

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу ПАРШИНА АНАТОЛИЯ СЕРГЕЕВИЧА «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.

Уменьшение размеров элементной базы твердотельных устройств электроники и спинтроники нового поколения до нанометрового масштаба требует совершенствования аналитических методов исследования физико-химических свойств и контроля технологических процессов наноматериалов. Основными поверхностночувствительными методами анализа являются методы электронной спектроскопии. Наиболее развитыми из методов количественного анализа являются электронная Оже-спектроскопия и фотоэлектронная спектроскопия. Менее часто применяется и, как правило, для качественного анализа метод спектроскопии потерь энергии отраженных электронов. Тем не менее, по сравнению с первыми двумя методами у этого метода имеется возможность неразрушающего послойного анализа элементов по глубине. В этой связи тема диссертационной работы Паршина Анатолия Сергеевича, связанная с разработкой нового подхода к количественному анализу твердотельных наноструктур в рамках теории диэлектрического отклика сечения неупругого рассеяния электронов, является, **несомненно, актуальной и имеет практическое значение.**

Объектами исследования являются элементарные полупроводники, магнитные металлы и их соединения, широко используемых в современных устройствах микроэлектроники, а также перспективных для разработки устройств наноэлектроники и спинтроники нового поколения.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 319 страниц.

Во **введении** дана общая характеристика проблемы, обоснована актуальность выбранной темы, определены объекты, предмет, цели и задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу современного состояния исследований в области электронной спектроскопии поверхности твердых тел. Значительное внимание уделено анализу влияния неупругого рассеяния электронов на результаты количественного анализа в электронной спектроскопии. В анализе литературных данных большое внимание уделено, опубликованным в последние три десятилетия работам, в основном зарубежных исследователей, обосновывающих возможность получения из экспериментальных спектров потерь энергии отраженных электронов дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов, характеризующего вероятность потерь энергии электроном при его взаимодействии с твердым телом.

По результатам анализа литературных данных сделан вывод о том, что спектры сечения неупругого рассеяния электронов имеют преимущества в сравнении с традиционно используемыми спектрами характеристических потерь энергии электронов для количественного анализа элементного состава и распределения элементов по глубине многокомпонентных композитных и слоистых структур.

Во **второй главе** представлены краткие сведения об аналитическом оборудовании, используемом в исследовании образцов методами электронной спектроскопии, технологических установках, на которых были получены исследуемые образцы, а также обсуждены методики и лицензионные программные продукты, используемые для обработки экспериментальных результатов.

Последующие главы с третьей по седьмую содержат основные результаты, полученные в диссертационном исследовании.

Важной составляющей, развиваемого автором нового подхода в количественном анализе в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов, является компьютерное моделирование дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов в рамках теории диэлектрического отклика твердого тела на движущийся электрон. Результаты разработки пакета компьютерных программ, позволяющего моделировать спектры сечения неупругого рассеяния электронов для широкого класса наноструктур, начиная с простейшей слоистой структуры пленка-подложка и заканчивая структурой, состоящей из произвольного числа слоев разной толщины, в каждом из которых можно задавать произвольное соотношение концентраций составляющих компонентов представлены в **третьей главе**.

В основу расчетов положена, известная из литературы и достаточно хорошо апробированная при исследовании различных материалов, модель взаимодействия электрона с твердым телом Юберо-Тоугаарда, в которой электрон пересекает границу поверхности по нормали, теряет определенную энергию в приповерхностной области твердого тела и возвращается по той же траектории в вакуум. В диссертационной работе обосновывается применение результатов расчета сечения неупругого рассеяния электронов для многокомпонентных однородных и слоистых структур.

В разработанном пакете программ имеется также компьютерная программа определения параметров Друде-Линхарда диэлектрических функций, составляющих структуру материалов из экспериментальных спектров эталонных чистых образцов необходимых для моделирования спектров сечения неупругого рассеяния электронов сложных структур.

Результаты применения развиваемого соискателем нового подхода в количественном анализе распределения элементов по глубине слоистой структуры на примере пленки диоксида кремния на кремниевой подложке представлены в **четвертой главе**.

Достоверность результатов, представленных в этой главе, обеспечивается детальным комплексным исследованием эталонных образцов кремния, диоксида кремния, а также исследуемых структур слоев диоксида кремния разной толщины на кремниевых подложках методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, электронной Оже-спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов и спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов.

Автором предложена методика определения распределения концентраций материалов в двухкомпонентной слоистой структуре SiO_2/Si путем сравнения экспериментальных и расчетных спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов, полученных при разных энергиях первичных электронов

Показано, что для слоев диоксида кремния на кремниевой подложке толщиной более 2 нм необходимо учитывать распределение материала пленки и подложки на границе раздела.

Пятая глава посвящена обсуждению результатов исследования двухкомпонентных однородных структур $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$ и $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, перспективных для разработки на их основе приборов нанофотоники и спинтроники. Основной результат – это доказательство того, что максимумы спектров сечения неупругого рассеяния электронов в структурах переходной металл-кремний линейно зависят от концентраций компонентов. Этот результат может быть использован для определения атомных концентраций исследованных структур.

Для твердых растворов германия и кремния впервые обнаружен эффект значительного возрастания максимумов спектров сечения неупругого рассеяния электронов при энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ. Экспериментально показано, что этот эффект пропорционален содержанию германия в структуре и может служить количественной мерой элементного состава твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.

В **шестой главе** представлены результаты исследований тонких пленок Fe различной толщины на кремниевых подложках и трехслойных структур Si/Fe/Si. Для интерпретации экспериментальных результатов использована методика, развитая ранее для двухкомпонентных структур Fe_xSi_{1-x} .

Наиболее интересными в этой главе являются результаты анализа возможности формирования различных фаз силицидов железа в слоистых структурах Fe/Si, полученных при разных температурах подложки. Убедительными являются также результаты исследования методом спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов трехслойной структуры Si/Fe/Si, представленные в этой главе, демонстрирующие образование силицидов железа при комнатной температуре.

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

Впервые проведено систематическое исследование спектров сечения неупругого рассеяния электронов различных фаз силицидов железа. Особенность спектров сечения неупругого рассеяния электронов этих материалов заключается в том, что из них невозможно достоверно определить энергии объемного и поверхностного плазмонов, являющиеся основными величинами характеризующими материал. Это связано с тем, что пики объемного и поверхностного плазмонов этих материалов неразрешены по энергии. В диссертационной работе показано, что разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов на универсальные функции Тоугаарда позволяет однозначно и достоверно определить эти энергии. Важным результатом является доказательство того, что амплитуда и площадь пика объемного плазмона более чувствительны к элементному составу силицида, чем традиционно используемая в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов его энергия.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 56 печатных трудах, в том числе в 23 статьях в ведущих журналах из перечня ВАК.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена:

1. Корректностью постановки научной проблемы, принятых допущений, обоснованностью выбранных методов исследований;
2. Большим объемом численного моделирования, использованием корректных и широко апробированных математических моделей, достоверной первичной информацией.

Новизна и достоверность научных результатов

В диссертационной работе А.С. Паршина впервые получены новые результаты, основные из которых: разработка компьютерных программ моделирования сечения неупругого рассеяния наноструктур в рамках теории диэлектрического отклика; разработка методики послойного анализа слоистых структур, в основе которой сравнение экспериментальных и расчетных спектров сечения неупругого рассеяния электронов, полученных при разных значениях энергии первичных электронов; установление линейной зависимости максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов в композитных структурах переходных металлов (Fe, Mn) и кремния; обнаружение существования максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов в твердых растворах германия и кремния. Эти и ряд других результатов являются оригинальными и получены автором впервые.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием корректных и широко апробированных моделей, достоверной первичной информацией, подтверждается результатами моделирования и экспериментальной обработки.

Замечание к диссертационной работе:

Диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. Для моделирования сечения неупругого рассеяния электронов автором используются результаты, полученные в модели Юберо-Тоугаарда. Однако, в обзорной главе отмечается, что известны и другие модели для расчета сечения неупругого сечения электронов из диэлектрической функции. В работе нет объяснения, почему была выбрана для расчетов именно эта модель.
2. Получен интересный результат при исследовании зависимости спектров сечения неупругого рассеяния электронов от энергии первичных электронов в твердых растворах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. В работе нет анализа возможных причин эффекта возрастания максимального значения максимума спектра сечения неупругих электронов при энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ.
3. Имеются опечатки, орфографические ошибки, стилистические неточности в тексте диссертации.

Но приведенные замечания не снижают общий уровень научной работы и значимость полученных результатов, которые в полной мере раскрыты в тексте самой диссертации и автореферата.

Диссертационная работа Паршина А.С. является законченным трудом, выполненным на должном научном уровне. Результаты, приведенные в работе, научно обоснованы, содержат в себе решение актуальной и практически значимой проблемы. Основные положения и результаты работы докладывались автором и получили одобрение на 28 международных и всероссийских конференциях, отражены в 23 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК Российской Федерации. Положения, выносимые на защиту, полностью доказаны результатами работы. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.С. Паршина отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с Положением о порядке присуждения учёных степеней ВАК Российской Федерации. Диссертация соответствует

требованиям пункта 9 вышеупомянутого Положения, а ее автор Паршин Анатолий Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

профессор кафедры квантовой электроники
и фотоники радиофизического факультета
Национального исследовательского Томского
государственного университета (НИ ТГУ),
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – Физика
полупроводников и диэлектриков

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,

НИ ТГУ, РФФ

Тел. 8-960974-5623

Эл. Почта: kokh@mail.tsu.ru

Я согласен на обработку персональных данных

27.10.2017

 Андрей Павлович Коханенко

