

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», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

1. Актуальность

Современное развитие приборной базы микроэлектроники характеризуется стремлением к миниатюризации всех её компонентов. На этом пути имеется ряд проблем, одной из которых является проблема анализа элементного состава и химической связи микро и наноразмерных участков по площади и от нескольких ангстрем до сотен нанометров по глубине устройств микроэлектроники, а также совершенно новых приборов и устройств для нанофотоники, наноэлектроники, спинтроники и, вообще, всех структур, функционирование которых основано на свойствах границы раздела материалов и проявляющихся в них поверхностных эффектах.

Для их исследований, начиная с 60-х годов прошлого столетия, было разработано много методов (более 60), использующих в своей основе разные физические принципы, в том числе методы на основе фотоэффекта или возбуждения электронной системы твердого тела электронным зондом, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, оже - электронная спектроскопия, метод характеристических потерь электронов и др. Несмотря на уже имеющееся большое количество методов исследования поверхностных свойств, потребности фундаментальных и прикладных исследований требуют создания новых методов, позволяющих получать информацию, относящуюся к поверхности, и которую невозможно, труднее или менее точно можно получать с помощью традиционных методов исследования. К таким методам относится развиваемый Паршиным А. С. метод на основе использования произведения λ (длина свободного пробега неупругих электронов) на $K(T)$ (дифференциальное се-

чение неупругого рассеяния электронов), называемого им спектром сечения неупругого рассеяния электронов. На основе этих спектров соискатель разработал метод количественного анализа некоторых композитных структур магнитных материалов и многослойных структур полупроводниковой электроники с использованием вариации энергии электронного зонда. Поскольку эти материалы и структуры широко применяются в современной электронной промышленности разработка такого метода является очень **актуальной**.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 193 источников и списка собственных публикаций соискателя из 56 источников. Материал диссертации изложен на 319 страницах машинописного текста, содержит 139 рисунков, 30 таблиц.

Вся совокупность важнейших результатов диссертанта представлена в сформулированных им шести научных положениях, из которых не все представляются оппоненту одинаковыми по значимости. По мнению оппонента, положения 3 и 5 являются в определенной степени продолжением положения 1, т.е. применением сформулированных в положении 1 принципиальных подходов для исследования многослойных структур диоксид кремния/кремний и железо/кремний. С другой стороны без проведения этих исследований положение 1 выглядело бы неубедительным. Поэтому их можно рассматривать совместно. Главы 3, 4 и частично 6, на основе которых сформулированы эти научные положения, представляют собой обоснование метода количественного анализа элементного состава твердотельных наноструктур, заключающийся в моделировании в рамках теории диэлектрического отклика дифференциального сечения неупругого рассеяния отраженных электронов.

Положение 2 является равноценным по значимости положению 1 и представляет собой развиваемый соискателем второй подход в использовании спек-

тров сечения неупругого рассеяния электронов для количественного элементного анализа ряда бинарных и важных для электронной промышленности композитных материалов, таких как $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.

Положение 4 представляет собой формулировку интересного и необъясненного соискателем эффекта, возрастания максимума произведения дифференциального сечения неупругого рассеяния и длины неупругого пробега электронов в твердых растворах германия и кремния при энергиях первичных электронов около 450 эВ. Этот эффект заложен в основу метода количественного элементного анализа системы $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, для которой без этого эффекта было бы невозможно осуществлять этот анализ с использованием принципов методики, изложенной в положении 2.

Наконец, по мнению оппонента, положение 6 не имеет самостоятельного фундаментального значения. Это совокупность интересных результатов по применению универсальных функций сечения неупругого рассеяния Тоугаарда для разложения на компоненты спектров сечения неупругого рассеяния электронов железа, марганца и силицидов железа. В рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии часто используются гауссовы, дисперсионные функции или их комбинации для разложения на компоненты рентгеновских фотоэлектронных спектров остовных уровней. В этом отношении методика, предложенная соискателем в шестом положении, является аналогичной методикам разложения фотоэлектронных спектров остовных уровней. Оппоненту не совсем понятна необходимость выделения результатов, полученных с помощью предложенной им методики в отдельное научное положение. Ведь Тоугаард и придумал универсальные функции для описания спектра неупругих электронов?

Поэтому остановимся сначала на положениях 1, 3 и 5 более подробно. В их основе лежит модель Юберо-Тоугаарда, разработанная для расчета сечения неупругого рассеяния электронов в случае простейшей траектории движения электрона в полубесконечной однородной слоистой среде. Диссертант Паршин А.С. развил её для многокомпонентных композитных структур материалов с разными диэлектрическими функциями, структуры пленка-

подложка с однородной сплошной и островковой пленкой материала, отличающегося от материала подложки, трехслойной структуры пленка-интерфейс - подложка и многослойной структуры с различным соотношением концентраций составляющих материалов в каждом слое. На основе развитой им модели было создано несколько компьютерных программ для моделирования спектров сечения неупругого рассеяния электронов с целью количественного анализа элементного состава, распределения элементов по глубине и морфологии поверхности многокомпонентных слоистых структур. Развитая Паршиным А.С. модель расчета и компьютерные программы, реализующие эту модель описаны в главе 3. Однако только успешное применение этих программ к анализу распределения по глубине конкретных структур SiO_2/Si , Si/Fe , Fe/Si в главах 4 и 6 убеждает в верности формулировок 1-го, 3-го и 5-го положений. Определенным недостатком этих положений, хочется надеяться, что временным, является их полуэмпиричность. Казалось бы при наличии сложных компьютерных программ, реализующих сложные процессы взаимодействия движущегося электрона с электронной системой твердого тела неправомерно говорить об полуэмпирическом подходе. Полуэмпиричность используемого диссертантом подхода заключается в том, что из известных фундаментальных основ физики взаимодействия движущегося электрона с твердым телом вовсе не вытекает, что формулы, описывающие это взаимодействие, можно использовать для количественного анализа. Многие методы количественного анализа поверхности, например, такие как рентгеновская фотоэлектронная и оже – электронная спектроскопия основаны на том, что процесс возбуждения и эмиссии регистрируемого электрона связаны с конкретным атомом. Поэтому увеличение количества регистрируемых электронов связано в конечном итоге с увеличением количества излучающих атомов. В реализуемом соискателе подходе речь идет о вкладе в сечение неупругого рассеяния тех электронов, которые потеряли энергию в результате неупругого взаимодействия на определенном расстоянии от поверхности слоистой структуры, характеризуемой диэлектрической проницаемостью ϵ

среды в данной области структуры. Связь ε с количеством атомов данного сорта вовсе не очевидна и была установлена сравнением результатов компьютерных расчетов с экспериментом.

Возможность количественного анализа в рамках второго подхода, сформулированного в положении 2, связана с установленной соискателем линейной зависимостью величины максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов от атомных концентраций соответствующих компонентов в композитных структурах $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$. Хотя соискатель подчеркивает в ряде мест, что интенсивности пика спектра сечения неупругого рассеяния электронов представляется в абсолютных единицах, априори вовсе не ясно, что в бинарной композитной структуре интенсивность пика спектра сечения неупругого рассеяния электронов может быть представлена в виде суммы соответствующих максимумов спектра сечения неупругого рассеяния электронов, рассчитанных из экспериментальных спектров эталонных образцов. В этом также состоит полуэмпиричность предлагаемого соискателем метода количественного анализа. Доказательство верности положения 2, несомненно, представляет собой заслугу соискателя. Вместе с тем, хочется надеяться, что со временем он сможет найти аналитические выражения, которые послужат обоснованием для количественного анализа не только для $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$, но и других бинарных материалов полупроводниковой электроники с помощью развиваемых им в диссертации методов.

3. Научная новизна полученных результатов заключается в основном в том, что автор распространил модель Юберо- Тоугаарда на неоднородную структуру, состоящую из тонкой пленки, нанесенной на подложку из материала с другими диэлектрическими свойствами. В рамках этой модели им разработан пакет компьютерных программ для моделирования на основе теории диэлектрического отклика спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов. С помощью этих программ соискатель моделировал спектры 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.

Диссертант предложил два новых подхода к количественному анализу многослойных и композитных структур, один из которых основан на сравнении вычисленного из эксперимента и рассчитанного с использованием теории диэлектрического отклика спектров сечения неупругого рассеяния; а другой на предположении, что интенсивность максимума спектров сечения неупругого рассеяния может быть представлена в виде суммы интенсивностей максимума спектров сечения неупругого рассеяния от эталонных образцов с соответствующими весовыми долями.

Паршин А.С. впервые обнаружил эффект возрастания максимума спектра сечения неупругого рассеяния электронов германия и его соединений с кремнием для энергии первичных электронов приблизительно 450 эВ и на основе этого эффекта впервые разработал методику количественного элементного анализа системы $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.

4. Достоверность результатов.

Достоверность полученных результатов определяется целым рядом факторов:

- созданным соискателем пакетом программ для моделирования на основе теории диэлектрического отклика спектров сечения неупругого рассеяния отраженных электронов на базе апробированных моделей;
- тщательностью изготовления тестовых образцов и подготовкой их поверхности для исследований;
- получением и тщательным анализом экспериментальных спектров характеристических потерь для нескольких энергий электронов электронного зонда;
- хорошим совпадением результатов, полученных соискателем, с результатами полученными другими методами исследования поверхности.

5. Полнота опубликования результатов и содержания автореферата

Собственные публикации следующим образом распределяются по источникам. 11 статей было опубликовано в таких центральных физических журналах, как Приборы и техника эксперимента, Физика и техника полупроводников, Физика твердого тела, Поверхность (Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования); Письма в журнал технической физики. 4 статьи были опубликованы в журналах, издаваемых Уральским и Сибирским отделениями РАН.

31 публикация сделана в материалах конференций, посвященных в основном материалам электронной техники, магнитным материалам или фундаментальным вопросам физики. В этом отношении метод анализа состава материалов микроэлектроники на материаловедческих конференциях получил достаточную апробацию. Однако, соискатель разрабатывает новый спектроскопический метод. Было бы желательно, чтобы разрабатываемые им подходы были изложены и обсуждены на соответствующих спектроскопических конференциях, как в России, так и за рубежом, где присутствующие специалисты могли бы разобраться в тонкости и правильности используемых соискателем подходов.

Кроме того, докторская диссертация Паршина А. С. посвящена методу, основанному на применении теорий неупругого рассеяния электронов, разработанных в основном иностранными учеными, в частности Тоугаардом, теорию и программу для вычисления произведения $\lambda K(T)$ которого он использовал для получения большей части своих результатов. Мне кажется, что диссертация выглядела бы более физически обоснованной, если бы соискатель сделал ряд публикаций в тех англоязычных журналах, в которых публиковался Тоугаард, разрабатывая свои подходы к вычислению произведения $\lambda K(T)$. Список соискателя содержит две публикации на английском языке, это публикации в журналах «The Physics of Metals and Metallography,

Suppl.» и IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Однако, эти журналы материалovedческие, причем первый на самом деле является отечественным журналом «Физика металлов и металловедение».

Делая заключение по этому необходимому этапу обсуждения диссертации, хотелось бы отметить, что по минимальному количеству публикаций для соискателей докторской степени диссертация Паршина А. С. **удовлетворяет современным требованиям ВАК**, хотя было бы желательно учесть вышеприведенные замечания и пожелания

Также можно отметить рациональную структуру и объем отдельных глав, ясность и убедительность изложения, информативность графического материала и таблиц, исчерпывающий перечень литературы по вопросам диссертации. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание, новизну, защищаемые положения и выводы. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

6. Замечания

Диссертационная работа в целом представляет законченное, целостное научное исследование, с хорошим стилем изложения. В то же время, при оформлении диссертации им допущен ряд погрешностей.

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 представленыв 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 приведенном 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.

Следует отметить, что отмеченные погрешности изложения и рисунков не влияют на основные научные положения и выводы диссертанта.

7. Заключение

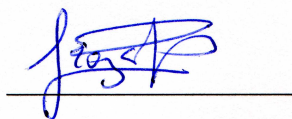
На основании вышеизложенного можно заключить, что автором выполнена научно-квалификационная работа, в которой разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение».

Диссертация Паршина А.С. представляет собой достаточно оригинальное и завершённое научное исследование, отличающееся актуальностью темы, новизной и практической значимостью полученных результатов, которые докладывались на ряде российских и международных конференций, а также опубликованы в ряде изданий, включая центральные научные журналы.

Диссертационная работа Паршина А.С. полностью соответствует требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г №842

«О порядке присуждения ученых степеней»., а ее автор, Паршин Анатолий Сергеевич, вполне заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»»

Козаков Алексей Титович



Официальный оппонент, доктор физико - математических наук, профессор , зав.отделом рентгеновской и электронной спектроскопии, зав. лабораторией физики поверхности и гетероструктур Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета (ЮФУ).

Шифр и наименование специальности, по которой подписавший защитил диссертацию : 01.04.07 –физика твердого тела.

Адрес: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

Тел: 89185389885

Эл. почта: kozakov_a@mail.ru

Я согласен на обработку персональных данных.

Подпись профессора Козакова А.Т. удостоверяю:

14.10.2017.

