

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.074.04 НА БАЗЕ
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Иркутский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета
от «15» ноября 2017 г. № 7

О присуждении Паршину Анатолию Сергеевичу, гражданину РФ, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Спектроскопия неупруго отраженных электронов твердотельных наноструктур элементарных полупроводников, магнитных металлов и их соединений» по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния принята к защите 30 июня 2017 г., протокол №2, диссертационным советом Д 212.074.04 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20, приказ Рособнадзора о создании диссертационного совета № 1634–894 от 13.07.2007 г.).

Соискатель Паршин Анатолий Сергеевич 1946 года рождения. В 1969 году окончил физический факультет Красноярского государственного университета с присвоением квалификации «Физика». В 1980 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Диссертация выполнена на кафедре технической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (до 2017 года – «Сибирский

государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева») Министерства образования и науки Российской Федерации.

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»;

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;

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»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), г. Москва - в своём положительном заключении, подписанном Никитиным Сергеем Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ, и Хохловым Дмитрием Ремовичем, член-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния

физического факультета МГУ, и утверждённом Федяниным Андреем Анатольевичем, проректором Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, профессором, указала, что 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 № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Соискатель имеет более 130 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 56 работ: из них 23 статьи в журналах, включённых ВАК РФ в «Перечень ведущих рецензируемых журналов», журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и 33 в тезисах докладов всероссийских и международных конференций и других изданиях. В работах представлены результаты по исследованию физико-химических свойств полупроводниковых, магнитных материалов и их соединений методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов, обоснован новый подход в количественном анализе элементного состава и послойного распределения элементов многокомпонентных однородных и многослойных структур. Имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты, полученные в диссертационной работе, вошли в материалы учебного пособия «Электронная спектроскопия поверхности твердых тел». В диссертации не обнаружены недостоверные сведения об

опубликованных соискателем ученой степени работах, авторском вкладе и объеме научных изданий.

Наиболее значимые научные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. 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.

2. 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).

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Паршин А.С. Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых системах $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ / А.С. Паршин, С.А. Кущенко, О.П. Пчеляков, Ю.Л. Михлин, Т. Хасанов // Автометрия. – 2012. –Т. 48, № 4. – С. 88-92.

8. 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.

9. 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.

10. Паршин, А.С. Спектроскопия характеристических потерь энергии отраженных электронов в тонких пленках системы $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ / 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Официальный оппонент *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». Замечания: по мнению оппонента положения 3 и 5 являются в определенной степени продолжением положения 1, и их следует рассматривать совместно; положение 6 не имеет самостоятельного фундаментального значения; определенным недостатком положений 1, 3 и 5 является их полуэмпиричность; высказано сожаление, что теоретические разработки соискателя опубликованы только в журналах

материаловедческого профиля. Замечания по оформлению диссертации: на с.42 в таблице 1.1, первая строка снизу: не окончена фраза, определяющая величину V^N ; на стр.60 дважды неверно указана ссылка на номер формулы 1.80; на стр. 92 в предложении «... остальная (1- θ) часть электронов не взаимодействует с материалом *подложки* (надо *пленки*)...»; стр. 112, написано «...Затем они после численного *интегрирования* (надо *дифференцирования*) были представлены ... в дифференциальном виде...»; стр. 136 написано «... Первичное *возрастание* λK_{max} (надо *уменьшение*) ...»; на стр. 197 неверно указана ссылка на рис. 5.28 (должно быть 5.27); стр.224, неверно дана ссылка на рис.3 (должно быть 6.11). Кроме того имеются погрешности в оформлении некоторых рисунков. Так, на стр. 227 на рис.6.16 обозначения спектров, полученных при энергиях 300 эВ и 1900 эВ надо поменять местами; на рис. 6.17 спектры, полученные после 5 и 10 мин. ионного травления совпадают со спектрами для Fe для энергии первичных электронов, равной 300 эВ, а не 1200 эВ, как это указано на рис. 6.17; на стр. 263, на рис. 7.15 спектр сечения неупругого рассеяния для энергии первичных электронов 300 эВ для Fe, не согласуется по форме со спектром, приведенным на рис. 5.5 также для энергии первичных электронов 300 эВ. Кроме того, λK_{max} -спектры систем Si/Fe(d) и Fe/Si(d), приведенные на рис. 6.4 и 6.5 для энергий первичных электронов 1100 эВ, трудно сравнивать со спектрами для системы Fe_xSi_{1-x} , так как в гл. 5 приводятся спектры только для энергии первичных электронов 300 эВ, существенно отличающиеся от приведенных в главе 6.

Официальный оппонент *Мяжков 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. Замечания: 1) Для первичных энергий меньше 1000 эВ в результате интерференции вклады от поверхностных и объёмных возбуждений не могут быть разделены в модели Тоугаарда и это активно

обсуждается (например, Н. Jin et al., J. Appl. Phys. 107 (2010) 083709). Разумно было кратко привести альтернативные модели. 2) К сожалению в выводах не показано влияние ориентаций (111) и (001) подложки Si на спектр сечения неупругого распределения. 3) В диссертации отсутствуют экспериментальные доказательства (например, рентгеновские данные) присутствия FeSi_2 , FeSi и Fe_5Si_3 фаз в исследуемых образцах. 4) Моделируя островковую плёнку уместно было рассмотреть более реальную островковую структуру, состоящую не из прямоугольных, а из полусферических островков. 5) Неясно как изменится расчёт сечения неупругого рассеивания, используя программу MLCS7, взаимной заменой слоёв с разными концентрациями в слоях (п.3.5). 6) Не обсуждается минимум при $\sim 27\text{эВ}$ для спектра Si (Рис 4.14), который не показывает расчётный спектр. 7) В подписи к Рис. 4.17. вместо $\text{Si}(7\text{нм})/\text{Si}(001)$ должно быть заменено на $\text{SiO}_2(7\text{нм})/\text{Si}(001)$. 8) Нет однозначного ответа на вопрос, может ли формироваться силицид марганца в композитной структуре $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$ при $x > 0.2$ (п. 5.2.), как это имеет место в $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ плёнках. 9) В списке публикаций не выделена литература, рекомендованная ВАК.

Официальный оппонент *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».

Замечания: 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.

Ведущая организация – *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»*, г. Москва.

Замечания: 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 $K\lambda$ -спектре (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.

Отзывы на автореферат:

1. *Гнучев Николай Михайлович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого. Замечания:

1) Исследования характеристических потерь энергии электронов в элементарных полупроводниках и переходных металлов вряд ли могут быть элементом новизны работы. Новым результатом можно лишь анализ спектров сечения неупругого рассеяния; 2) П.2. и П.4, на мой взгляд, можно было объединить, т.к. они одинаковы по смыслу и отличаются только объектами исследования 3) Не понятно, почему произведение дифференциального сечения неупругого рассеяния и длины неупругого пробега электронов $\lambda \cdot K$ –

ордината на графиках спектров сечения неупругого рассеяния – имеет размерность эВ^{-1} .

2. *Бахтизин Рауф Загидович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники и нанофизики Башкирского государственного университета. Замечаний нет:

3. *Бержанский Владимир Наумович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экспериментальной физики Физико-технического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». Замечаний нет.

4. *Сандитов Дамба Сангадиевич*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики неупорядоченных систем Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова. Замечаний нет.

5. *Шиманский Александр Федорович*, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Композиционные материалы и физикохимия металлургических процессов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет». Замечания: 1) учитывалось ли наличие поверхностных электронных состояний, например, в полупроводниковых материалах, и возможное их влияние на результаты экспериментов; 2) Проводилось ли сравнение результатов проведенных исследований с результатами, полученными другими методами, можно ли говорить о преимуществах разработанных автором методов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их достижений в области физики конденсированного состояния, наличием публикаций по данному направлению, а также способностью определить научную и практическую значимость диссертационной работы. Официальный оппонент доктор физико-математических наук, *Козаков А.Т.* – известный учёный, методы электронной

спектроскопии используются им для решения ряда задач по повышению надежности и качества изделий микроэлектроники, материалов и изделий для приборов ночного видения, для совершенствования методов упрочнения поверхностных слоев деталей машин и механизмов. Имеет более 100 научных работ, в том числе в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах. Официальный оппонент доктор физико-математических наук, *Мяжков В.Г.* – высококвалифицированный специалист в области физики конденсированного состояния. Его научные статьи по синтезу и исследованию магнитных свойств тонкопленочных структур магнитный металл-полупроводник опубликованы в авторитетных российских и зарубежных изданиях. Имеет более 150 научных публикаций. Официальный оппонент, доктор физико-математических наук *Коханенко А.П.* известный специалист в области разработки и диагностики фоточувствительных и излучательных наногетероструктур на основе элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Автор более 200 научных публикаций в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях. Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» – ведущий исследовательский центр России в области физики, в частности, физики конденсированного состояния. *Никитин С.А.*, доктор физико-математических наук – высококвалифицированный специалист по экспериментальному исследованию магнитных свойств редкоземельных металлов, сплавов и интерметаллических соединений. Общее количество публикаций более 250. *Хохлов Д.Р.*, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук специалист мирового уровня в области полупроводниковых наноструктур и фотоприемных устройств на их основе. Автор более 350 научных работ.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **предложен** оригинальный подход к количественному анализу элементного состава с использованием спектров

сечения неупругого рассеяния электронов ($K\lambda$ -спектров). **Проведено** комплексное исследование методами электронной спектроскопии отраженных электронов элементарных полупроводников, переходных металлов и их соединений. **Показано**, что количественный анализ спектров сечения неупругого рассеяния электронов дает более полную и достоверную информацию о физико-химических свойствах материалов, чем традиционно используемые спектры характеристических потерь энергии отраженных электронов. Экспериментально **установлено**, что для композитных структур Fe_xSi_{1-x} и Mn_xSi_{1-x} наблюдается линейная зависимость максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов от атомной концентрации элементов. На основе теории диэлектрического отклика **разработан** пакет компьютерных программ для моделирования спектров сечения неупругого рассеяния электронов композитных и различных слоистых структур. **Предложена** методика количественного послойного анализа слоистых структур, в основе которой лежит сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов. **Развита** методика изучения тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов путем разложения этих спектров на элементарные составляющие в виде универсальных функций Тоугаарда.

Теоретическая значимость исследования определяется получением новых результатов о процессах неупругого рассеяния электронов в Si, Fe, Mn, силицидах железа, различных тонкопленочных структур. Показана применимость существующих теоретических моделей для количественного анализа элементного состава и распределения элементов по глубине в композитных и слоистых структурах.

Применительно к проблематике диссертации результативно использован широкий набор современных экспериментальных методов исследований, таких как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, Оже-электронная спектроскопия, спектроскопия характеристических потерь

энергии электронов, спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов, сканирующая зондовая микроскопия, малоугловое рентгеновское рассеяние. Обработка экспериментальных результатов осуществлялась с использованием лицензионных программных продуктов; **изложены** преимущества использования для количественного анализа спектров сечения неупругого рассеяния электронов в сравнении со спектрами характеристических потерь энергии электронов; **раскрыты** особенности спектров сечения неупругого рассеяния электронов в структурах $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ и $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$ **обнаружена** корреляция спектров сечения неупругого рассеяния электронов в твердых растворах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с содержанием германия; **изучены** механизмы потерь энергии электронов с использованием разложения экспериментальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные пики.

Значения полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработаны** оригинальные методики количественного элементного анализа и распределения элементов по глубине слоистых структур, позволяющие диагностировать материалы при создании новой элементной базы нанoeлектроники; **определены** перспективы применения этих методик для изучения фундаментальных свойств наноструктур для практического использования в устройствах нанoeлектроники, нанофотоники и спинтроники, а также контроля технологических процессов их получения;

Оценка достоверности результатов исследования: для **экспериментальных работ** результаты получены с использованием апробированных методов анализа на современном сертифицированном оборудовании; **выводы базируются** на обобщении результатов современных теоретических и экспериментальных исследований в области электронной спектроскопии и физики полупроводниковых и магнитных материалов; **использованы** современные методики сбора и обработки экспериментальных результатов.

Личный вклад соискателя состоит 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 непосредственным научным руководством аспирантами и сотрудниками СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Диссертационный совет пришёл к выводу, что диссертация Паршина А.С. является законченным научным исследованием, выполненным по актуальной тематике, результаты которого имеют высокую научную и практическую значимость. Работа соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а также отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям.

На заседании 15 ноября 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Паршину А.С. учёную степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в совет, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительный бюллетень – 1.

Зам. Председателя
диссертационного совета Д 212.074.04,
доктор физико-математических наук,
профессор



Афанасьев Николай Тихонович

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.074.04,
доктор физико-математических наук,
доцент

Гаврилюк Алексей Александрович

15 ноября 2017 г.