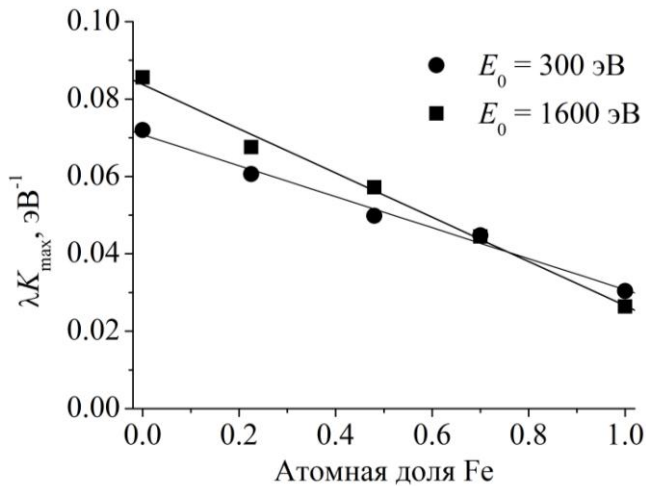


Рисунок 4. Зависимости максимумов спектров сечения неупругого рассеяния от содержания железа в структуре $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ для разных энергий первичных электронов

Для системы $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$ исследованы зависимости максимумов спектров сечения неупругого рассеяния электронов от содержания марганца в исследованных образцах для разных энергий первичных электронов. Эти зависимости также удовлетворительно, как и для системы $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ аппроксимируются линейными функциями.

В отличие от композитных структур переходных металлов и кремния спектры сечения неупругого рассеяния Ge и Si существенно не отличаются по своей структуре и положениям максимумов. В разделе 5.3 представлены результаты систематического сравнительного исследования спектров эталонных образцов чистых материалов Si и Ge и их твердых растворов, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

В процессе детального изучения зависимостей спектров сечения неупругого рассеяния электронов в монокристаллических подложках кремния и германия от энергии первичных электронов обнаружено существенное различие в этих зависимостях (рисунок 5а). Для Ge наблюдается максимум при энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ. Этот максимум присутствует для образцов германия разной кристаллографической ориентации, при разных углах падения первичного электронного пучка, в образцах с разной шероховатостью поверхности. Величина этого максимума зависит от изготовителя германиевых пластин, но в пределах одной партии остается практически постоянной. Возможно величина аномального максимума в зависимости $\lambda K_{\max}(E_0)$ определяется технологическими условиями получения Ge.

В разделе 5.2 приводятся результаты исследования композитных структур марганца с кремнием с различными атомными соотношениями марганца и кремния методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов.

Проанализирована возможность определения элементного состава этих структур из спектров сечения неупругого рассеяния электронов, как это было ранее показано для структуры $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$.

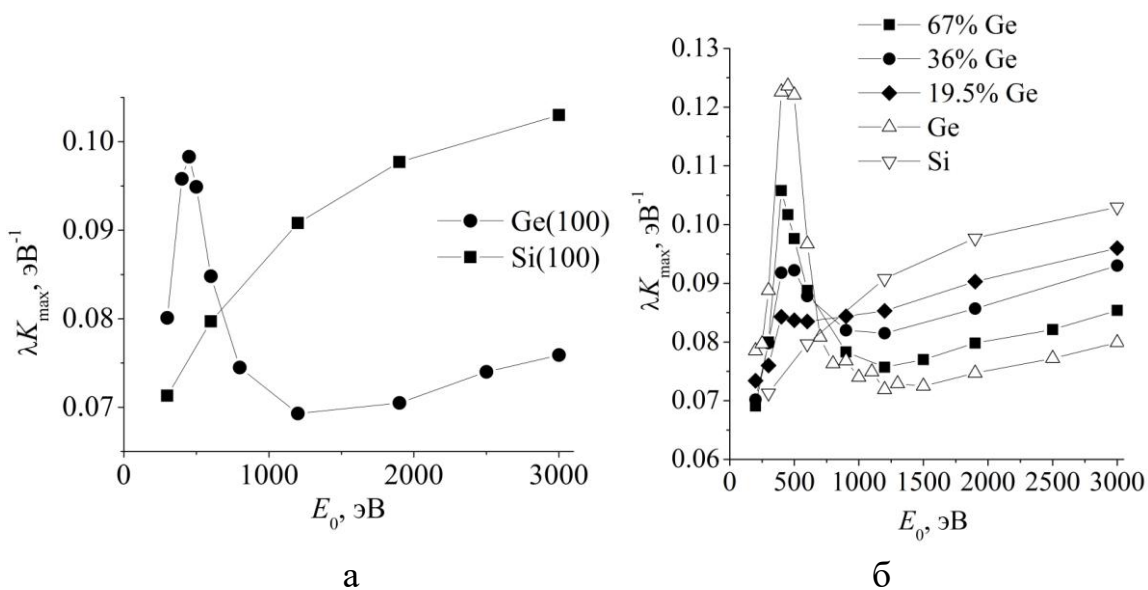


Рисунок 5. Зависимости максимальных значений $K\lambda$ -спектров кремния и германия (а) и их твердых растворов (б) от энергии первичных электронов E_0

Исследование зависимости максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов твердых растворов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, полученных в одних и тех же технологических условиях (рисунок 5б) показывают, что этот максимум линейно зависит от содержания Ge в твердом растворе.

Полученные в диссертационной работе результаты показывают, что спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов может служить хорошим инструментом исследования механизмов рассеяния электронов и контроля технологических режимов при изготовлении структур на основе Ge.

В главе 6 приведены результаты исследований тонких пленок Fe различной толщины на кремниевых подложках и многослойных структур системы Fe-Si, полученных термическим испарением в условиях сверхвысокого вакуума при комнатной температуре и на нагретую подложку. Для анализа элементного состава использована методика компьютерного моделирования сечения неупругого рассеяния в слоистых структурах.

В разделе 6.1 приведены результаты исследований слоистых структур $\text{Fe}(d)/\text{Si}$ и $\text{Si}(d)/\text{Fe}$ с варьируемой толщиной d пленки железа на кремниевой подложке или кремния на толстом слое железа, предварительно нанесенном на кремниевую подложку. Детально проанализированы спектры ХПЭЭ и спектры сечения неупругого рассеяния электронов в этих слоистых структурах.

С помощью методики, апробированной ранее для определения концентрации Fe и Si в однородной системе $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$, определены

относительные атомные концентрации железа и кремния в слоистых структурах.

Полученные результаты показали, что при формировании слоев в исследуемых структурах имеет место достаточно однородное распределение элементов в интерфейсе. Причиной этого могут служить высокая взаимная диффузия и шероховатость границ раздела.

В разделе 6.2 представлены результаты исследования методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов наноструктур Fe/Si, сформированных в условиях сверхвысокого вакуума при различных температурах синтеза. Образцы получены методом термического испарения на подложках монокристаллического кремния в сверхвысоковакуумном технологическом комплексе «АНГАРА». Технологические режимы (температура подложки, доза железа, поступившая за время синтеза на подложку) варьировались таким образом, чтобы гарантировать различные распределения элементов в приповерхностной области структуры за счет взаимной диффузии атомов железа и кремния и возможности образования различных форм силицидов железа. Для каждой температуры подложки получены образцы с одинаковой дозой поступления атомов железа 0.2 нм/мин, соответствующей за время напыления 10 мин эффективной толщине пленки железа равной 2 нм. При температуре подложки 620 °С получены дополнительно два образца, один из которых имел эффективную толщину слоя железа 0.1 нм, а другой - предварительно нанесенный на кремниевую подложку при температуре 620 °С подслоя пленки кремния.

Для характеристики распределения элементов по толщине исследуемых наноструктур мы использовали компьютерное моделирование сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых структурах на основе теории диэлектрического отклика. Для расчетов использована компьютерная программа моделирования $K\lambda$ -спектров структур «пленка-интерфейс-подложка», в которых промежуточный слой состоит из материалов пленки и подложки.

Результаты моделирования сечения неупругого рассеяния для образца, полученного нанесением слоя железа с эффективной дозой, соответствующей толщине сплошной пленки приблизительно 2 нм на подложку Si(100) при комнатной температуре, приведены на рисунке 6.

Кривая 1 соответствует экспериментальному спектру, кривая 2 - расчетному $K\lambda$ -спектру при толщине пленки 2.15 нм в предположении, что пленка сплошная и граница раздела между пленкой и подложкой совершенная. Толщина сплошной пленки подбиралась таким образом, чтобы максимум λK соответствовал экспериментальному значению 0.0368 эВ⁻¹. Однако, как видно из приведенных результатов, положение расчетного максимума по энергетическим потерям значительно отличается от экспериментального. Попытки моделирования сечения

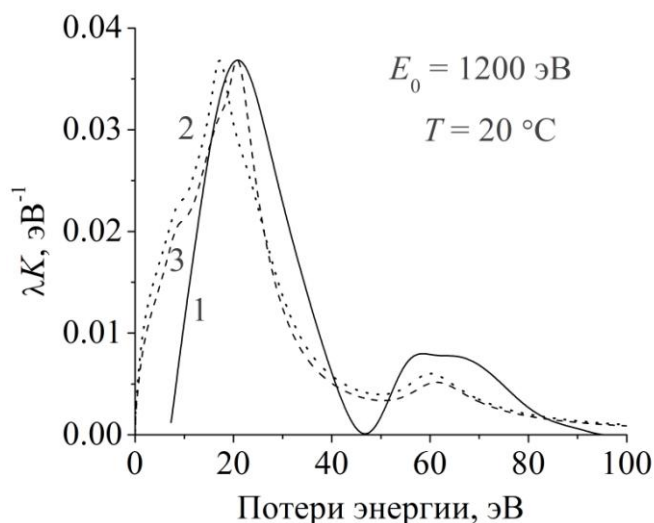


Рисунок 6. Экспериментальный спектр сечения неупругого рассеяния электронов для образца, полученного при комнатной температуре (1) и модельные спектры для резкой границы раздела пленки и подложки (2) и с интерфейсным слоем моносилицида (3)

Для образца, синтезированного при температуре подложки 270 °С, моделировать спектр сечения неупругого рассеяния с интерфейсом, состоящим только из моносилицида железа, не удалось. Для интерпретации экспериментальных результатов необходимо было рассмотреть влияние на модельные спектры дисилицида железа FeSi_2 , который, согласно литературным данным, образуется при более высоких температурах.

Параметры лоренцевых осцилляторов FeSi и FeSi_2 подбирали модификацией параметров чистого кремния. Для FeSi_2 , например, максимум λK соответствовал составу $\text{Fe}_{34}\text{Si}_{66}$, а энергия плазмона 20.6 эВ. Наилучшее согласие между экспериментом и модельными спектрами получено для верхнего однородного слоя смеси моно- и дисилицида железа с объемными долями 0.64 и 0.36 соответственно.

Для образцов, полученных при температуре 620 °С, содержание железа составляет менее 30 атомных процентов и зависит от условий синтеза. При столь малых концентрациях железа в приповерхностном слое вероятность образования больших объемных долей силицидов маловероятна. Поэтому, мы моделировали спектр сечения неупругого рассеяния для образцов, синтезированных при температуре 620 °С как композитной однородной среды, состоящей из кремния и железа.

неупругого рассеяния, варьируя различные виды распределения железа и кремния по глубине интерфейса (линейное, экспоненциальное, однородное), не привели к положительным результатам. Согласие эксперимента с моделью удалось получить (кривая 3 на рисунке б) предположив, что на границе раздела железо-кремний формируется моносилицид кремния с собственной диэлектрической функцией, отличающейся от диэлектрической функции чистого кремния и железа.

В разделе 6.3 представлены результаты исследования спектров сечения неупругого рассеяния электронов при послойном анализе трехслойной структуры Si/Fe/Si(100). Слоистая структура Si(2нм)/Fe(10нм)/Si(100) получена в камере подготовки образцов сверхвысоковакуумного электронного спектрометра “RIBER” последовательным осаждением на монокристаллическую подложку Si(100) слоев железа и кремния. Сформированная слоистая структура для исследования методами электронной спектроскопии была перенесена в сверхвысоковакуумный спектрометр “SPECS”. После размещения образца в сверхвысоковакуумной камере спектрометра проводилась регистрация спектров РФЭС, ЭОС и ХПЭЭ при последовательном травлении верхнего слоя ионами аргона.

Спектры сечения неупругого рассеяния электронов при разных временах травления ионами аргона приведены на рисунке 7.

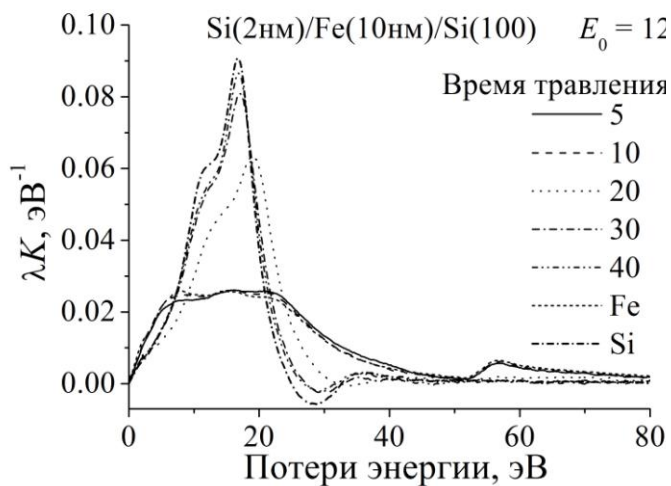


Рисунок 7. Спектры сечения неупругого рассеяния для разных времен травления образца Si(2нм)/Fe(10нм)/Si(100)

На начальных стадиях ионного травления (времена травления 5 и 10 минут) спектры сечения неупругого рассеяния электронов практически не отличаются от спектров для чистого железа. Следующие 10 минут травления приводят к существенному увеличению максимума $K\lambda$ -спектра. По форме спектр становится подобным спектру кремния с единственным отчетливо

выраженным максимумом, соответствующим возбуждению объемного плазмона, и особенностью на низкоэнергетической стороне спектра, связанной с потерями на возбуждение поверхностного плазмона. Максимум потерь энергии спектра заметно сдвинут в сторону больших потерь энергии относительно спектра чистого кремния.

В исследуемой структуре для времени травления 20 минут энергия потерь, соответствующая максимальному значению спектра, имеет промежуточное значение между кремнием и железом и составляет в среднем 19.3 ± 0.2 эВ, которое существенно отличается от соответствующих величин для Si и Fe. Это может быть объяснено формированием в структуре силицидов железа,

Подобные изменения спектров наблюдаются при всех энергиях первичных электронов в интервале $300 \div 3000$ эВ.

Полученные результаты еще раз свидетельствуют о том, что в интерфейсе слоистых структур Fe-Si силициды образуются даже при комнатной температуре.

В главе 7 представлены результаты диссертационной работы по аппроксимации спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов элементарных полупроводников и металлов, а также силицидов железа.

В разделе 7.1 обсуждаются результаты разложения спектров характеристических потерь энергии электронов на элементарные составляющие пики гауссовой формы при термической очистки кремниевых подложек. На каждом этапе термической очистки поверхность образца характеризовалась Оже-электронной спектроскопией. В качестве величины, определяющей содержание Si и C на поверхности образца, принято отношение амплитуд Оже-пигов этих элементов (I_{Si}/I_C).

На спектрах характеристических потерь энергии электронов наблюдается группа перекрывающихся пиков, обусловленных возбуждением в образце плазменных колебаний. С увеличением отношения I_{Si}/I_C наблюдаются довольно сложные изменения в этой области спектра, связанные не только с изменением относительных амплитуд пиков, но также их положений и количества пиков.

Для количественной интерпретации полученных результатов была проведена компьютерная обработка экспериментальных спектров. Анализ проводился по интегральным спектрам, поэтому исходные спектры, полученные в дифференциальном виде, были предварительно проинтегрированы численными методами, и из них был вычтен фон.

Экспериментальные спектры моделировались отдельными пиками гауссовой формы, энергии которых соответствовали энергиям потерь на возбуждение поверхностных, объемных, а также кратных объемных плазмонов в кремнии и углероде. При аппроксимации были зафиксированы значения энергий объемных плазмонов и их ширина. Ширина пиков на всех этапах термической обработки считалась постоянной и определялась методом подбора таким образом, чтобы экспериментальные и аппроксимирующие спектры имели наибольшее совпадение. Параметры пика поверхностных плазмонов оставались свободными при варьировании. Значения нефиксированных параметров пиков при моделировании подбирались из условия наилучшего совпадения экспериментального и модельного спектров, критерием которого являлся параметр χ^2 , определяемый суммой квадратов разностей между экспериментальным и модельным спектрами.

Из результатов работы следует, что в СХПЭЭ так же, как и ЭОС может быть применен метод коэффициентов элементной чувствительности со своими коэффициентами элементной чувствительности.

Разложение пиков характеристических потерь энергии электронов на элементарные составляющие связано с трудностями, которые обусловлены наличием большого количества кратных спектров, создающих трудно учитываемый дополнительный фон неупругих электронов.

Этого недостатка лишены спектры сечения неупругого рассеяния электронов, в которых отсутствуют пики кратных потерь. Поэтому в дальнейшем тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов изучалась разложением этих спектров.

В разделе 7.2 представлены результаты моделирования $K\lambda$ -спектров в кремнии с помощью трехпараметрических функций Тоугаарда. Функции Тоугаарда, описывающие универсальные классы сечений неупругого рассеяния электронов, лучше, чем функции Гаусса, Лоренца и их комбинации, применяемые в ФЭС, соответствуют физическим механизмам рассеяния электронов в твердых телах.

Наличие отрицательных значений λK , особенно ярко проявляющееся в кремнии при небольших значениях энергии первичных электронов, вызывает расхождение расчетного спектра с экспериментальным со стороны высоких потерь энергии. Поэтому диапазон аппроксимации выбирался до значения потерь, при котором экспериментальный и расчетный спектры совпадают со стороны больших потерь энергии.

Количество расчетных пиков выбиралось из двух критериев: наилучшее совпадение расчетного и экспериментального спектров и наиболее близкие значения потерь энергии расчетных пиков к энергиям экспериментальных пиков, наблюдаемых в СХПЭЭ.

На рисунке 8 показан результат моделирования спектров сечения неупругого рассеяния электронов для Si (111) при энергиях первичных электронов 300 и 1900 эВ. Обозначения подгоночных пиков соответствуют общепринятым: S_1 , S_3 , S – поверхностные возбуждения, E_2 , V – объемные.

Параметры функции Тоугаарда варьировались до достижения наилучшего совпадения расчетного спектра с экспериментальным.

Зависимости площадей или амплитуд подгоночных пиков, определяющих интенсивности возбуждений, от энергии первичных электронов связаны с природой соответствующих пиков. Монотонно убывающие зависимости площадей или амплитуд пиков подтверждают их поверхностную природу, противоположная зависимость – объемную.

В количественном анализе спектров потерь энергии отраженных электронов важной задачей является разделение вкладов объемных и поверхностных возбуждений. Вклад потерь поверхностной природы принято количественно оценивать поверхностным параметром P_{se} , величина которого определяется вероятностью генерации электроном

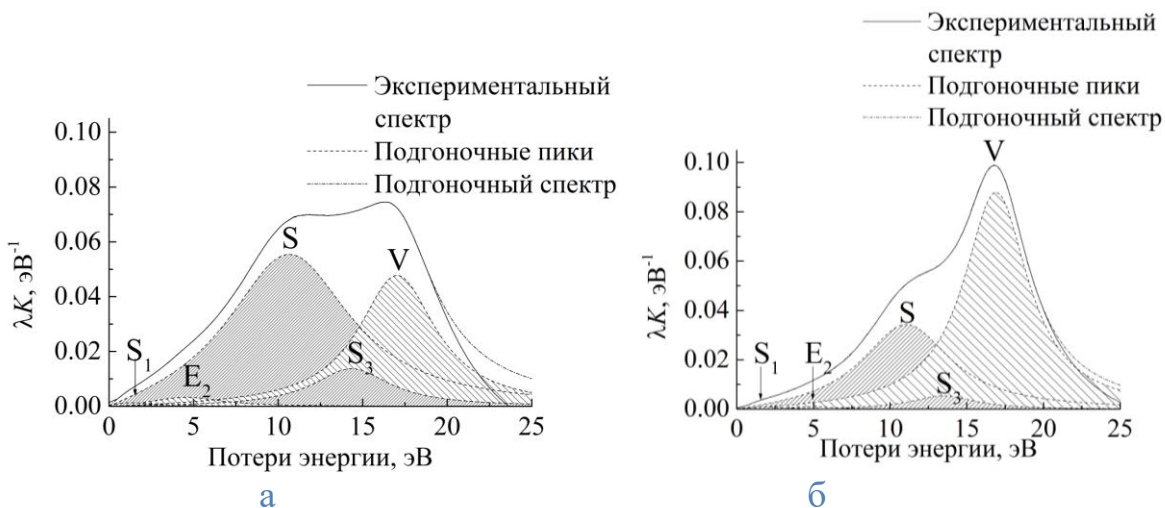


Рисунок 8. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов для Si(111) при энергиях первичных электронов 300 (а) и 1900 (б) эВ, аппроксимированные универсальными функциями Тоугаарда

поверхностных возбуждений при единичном акте взаимодействия с поверхностью.

Исследование тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов позволяет определить не только общий для всего спектра поверхностный параметр, но и значения P_{se} , характеризующий каждый поверхностный пик.

В разделе 7.3 представлены результаты комплексных систематических исследований спектров ХПЭЭ электронов и $K\lambda$ -спектров элементарных Fe и Mn.

В отличие от спектров сечения неупругого рассеяния электронов в кремнии спектры Fe и Mn значительно сложнее по своей структуре. При низких энергиях первичных электронов спектры переходных металлов значительно богаче поверхностными возбуждениями. Не при всех значениях энергии первичных электронов удастся разделить пики поверхностного и объемного плазмонов.

Полученные экспериментальные результаты показали, что в $K\lambda$ -спектрах существенно больше влияние поверхностных возбуждений, чем в СХПЭЭ. Оно приводит, в частности к изменению энергии потерь основного максимума в спектрах сечения неупругого рассеяния электронов с варьированием энергии первичных электронов. Этот факт объяснен перераспределением вкладов поверхностных и объемных потерь с изменением глубины анализа поверхностного слоя, что является следствием изменения энергии первичных электронов в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов.

Проведено разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов Fe на элементарные пики Тоугаарда для разных энергий первичных электронов. Количество подгоночных пиков выбиралось из условия минимального среднеквадратичного отклонения подгоночного спектра и экспериментального. Для хорошей аппроксимации достаточно 6 пиков, включая пик M_{23} .

На рисунках 9а и 9б представлены результаты аппроксимации спектров сечения неупругого рассеяния Fe при энергиях первичных электронов 300 и 3000 эВ соответственно.

Параметры функций Тоугаарда варьировались до достижения наилучшего совпадения подгоночного спектра с экспериментальным. При аппроксимации энергия пика объемного плазмона (пик d) фиксировалась как средняя, определенная по СХПЭЭ для объемного плазмона – 22.8 эВ.

С увеличением энергии первичных электронов возрастает интенсивность пика d и уменьшаются интенсивности пиков a , b , c (рисунки 9а и 9б). Изменение интенсивности отдельных пиков вызывает изменение формы всего спектра.

Структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов марганца, ее изменение с варьированием энергии первичных электронов подобны тем, которые наблюдаются в образцах железа. Учитывая подобие спектров сечения неупругого рассеяния электронов марганца и железа, разложение на элементарные функции Тоугаарда было выполнено для Mn для того же количества пиков разложения, что и в железе.

В пределах погрешности энергии потерь всех пиков для железа и марганца практически не отличаются, тем не менее, заметно увеличение энергии потерь соответствующих пиков Mn по сравнению с Fe. Для пика межзонного перехода, как отмечалось выше, энергии разные, что связано с отличающейся энергией связи M_{23} -уровня электронов в этих металлах.

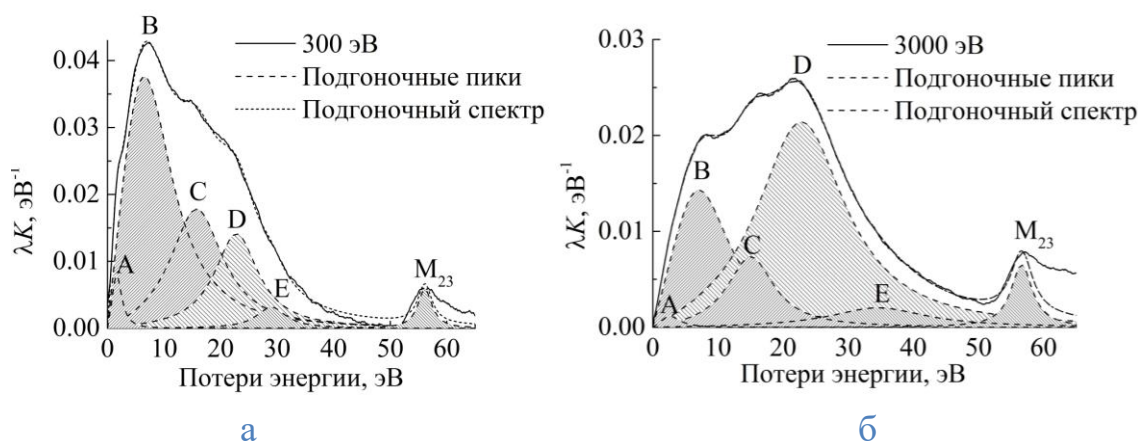


Рисунок 9. Аппроксимация спектров сечения неупругого рассеяния электронов Fe при энергиях первичных электронов 300 (а) и 3000 (б) эВ

В разделе 7.4 представлены результаты аппроксимации спектров сечения неупругого рассеяния электронов силицидов железа универсальными функциями Тоугаарда. Приведены результаты анализа возможности применения спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов для идентификации различных объемных фаз силицидов железа.

Массивные образцы силицидов железа были приготовлены сплавлением смесей порошков Fe и Si в высоковакуумной установке УВН-2М-1. Плавление смесей проводилось при температуре приблизительно 1800 °С. Весовые доли кремния для формирования стабильных фаз FeSi и FeSi₂ выбирались равными 34.5% и 50.5% соответственно. Магнитная фаза силицида железа получена сплавлением смеси порошков с весовыми концентрациями 16% Si и 84% Fe. По результатам рентгеноструктурного анализа магнитная фаза силицида железа соответствует метастабильной фазе Fe₅Si₃.

После охлаждения в высоком вакууме из слитков вырезались пластины толщиной приблизительно 1 мм, на которых после шлифовки проведены исследования электронных спектров.

На рисунке 10 приведены $K\lambda$ -спектры исследованных образцов силицидов при энергии первичных электронов 1200 эВ. Здесь же для сравнения показаны спектры сечения неупругого рассеяния электронов элементарных Fe и Si. Спектры силицидов представляют собой достаточно широкие одиночные кривые без явных особенностей, как, например, в Fe. Нет в них и заметного проявления поверхностного пика, как это имеет место в Si. Энергетическое положение максимумов потерь практически не зависит от состава силицида, а абсолютные значения максимумов возрастают с увеличением концентрации кремния. Для всех силицидов наблюдается пик, соответствующий краю межзонного перехода в железе, максимум которого возрастает с увеличением концентрации железа. В низкоэнергетической области потерь для всех силицидов имеется небольшая особенность в области 2-5 эВ.

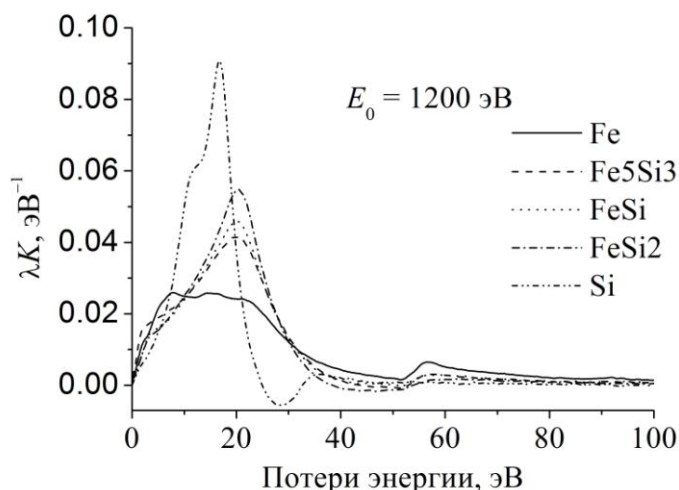


Рисунок 10. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов силицидов железа, Si и Fe

Значения максимумов

спектров сечения неупругого рассеяния электронов в силицидах железа незначительно изменяются в зависимости от энергии первичных электронов.

Разложение $K\lambda$ -спектров на элементарные составляющие позволяет выделить из общего спектра вклад потерь на возбуждение объемного плазмона, который может служить количественной характеристикой данного материала, свободной от влияния других процессов неупругого рассеяния электронов (поверхностных плазмонов, межзонных переходов и т.д.).

Полученные результаты, показывают, что наиболее зависимыми от состава силицида являются площадь и амплитуда объемного плазмона. Этот факт выделяет эти параметры от традиционно используемой в анализе элементного состава силицидов энергии потерь на возбуждение объемного плазмона, которая, как следует из тех же результатов, не отличается в пределах погрешности измерений для разных форм силицидов.

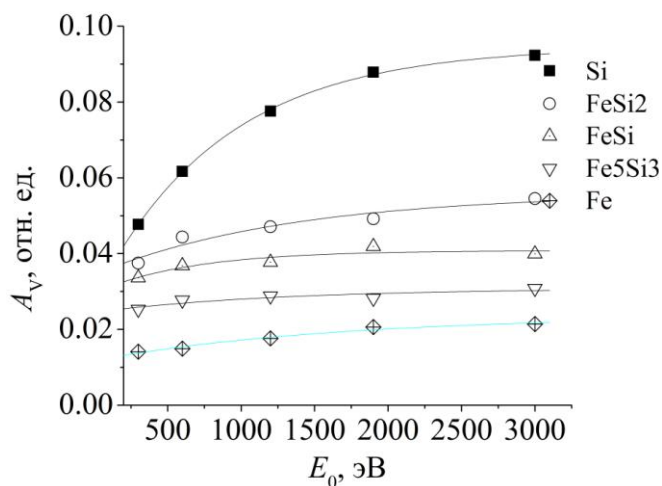


Рисунок 11. Зависимости амплитуды объемного плазмона от энергии первичных электронов

Предельное значение A_V характеризует максимальную амплитуду объемного плазмона, когда на спектры не оказывают влияния поверхностные возбуждения. Эти предельные значения амплитуды объемного плазмона увеличиваются с возрастанием концентрации кремния в структуре.

Эти результаты еще раз свидетельствуют о более высокой информативности и достоверности результатов количественного анализа методом спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов в

На рисунке 11 приведены зависимости амплитуд объемного плазмона A_V от энергии первичных электронов E_0 , полученные в результате разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные составляющие для силицидов железа с разным соотношением атомных концентраций кремния и железа и элементарных Si и Fe. На этом же рисунке показаны аппроксимирующие экспоненциальные кривые для каждого образца.

сравнении со спектроскопией характеристических потерь энергии электронов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведено всестороннее исследование методами электронной спектроскопии отраженных электронов элементарных полупроводников, переходных металлов и их соединений. Показано, что количественный анализ спектров сечения неупругого рассеяния электронов (*K*λ-спектров) дает более полную и достоверную информацию о физико-химических свойствах материалов, чем традиционно используемые в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов спектры характеристических потерь энергии электронов. Это преимущество связано с тем, что в спектрах сечения неупругого рассеяния электронов имеется дополнительный количественный параметр, измеряемый в абсолютных единицах – максимум спектра, который более чувствителен к элементному составу материала, чем его энергетическое положение.
2. Показано, что для композитных структур Fe_xSi_{1-x} , Mn_xSi_{1-x} , синтезированных в одних и тех же технологических условиях, в первом приближении наблюдается линейная зависимость максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов от величины *x*. На основе этих результатов развит новый подход в количественном анализе элементного состава этих структур из линейной аппроксимации максимумов сечения неупругого рассеяния электронов для эталонных чистых элементов. Этот подход может быть использован для количественного анализа бинарных соединений, компоненты которых имеют существенные отличия в сечениях неупругого рассеяния электронов.
3. Разработана методика количественного послойного анализа слоистых структур, в основе которой сравнение результатов компьютерного моделирования спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов и экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов. Достижением наилучшего согласия между экспериментом и расчетом при заданных разных энергиях первичных электронов путем варьирования количества слоев, их толщин, концентраций компонентов в каждом слое определяется профиль концентраций элементов по глубине слоистой структуры.
4. Для реализации методики количественного послойного анализа разработан пакет компьютерных программ для моделирования на основе теории диэлектрического отклика спектров сечения неупругого рассеяния электронов. Программы позволяют моделировать из известных диэлектрических функций составляющих структуру

материалов спектры композитных и многослойных структур с произвольным количеством слоев разной толщины и переменной концентраций компонентов в каждом слое. Разработанные компьютерные программы позволяют также определять параметры диэлектрических функций, представленных в виде суммы осцилляторов Друде-Линдхарда, из экспериментальных спектров чистых эталонных образцов.

5. Предложенный подход в послойном анализе слоистых структур апробирован на примере пленок диоксида кремния на кремниевой подложке и слоистых структур системы Fe-Si, полученных при разных технологических условиях. Показано, что при формировании пленок железа на кремниевых подложках, необходимо учитывать возможность образования на границе раздела пленка-подложка силицидов железа разного состава. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности развития этого направления для количественного послойного анализа многослойных структур полупроводников, металлов и их соединений.
6. Для твердых растворов германия и кремния, спектры потерь энергии отраженных электронов, которые не имеют в качественном и количественном отношении существенных различий, обнаружена аномальная зависимость максимума сечения неупругого рассеяния отраженных электронов от энергии первичных электронов. Аномалия связана с экспериментально наблюдаемым возрастанием этого максимума при энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ. Показано, что абсолютная величина максимума в твердых растворах системы $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, полученных в одинаковых технологических условиях пропорциональна содержанию германия в структуре. Этот результат также может быть использован для количественного анализа элементного состава системы $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.
7. Развита методика изучения тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов разложением этих спектров на элементарные составляющие в виде универсальных функций сечения неупругого рассеяния электронов Тоугаарда. Такой подход позволяет более надежно и точно определять положения пиков, составляющих сложный спектр, а также из анализа зависимостей интенсивностей элементарных пиков от энергии первичных электронов определять их объемную или поверхностную природу.
8. Проведено всестороннее исследование элементарных Si, Fe и различных силицидов железа методами спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов, СХПЭЭ, ЭОС и РФЭС. Показано, что для силицидов железа, в спектрах которых не наблюдаются разрешенные по энергии пики объемного и поверхностного плазмонов, только предложенная методика разложения экспериментальных пиков

спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные составляющие позволяет определить энергетические положения и интенсивности объемного и поверхностного плазмонов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

- A1. Александрова, Г.А. Количественный анализ в спектроскопии характеристических потерь энергии электронов при термообработке Si (111) / Г.А. Александрова, А.С. Паршин // Вестник Сибирской аэрокосмической академии им. академика М.Ф. Решетнева. – 2001. – вып. 2. – С.15-22.
- A2. Александрова, Г.А. Моделирование спектров характеристических потерь энергии электронов кремниевых пластин с различным содержанием на поверхности углеродосодержащих примесей / Александрова Г.А., Паршин А.С. // Вестник Красноярского государственного университета. – 2004. – № 5. – С.111-118.
- A3. Варнаков, С.Н. Автоматизация технологического оборудования для получения многослойных наноструктур в сверхвысоком вакууме / С.Н. Варнаков, А.А. Лепешев., С.Г. Овчинников. А.С. Паршин, М.М. Коршунов, П. Неворал // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 6. – С. 125-129.
- A4. Варнаков, С.Н. Структурные и магнитные характеристики однослойных и многослойных пленок Fe/Si, полученных термическим испарением в сверхвысоком вакууме / С.Н. Варнаков, А.С. Паршин, С.Г. Овчинников, D. Rafaja, L. Kalvoda, А.Д. Балаев, С.В. Комогорцев // Письма в журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, вып. 22. – С. 1-8.
- A5. Parshin A.S. Characterization of Si/Fe Multilayers by Electron Spectroscopy and Small-Anglt X-ray Scattering / A.S. Parshin, S.N. Varnakov, A.A. Lepeshev, D. Rafaja, L. Kalvoda, S.G. Ovchinnikov // The Physics of Metals and Metallography. – 2006. – Vol. 101, Suppl. 1. – P. S78-S80.
- A6. Паршин, А.С. Влияние поверхностных возбуждений на спектр потерь энергии отраженных электронов в кремнии / А.С. Паршин. Г.А. Александрова, А.В. Зюганова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 6. – С. 32-37.
- A7. Паршин, А.С. Исследование магнитных слоистых наноструктур Fe/Si методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов / А.С. Паршин, Г.А. Александрова, С.Н. Варнаков, С.А. Куценков, С.Г. Овчинников // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 8. – С. – 33-36.

- A8. Паршин, А.С. Спектроскопия характеристических потерь энергии отраженных электронов в тонких пленках системы Fe_xSi_{1-x} / А.С. Паршин, Г.А. Александрова, А.Е. Долбак, О.П. Пчеляков, Б.З. Ольшанецкий, С.Г. Овчинников, С.А. Кущенко // Письма в журнал технической физики. – 2008. – Т. 34, Вып. 9. – С. 41-48.
- A9. Александрова Г.А. Изучение механизмов формирования структур железа на поверхности кремния при различных технологических условиях методом атомно-силовой микроскопии / Г.А. Александрова, О.П. Вайтузин, Е.П. Березицкая., А.С. Паршин, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников // Вестник Сибирского Государственного Аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 4(25). – С. 125-129.
- A10. Кущенко С.А. Компьютерное моделирование сечения неупругого рассеяния электронов в трехслойных структурах типа «пленка-интерфейс-подложка» / С.А. Кущенко, А.С. Паршин, Г.А. Александрова, С.А. Ходенков // Вестник Сибирского Государственного Аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 4(25). – С. 129-134.
- A11. Паршин А.С. Спектроскопия потерь энергии отраженных электронов и сечение неупругого рассеяния в анализе слоистых структур системы Fe-Si / А.С. Паршин, Г.А. Александрова, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников // Журнал структурной химии. – 2009. – Т. 50, №3. – С. 451-455.
- A12. Паршин А.С. Новые возможности количественного анализа в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов структур Fe/Si / А.С. Паршин, С.А. Кущенко, Г.А. Александрова, С.Г. Овчинников // Журнал технической физики. – 2011. –Т. 81, Вып. 5. – С. 69-74.
- A13. Паршин А.С. Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых системах $SiO_2/Si(100)$ / А.С. Паршин, С.А. Кущенко, О.П. Пчеляков, Ю.Л. Михлин, Т. Хасанов // Автометрия. – 2012. –Т. 48, № 4. – С. 88-92.
- A14. Паршин А.С. Спектроскопия характеристических потерь энергии отраженных электронов в композитных структурах Mn_xSi_{1-x} / А.С. Паршин, О.П. Пчеляков, А.Е. Долбак, Б.З. Ольшанецкий // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 6. – С. – 5-9.
- A15. Паршин, А.С. Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов наногетероструктур Ge_xSi_{1-x} / А.С. Паршин, Е.П. Пьяновская, О.П. Пчеляков, Ю.Л. Михлин, А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев, М.Ю. Есин // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т.48, Вып. 2. – С. 237-241.

- A16. Игуменов А.Ю. Расчет вероятности генерации поверхностных возбуждений электронами, отраженными от поверхности Si / А.Ю. Игуменов, А.С. Паршин, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев // Вестник Сибирского Государственного Аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2014. – № 4(56). – С. 230-235.
- A17. Паршин А.С. Моделирование сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых структурах на основе диэлектрических функций и экспериментальных спектров пленки и подложки / А.С. Паршин, С.А. Куценков, О.П. Пчеляков, Ю.Л. Михлин // Автометрия. – 2015. – Том 51. – № 4. – С. 114-120.
- A18. Паршин А.С. Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов и поверхностный параметр Si / А.С. Паршин, А.Ю. Игуменов, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49, Вып. 4. – С. 435-439.
- A19. Паршин А.С. Послойный анализ методом спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов распределения диоксида кремния по толщине в структуре SiO₂/Si(111) // А.С. Паршин, С.А. Куценков, О.П. Пчеляков, Ю.Л. Михлин // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т.50, Вып. 3. – С. 435-439.
- A20. Паршин А.С. Сравнительный анализ спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния в Fe / А.С. Паршин, А.Ю. Игуменов, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, В.С. Жигалов // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, Вып. 5. – С. 881-887.
- A21. Parshin, A. S. Fine structure of inelastic electron scattering cross-section spectra for Mn / A. S. Parshin, A. Yu. Igumenov, Yu. L. Mikhlin, O. P. Pchelyakov, V.S. Zhigalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 122. – № 1. – P. 012025(7).
- A22. Паршин А.С. Исследование дисилицида железа методами электронной спектроскопии / А.С. Паршин, А.Ю. Игуменов, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, В.С. Жигалов // Журнал технической физики. – 2016. –Т. 86, Вып. 9. – С. 136-140.
- A23. Паршин А.С. Спектроскопия потерь энергии отраженных электронов моносилицида железа / А. С. Паршин, А. Ю. Игуменов, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, В. С. Жигалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 10. – С. 82-86.

Подписано в печать _____ 2017 г.
Формат 60x84/16. Объем 2.7 п.л. Тираж 150 экз. Заказ № _____

Отпечатано в отделе копировано-множительной техники СибГУ им. М.Ф. Решетнева.
660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31.

