

	
<p style="text-align: center;">МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА (МГУ)</p> <p>Ленинские горы, Москва, ГСП-1, 119991 Тел.: 939-10-00, 203-65-65 Факс: 939-01-26</p>	<p>“Утверждаю”</p> <p>Проректор Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова</p> <p>профессор  А.А. Федянин</p> <p>“ _____ 2017 г.</p> 
<p>20.10.2017 № 1383-14/013-03</p> <p>На № _____</p>	

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Паршина Анатолия Сергеевича на тему:
«Спектроскопия неупруго отраженных электронов твердотельных наноструктур
элементарных полупроводников, магнитных металлов и их соединений», представленную
на соискание ученой степени доктора физико - математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Наноструктурирование является одним из магистральных направлений развития современной физики конденсированного состояния. При уменьшении характерных размеров твердотельных структур до значений порядка нескольких нанометров их свойства существенно изменяются по сравнению с объемными материалами. В то же время встает задача контроля размера и элементного состава таких структур. Имеющиеся методы, такие как электронная Оже-спектроскопия или рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, не всегда удобны в использовании, поэтому разработка новых методов контроля состава твердотельных наноструктур является очень востребованной задачей. Таким достаточно мало распространенным методом является спектроскопия характеристических потерь энергии электрона. Этот метод достаточно удобен в применении, однако до сих пор его использование не позволяло однозначно интерпретировать получаемые данные по составу и размерам наноструктур. Диссертационная работа А.С. Паршина представляет собой существенный шаг вперед к

решению вышеобозначенной задачи, поэтому проведенные исследования являются, несомненно, актуальными.

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

Во введении приводится обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, поставлены конкретные задачи. Обсуждается научная новизна, практическая значимость работы, приведены сведения об апробации научных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы по теме работы. 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. 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.

Во второй главе представлены краткие сведения о спектрометрах, технологических установках и экспериментальных методиках, используемых при выполнении диссертационной работы. Подробно описаны сверхвысоковакуумные электронные спектрометры, использованные при выполнении работы для регистрации электронных спектров. Охарактеризован комплекс аппаратуры по исследованию вторично-эмиссионных свойств поверхности твердых тел. Далее во второй главе представлены характеристики технологических установок, используемых для изготовления исследуемых образцов. В частности, 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», оснащенный электронным спектрометром с энергоанализатором типа цилиндрическое зеркало 09ИОС-03, в Институте физики имени Л.В. Киренского СО РАН. В заключительной части главы обсуждены возможности лицензионных программных продуктов, которые были использованы для обработки экспериментальных спектров потерь энергии отраженных электронов, рентгеновских фотоэлектронных и электронных Оже-спектров.

Третья глава работы посвящена результатам 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. Изложен алгоритм расчета в модели Юберо-Тоугаарда (Yubero-Tougaard) взаимодействия электрона с веществом с известной диэлектрической функцией при пересечении им границы полубесконечной среды. Комплексная диэлектрическая функция среды, согласно модели Друде-Линдхарда, представлена в расчетах в виде суперпозиции лоренцовых осцилляторов, каждый из которых имеет свою собственную частоту, силу и коэффициент затухания. В 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. В работе проведен расчет сечения неупругого рассеяния при рассеивании электронов в неоднородных слоистых структурах: пленка-подложка, пленка-интерфейс-подложка, островковая пленка. 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. Описана компьютерная программа расчета из экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов параметров осцилляторов диэлектрической функции в представлении Друде-Линдхарда. Наконец, в третьей главе представлена программа, моделирующая наиболее общий случай распределения компонентов в многослойной структуре с произвольным числом слоев.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена результатам исследования тонких пленок диоксида кремния на кремнии с использованием новой методики

определения элементного состава. Приведены результаты детального анализа образцов монокристаллического кремния и диоксида кремния методами СХПЭЭ, РФЭС, ЭОС. Представлен детальный сравнительный анализ спектров сечения неупругих электронов эталонных образцов кремния и диоксида кремния. Приведены результаты компьютерного моделирования спектров сечения неупругого рассеяния эталонных образцов Si и SiO₂ и определения параметров осцилляторов Друде-Линдхарда этих материалов. Проведено компьютерное моделирование спектров сечения неупругого рассеяния электронов в двухслойных структурах пленки диоксида кремния на кремниевой подложке. Представлены результаты, полученные для 3 образцов с толщинами пленки SiO₂ 1.8, 3.2 и 7 нм. Получены непротиворечивые количественные результаты, что свидетельствует о правильности выбранной модели расчета спектров сечения неупругого рассеяния электронов из теории диэлектрического отклика. Проведена апробация предложенной методики определения толщины пленки для структуры пленка SiO₂ на монокристаллической кремниевой подложки кристаллографической ориентации (001). Получено удовлетворительное согласие результатов моделирования с эллипсометрическими данными. На основе компьютерной программы моделирования спектров сечения неупругого рассеяния многослойных структур, разработан алгоритм моделирования спектров для слоистых структур с произвольным количеством слоев, произвольной толщины каждого слоя и переменной концентрацией компонентов в каждом слое.

В пятой главе работы представлены результаты исследований методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов двухкомпонентных структур Fe_xSi_{1-x}, Mn_xSi_{1-x} и Ge_xSi_{1-x} с различными соотношениями составляющих компонент. В частности, для системы Fe_xSi_{1-x} полученные экспериментальные зависимости λK_{\max} от содержания железа для энергий первичных электронов 300 и 600 эВ наблюдается линейная зависимость λK_{\max} от x . В структурах марганца с кремнием с различными атомными соотношениями марганца и кремния зависимости максимумов спектров сечения неупругого рассеяния электронов от содержания марганца удовлетворительно, как и для системы Fe_xSi_{1-x}, аппроксимируются линейными функциями. В то же время, 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 шестой главе 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. С помощью методики, апробированной ранее для определения концентрации Fe и Si в однородной системе Fe_xSi_{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. Представлены результаты исследования методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов наноструктур Fe/Si, сформированных в условиях сверхвысокого вакуума при различных температурах синтеза. Для интерпретации результатов сделано предположение, что на границе раздела железо-кремний формируется моносилицид кремния с собственной диэлектрической функцией, отличающейся от диэлектрической функции чистого кремния и железа. Продемонстрировано, что в интерфейсе слоистых структур Fe-Si силициды образуются даже при комнатной температуре.

В седьмой главе работы представлены результаты по аппроксимации спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов элементарных полупроводников и металлов, а также силицидов железа. Обсуждаются результаты разложения спектров характеристических потерь энергии электронов на элементарные составляющие пики гауссовой формы при термической очистки кремниевых подложек. На спектрах характеристических потерь энергии электронов наблюдается группа перекрывающихся пиков, обусловленных возбуждением в образце плазменных колебаний. Из результатов работы следует, что в СХПЭЭ так же, как и ЭОС может быть применен метод коэффициентов элементной чувствительности со своими коэффициентами элементной чувствительности. Показано, что в количественном анализе спектров потерь энергии отраженных электронов важной задачей является разделение вкладов объемных и поверхностных возбуждений. 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. В работе также 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. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой информативности и достоверности результатов количественного анализа методом спектроскопии сечения

неупругого рассеяния электронов в сравнении со спектроскопией характеристических потерь энергии электронов.

В заключении приведены основные результаты работы.

Результаты исследований, проведенных А.С. Паршиным, представляют несомненный практический интерес. Они доказывают принципиальную возможность использования метода спектроскопии неупруго отраженных электронов для элементного и послойного анализа состава твердотельных наноструктур. Полученные в работе результаты рекомендуются к использованию в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), и в других институтах РАН и организациях Министерства образования и науки.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд вопросов и замечаний:

1) В диссертации было бы полезным провести прямое экспериментальное сравнение данных о составе одних и тех же наноструктур, полученных различными методами – Оже-спектроскопией, фотоэлектронной спектроскопией и развиваемой авторами спектроскопией характеристических потерь энергии электронов.

2) Хотелось бы, чтобы в работе были приведены данные о том, насколько однозначным является разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь в результирующем $K\lambda$ -спектр (гл.7), и какова ошибка в определении параметров такого разложения.

3) Было бы полезным провести анализ того, какие априорные сведения о составе исследуемых структур необходимы для того, чтобы определение состава и пространственного распределения компонент было однозначным.

4) В работе есть ряд стилистических неточностей и технических погрешностей.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Диссертация А.С. Паршина является законченной научно-квалификационной работой и содержит решение задач в области исследования свойств наноструктур на основе элементарных материалов, что имеет важное значение для развития физики конденсированного состояния. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации, научные результаты диссертации опубликованы в статьях автора в рецензируемых научных изданиях. В целом, диссертация А.С. Паршина удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор

заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад А.С. Паршина заслушан на заседании кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ. Отзыв подготовлен профессором, д.ф.-м.н. С.А. Никитиным и утвержден на заседании кафедры 10 октября 2017 г., протокол №7.

Профессор кафедры
общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ

профессор, д.ф.-м.н. Сергей Александрович Никитин

Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991

Тел. (495)-939-49-02

E-mail: nikitin@phys.msu.ru

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

Даю согласие на обработку персональных данных



С.А. Никитин

Заведующий кафедрой
общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ

профессор, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Дмитрий Ремович Хохлов

Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991

Тел. (495)-939-11-51

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

Даю согласие на обработку персональных данных



Д.Р. Хохлов