

На правах рукописи

Игуменов Александр Юрьевич

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ
КРЕМНИЯ И ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2016

Работа выполнена на кафедре технической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент

Паршин Анатолий Сергеевич

**Официальные
оппоненты:**

Мисюль Сергей Валентинович

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры физики твердого тела и
нанотехнологий ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»
(ФГАОУ ВО СФУ)

Мягков Виктор Григорьевич

доктор физико-математических наук,
профессор, старший научный сотрудник
ФГБУН «Институт физики им.
Л.В. Киренского» Сибирского отделения
Российской академии наук
(ФГБУН ИФ СО РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова» СО РАН
(ФГБУН ИФП СО РАН)

Защита состоится «___» _____ 2016 г. в _____ 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 «___» _____ 2016 г.

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

_____ Б.В. Мангазеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для исследования наноматериалов широко используются методы электронной спектроскопии, позволяющие исследовать элементный состав, распределение элементов по глубине, определять толщины поверхностных слоев. Из традиционных методов электронной спектроскопии, таких как Ожэ-электронная спектроскопия (ОЭС), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) и спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) наибольшими сложностями в интерпретации экспериментальных результатов сопровождается СХПЭЭ [1, 2]. В первую очередь это связано со сложностью самой физики неупругого взаимодействия электронов с веществом, экспериментальное исследование которой затрудняется множеством аппаратных факторов.

Значительным шагом на пути развития СХПЭЭ стала разработка метода спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов [3]. Данный метод предполагает расчет из спектров потерь энергии отраженных электронов спектров сечения неупругого рассеяния электронов. Эти спектры представляют собой зависимости произведения средней длины неупругого пробега электронов λ и дифференциального сечения неупругого рассеяния $K(E_0, T)$ ($K\lambda$ -спектры [4]) от энергии потерь T , равной разности между энергией первичных (E_0) и отраженных (E) электронов, $T = E_0 - E$. Определение произведения λK по методу Тоугаарда [3] основано на следующем соотношении:

$$\lambda K(E_0, E_0 - E) = \frac{1}{c} \left[j(E) - \int_E^{E_0} \lambda K(E_0, E' - E) j(E') dE' \right],$$

где $j(E)$ – экспериментальный спектр ХПЭЭ, c – площадь упругого пика.

В отличие от исходных спектров потерь энергии электронов, в спектрах сечения неупругого рассеяния электронов удалены многократные потери. Интенсивность потерь энергии измеряется в абсолютных единицах, что позволяет исследовать с большей достоверностью зависимости интенсивностей поверхностных и объемных возбуждений от энергии первичных электронов и угла эмиссии [5]. Для анализа $K\lambda$ -спектров широко используются методы математического анализа [4, 5, 6]. Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов позволяет решать такие актуальные задачи физики поверхности, как количественное определение элементного состава, исследование распределения элементов по глубине, определение толщин поверхностных слоев, вычисление оптических постоянных, расчет параметра поверхностных возбуждений. Разработка спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов сопровождается возникновением различных методов анализа $K\lambda$ -спектров, активно развивающихся в настоящее время.

Несмотря на широкую распространенность традиционных методов электронной спектроскопии, в некоторых случаях анализ химического состава исследуемых структур оказывается затруднительным. Ярким примером этого является система Fe-Si, перспективная как для фундаментальных исследований, так и для прикладного применения в устройствах наноэлектроники, спинтроники и фотоники [2, 7]. При синтезе железокремниевых структур происходит образование силицидов, достоверное определение элементного состава которых вызывает сложности, поскольку химические сдвиги в РФЭС практически не зависят от состава силицидов железа, а энергии объемного плазмона, по которым производится качественное определение элементного состава в СХПЭЭ, полученные разными авторами, дают весьма противоречивые результаты [2].

В работах [8-11] показано, что спектры сечения неупругого рассеяния электронов чувствительны к составу многокомпонентных структур и позволяют проводить количественный элементный анализ. Поскольку метод $K\lambda$ -спектроскопии возник относительно недавно, систематическое исследование железокремниевых структур этим методом не проводилось, и в данном направлении могут быть получены новые результаты, имеющие значение для фундаментальной и прикладной науки.

В диссертационной работе предложен и развит подход к анализу тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов, основанный на аппроксимации экспериментальных спектров Лоренцево-подобными пиками Тоугаарда. Проведено исследование Si, Fe, Mn и силицидов железа $FeSi_2$, $FeSi$, Fe_5Si_3 совместно методами спектроскопии характеристических потерь энергии электронов и спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов, исследована тонкая структура $K\lambda$ -спектров.

Цель и задачи исследования

Цель работы: комплексное исследование структур на основе кремния и переходных металлов методами электронной спектроскопии. Исследование тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов с использованием разложения экспериментальных спектров на элементарные составляющие. Применение авторского подхода к анализу тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов для количественного анализа физико-химических свойств многокомпонентных структур на основе кремния и переходных металлов.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Провести сравнительный анализ спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si, Fe, Mn и силицидов железа $FeSi_2$, $FeSi$, Fe_5Si_3 .

2. Исследовать возможность анализа тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов путем аппроксимации экспериментальных спектров Лоренцево-подобными универсальными функциями сечения неупругого рассеяния электронов Тоугаарда и применения этого подхода для определения энергий и природы пиков потерь, расчета параметра поверхностных возбуждений.

3. Провести анализ тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si, Fe, Mn и силицидов железа FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃. Исследовать влияние содержания железа на параметры подгоночных пиков в тонкой структуре спектров сечения неупругого рассеяния электронов.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Впервые систематически исследованы силициды железа разного состава методом спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов.

2. Впервые проведен сравнительный анализ спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si, Fe, Mn и силицидов железа FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃.

3. Предложен новый подход к анализу тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов, который применен для исследования Si, Fe, Mn и силицидов железа FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃. Проведен анализ неразрешенных пиков потерь, определены их энергии и природа, рассчитан параметр поверхностных возбуждений отдельных пиков потерь.

Теоретическая и практическая значимость работы

Сравнительный анализ спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si, Fe, Mn и силицидов железа FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃ показал, что спектры сечения неупругого рассеяния электронов более чувствительны к элементному

составу. Если состав силицидов железа практически не влияет на величину химических сдвигов и энергию характеристических пиков, то гораздо в большей степени от него зависит амплитуда спектров сечения неупругого рассеяния электронов. Этот результат отражает целесообразность применения спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов для элементного анализа железокремниевых структур.

В работе предложен и развит новый подход к анализу тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов, позволяющий решать актуальные задачи физики поверхности и электронной спектроскопии. Данный подход использован для определения энергий, интенсивностей и природы пиков потерь, анализа неразрешенных по энергии пиков потерь в экспериментальных спектрах. Он позволяет рассчитывать параметр поверхностных возбуждений, играющий важную роль в количественном анализе электронных спектров, с детализацией до вкладов отдельных поверхностноподобных пиков.

Амплитуда подгоночного пика, описывающего потери энергии на возбуждение объемного плазмона, чувствительна к составу силицидов железа. В отличие от традиционных методов электронной спектроскопии, предложенный подход к анализу спектров сечения неупругого рассеяния электронов позволяет однозначно идентифицировать силициды разного состава.

Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили значительно увеличить объем информации о процессах неупругого рассеяния электронов в Si, Fe, Mn и силицидах железа FeSi_2 , FeSi , Fe_5Si_3 . Полученные результаты важны как с точки зрения фундаментальной науки, поскольку содержат новые сведения о неупругом взаимодействии электронов с различными материалами, так и для прикладного применения – в первую очередь для синтеза гетероструктур, где важна высокая точность определения элементного состава.

Методология и методы исследования

Исследованы различные образцы Si: промышленные монокристаллические подложки разной ориентации, эпитаксиальный слой Si толщиной 50 нм на промышленной подложке Si (100), полученный методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Образцы Fe и Mn изготовлены методом термического испарения в условиях высокого вакуума. Силициды железа FeSi_2 , FeSi , Fe_5Si_3 изготовлены сплавлением смеси железа и кремния в атомных соотношениях 1×2, 1×1, 5×3 в условиях высокого вакуума на установке УВН-2М-1.

Регистрацию спектров ХПЭЭ, РФЭС и ОЭС проводили на фотоэлектронном спектрометре UNI-SPECS производства SPECS, Германия.

Расчет спектров сечения неупругого рассеяния электронов проводился в программном пакете QUASESTM XS REELS. Обработка спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния электронов выполнялась в программном пакете для численного анализа данных и научной графики Origin 8 фирмы OriginLab Corporation. Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов исследовалась путем разложения $K\lambda$ -спектров на элементарные пики потерь, форма которых описывалась трехпараметрическими Лоренцево-подобными функциями Тоугаарда. Эта функция была модифицирована автором диссертации, что позволило задавать энергию пика одним параметром. Аппроксимация выполнялась в программном пакете Origin 8.

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием современного научного оборудования, лицензионного программного обеспечения, а также воспроизводимостью результатов экспериментов и предлагаемых методов их обработки. Представленные в

диссертации выводы согласуются с результатами, полученными другими авторами, работающими в области электронной спектроскопии.

Положения, выносимые на защиту

1. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов более чувствительны к элементному составу, чем спектры характеристических потерь энергии электронов: амплитуды $K\lambda$ -спектров более чувствительны к составу силицидов железа, чем энергии характеристических пиков в СХПЭЭ и химические сдвиги в РФЭС.

2. Возможность определения энергий, интенсивностей и природы пиков потерь, в том числе неразрешенных по энергии, в $K\lambda$ -спектрах Si, Fe, Mn и силицидов железа $FeSi_2$, $FeSi$, Fe_5Si_3 с использованием нового авторского подхода, заключающегося в разложении спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные составляющие.

3. Изменение энергетического положения экспериментальных максимумов и ширины спектра с изменением энергии первичных электронов является следствием перераспределения вкладов поверхностной и объемной природы, что установлено на основании разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные составляющие.

4. Расчет параметра поверхностных возбуждений отдельных пиков потерь в Si как их площади, отнесенные к площади всего подгоночного спектра.

5. Возможность идентификации силицидов железа разного состава по амплитуде подгоночного пика, описывающего потери энергии на возбуждение объемного плазмона.

Личный вклад автора

Формулировка цели и задач настоящего исследования, а также, основных выводов и положений, выносимых на защиту, осуществлялись автором совместно с научным руководителем.

Идея аппроксимации спектров сечения неупругого рассеяния электронов Лоренцево-подобными пиками Тоугаарда предложена и развита автором совместно с научным руководителем. Обработка и анализ экспериментальных данных, разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов на элементарные пики проводились лично автором с последующим обсуждением результатов с научным руководителем.

Основные публикации по теме диссертации написаны автором и согласованы с научным руководителем и соавторами.

Апробация результатов

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня:

1. Конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур (с участием иностранных ученых), посвященная 50-летию образования ИФП СО РАН (Новосибирск, 2014).

2. XVIII Международная научная конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2014).

3. Международная заочная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке» (Москва, 2015).

4. Российская конференция «Фотоника-2015» (Новосибирск, 2015).

5. Российская конференция «Полупроводники 2015» (Москва, 2015).

6. XIX Международная научная конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2015).

7. X Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, 2016).

Публикации

Основные результаты работы изложены в 15 публикациях, включая 4 статьи в журналах, включенных ВАК в «Перечень» ведущих рецензируемых журналов, 4 статьи в рецензируемых международных журналах и 7 докладов научных трудов международных и российских конференций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 121 странице печатного текста, включая 51 рисунок и 22 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, научная и практическая значимость, поставлена цель работы. Оценена достоверность результатов, и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы.

В **первой главе** рассмотрены как традиционные методы электронной спектроскопии – РФЭС, ОЭС, СХПЭЭ, так и разработанный сравнительно недавно метод спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов. Этот метод позволяет исследовать процессы неупругого рассеяния электронов и, в отличие от стандартного метода СХПЭЭ, определять интенсивность потерь энергии в абсолютных единицах и исключать влияние многократных процессов потерь энергии. Именно эти преимущества *K λ* -спектроскопии сделали возможным применение данного метода для решения таких важных задач электронной спектроскопии, как:

1. Количественный элементный анализ многокомпонентных композитных структур.
2. Определение толщин поверхностных слоев.
3. Исследование топологии поверхности.

4. Расчет параметра поверхностных возбуждений.

Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов является информативным методом исследования материалов, а методы анализа $K\lambda$ -спектров, привлекающие широкий набор математических инструментов, в настоящее время активно развиваются.

Помимо физических основ методов электронной спектроскопии в первой главе большое внимание уделено результатам изучения этими методами железокремниевых структур, перспективных для фундаментальных исследований и прикладного применения. В результате синтеза структур Fe-Si возможно образование силицидов железа разного состава, обладающих различными металлическими, полупроводниковыми и магнитными свойствами. Соответственно, точность идентификации состава силицидов играет важную роль при создании железокремниевых структур и устройств на их основе. Как показал обзор имеющейся литературы, стандартные методы электронной спектроскопии дают неоднозначные и часто противоречивые результаты, что говорит о сложности идентификации состава силицидов железа по РФЭС и СХПЭЭ. В силу того, что работы по исследованию силицидов железа спектроскопией сечения неупругого рассеяния электронов отсутствуют, в данной области могут быть получены новые и ценные результаты.

Во **второй главе** приведены методы и условия получения исследуемых в диссертационной работе образцов. Подробно описан фотоэлектронный спектрометр UNI-SPECS, на котором проводились измерения электронных спектров, и принцип работы полусферического энергоанализатора. Приведено описание программы для расчета спектров сечения неупругого рассеяния электронов QUASESTM XS REELS.

Описан авторский подход к анализу тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов, его физическая обоснованность и способ реализации в программном пакете для численного анализа

данных и научной графики Origin 8. Приведена процедура модифицирования трехпараметрической функции Тоугаарда, позволившая задавать положение пика, используя один параметр.

На примере модельного спектра сечения неупругого рассеяния электронов, состоящего из двух неразрешенных по энергии пиков, рассмотрено влияние соотношения между интенсивностями пиков на энергию максимума результирующего спектра. Показано, что энергия максимума результирующего спектра зависит от относительных вкладов пиков потерь и стремится к энергии доминирующего пика.

Проведено исследование влияния интенсивностей пиков, составляющих спектр, на положение особенностей на однократно и двукратно дифференцированных спектрах, по которым обычно определяют энергию пиков потерь. Установлено, что энергия пика в дифференциальных спектрах может быть определена с высокой точностью по точке перегиба кривой $d(\lambda K)/dT$ и по отрицательному максимуму кривой $d^2(\lambda K)/dT^2$ только для интенсивных пиков.

В **третьей главе** излагаются результаты сравнительного анализа спектров характеристических потерь энергии и спектров сечения неупругого рассеяния электронов элементарных Si, Fe, Mn и силицидов FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃:

1. Энергия максимума и форма спектров сечения неупругого рассеяния электронов более чувствительны к перераспределению интенсивностей потерь поверхностной и объемной природы в результате изменения энергии первичных электронов, чем СХПЭЭ. Это проявляется в изменении энергии максимума, ширины и формы $K\lambda$ -спектров. Поскольку интенсивность потерь в спектрах сечения неупругого рассеяния электронов определяется в абсолютных единицах, они лучше подходят для анализа вкладов поверхностной и объемной природы.

2. Состав силицидов железа невозможно достоверно определить по энергии объемного плазмона в спектрах ХПЭЭ и $K\lambda$ -спектрах, поскольку имеет место перекрытие интервалов энергии объемного плазмона.

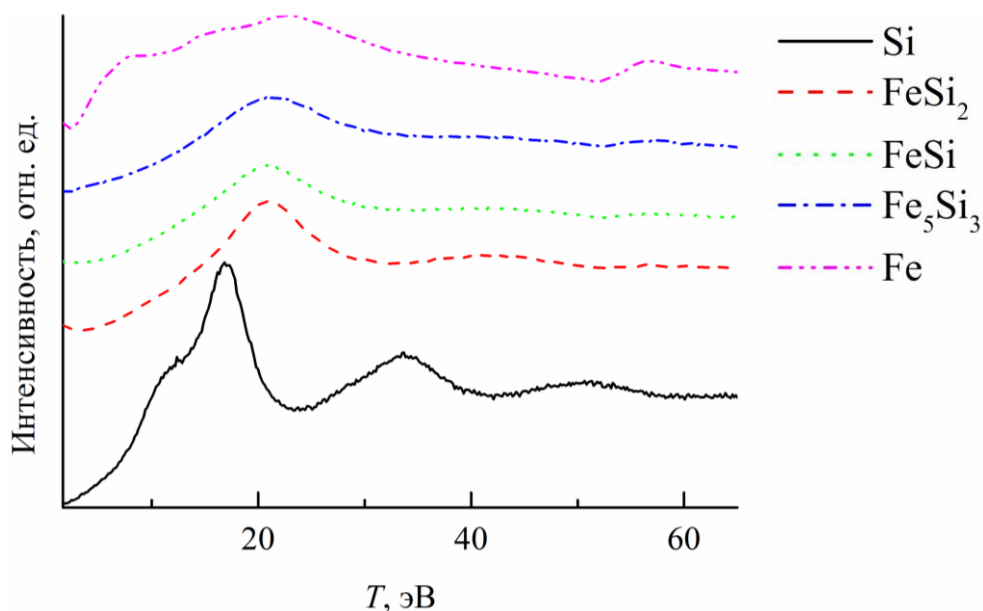


Рисунок 1 – Спектры ХПЭЭ, полученные при энергии первичных электронов 1200 эВ

3. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов более чувствительны к составу силицидов, чем СХПЭЭ. Если спектры ХПЭЭ силицидов разного состава практически идентичны по форме и амплитуде, то амплитуда $K\lambda$ -спектров заметно уменьшается с увеличением содержания Fe, а ширина – возрастает (Рисунки 1, 2).

4. Амплитуда спектров сечения неупругого рассеяния электронов чувствительна к составу силицидов железа и может служить критерием для элементного анализа железокремниевых структур.

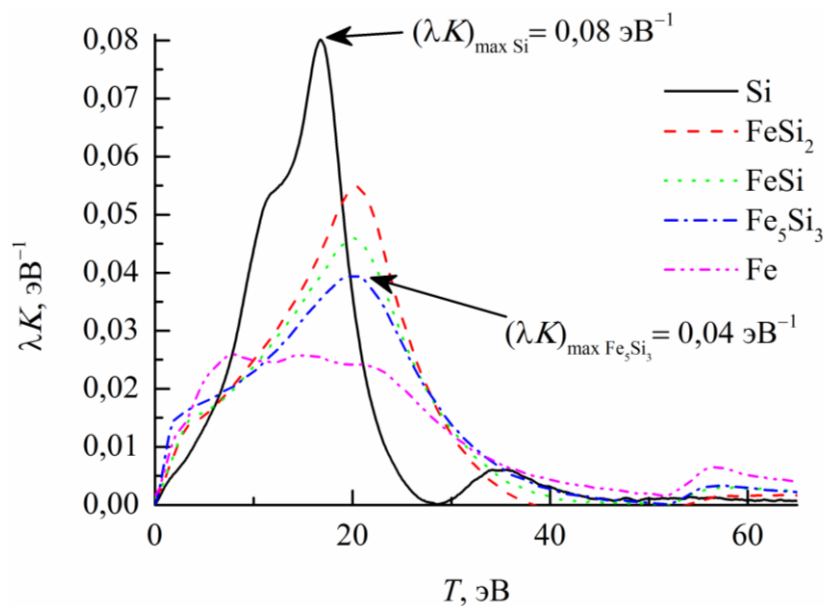


Рисунок 2 – Спектры сечения неупругого рассеяния электронов, полученные при энергии первичных электронов 1200 эВ

В четвертой главе проведен анализ тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов элементарных Si, Fe, Mn. Аппроксимация спектров данных материалов Лоренцево-подобными пиками Тоугаарда позволила получить следующие результаты:

1. Определены энергии и интенсивности неразрешенных пиков. Идентификация пиков проведена путем сопоставления энергий подгоночных пиков с энергиями экспериментальных пиков потерь в СХПЭЭ и $K\lambda$ -спектрах, а также с литературными данными. Анализ тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов позволяет определить энергии пиков потерь более точно по сравнению с исходными $K\lambda$ -спектрами, поскольку исключает влияние поверхностных возбуждений на энергии результирующих максимумов (Рисунок 3).

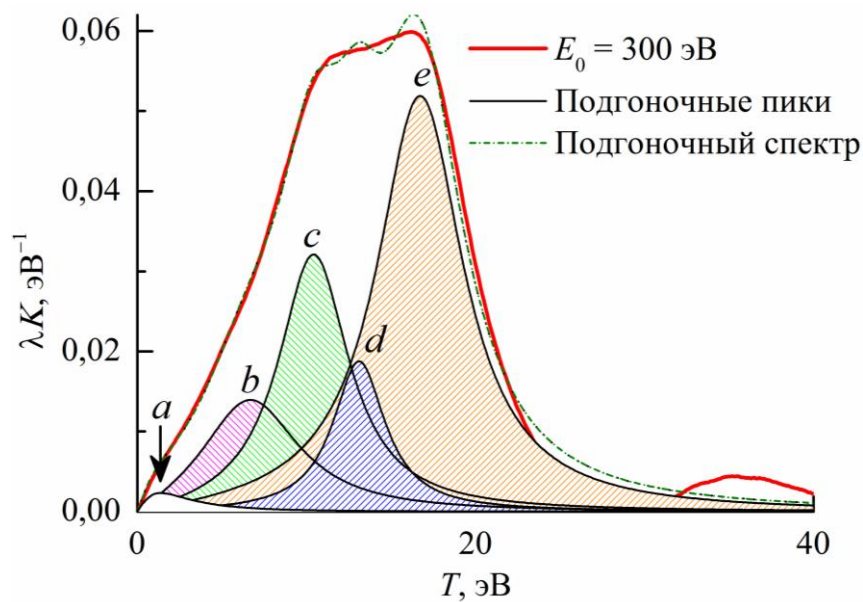


Рисунок 3 – Тонкая структура спектра сечения неупругого рассеяния электронов Si, полученного при энергии первичных электронов 300 эВ

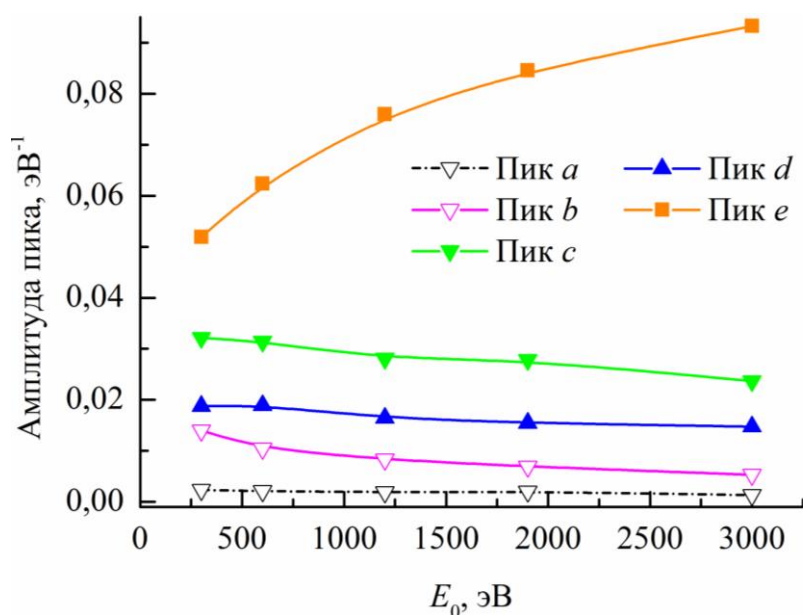


Рисунок 4 – Зависимости амплитуд подгоночных пиков от энергии первичных электронов для Si

2. Установлена возможность определения природы пиков потерь по характеру зависимости амплитуды подгоночных пиков от энергии первичных электронов. Амплитуда поверхностноподобных возбуждения убывает с увеличением энергии первичных электронов, а

объемноподобных – возрастает по закону, близкому к экспоненциальному (Рисунок 4).

3. Разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь может быть использовано для расчета параметра поверхностных возбуждений как площадь отдельного поверхностноподобного пика, отнесенная к площади всего подгоночного спектра. Это отличает данный подход от ранее существовавших. По сравнению с теоретическими методами расчет поверхностного параметра из разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь прост в реализации. Точность определения параметра поверхностных возбуждений по тонкой структуре спектров сечения неупругого рассеяния электронов значительно выше, чем по схожему по принципу методу Гергели, поскольку в данном случае учитывается влияние объемных возбуждений на интенсивность поверхностных, и возможен расчет поверхностного параметра для отдельных возбуждений.

В пятой главе исследована тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов силицидов FeSi_2 , FeSi , Fe_5Si_3 . Разложение спектров данных материалов на элементарные составляющие позволило получить следующие результаты:

1. Определены энергии поверхностных плазмонов и межзонных переходов, неразрешенных на спектрах ХПЭЭ и спектрах сечения неупругого рассеяния электронов (Рисунок 5).

2. По зависимостям амплитуд подгоночных пиков от энергии первичных электронов идентифицированы поверхностноподобные и объемноподобные возбуждения.

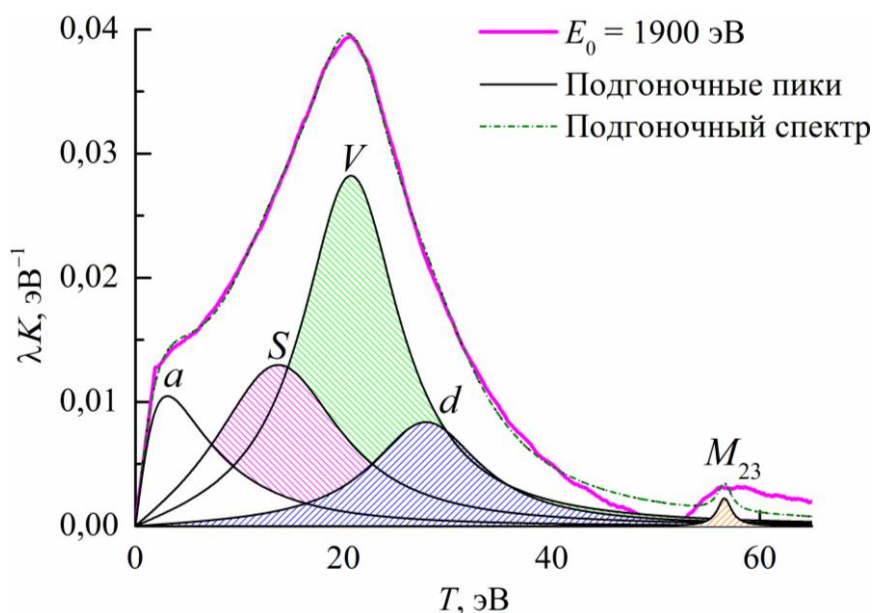


Рисунок 5 – Тонкая структура спектра сечения неупругого рассеяния электронов Fe_5Si_3 , полученного при энергии первичных электронов 1900

3. Показано, что интервалы энергии подгоночных пиков, описывающих потери на возбуждения объемных плазмонов в FeSi_2 , FeSi , Fe_5Si_3 , в отличие от энергий, определяемых экспериментально, не перекрываются, что важно для определения элементного состава силицидов железа (Таблица 1).

Таблица 1 – Энергии объемного плазмона, определенные по экспериментальным и подгоночным $K\lambda$ -спектрам

E_0 , эВ	Экспериментальные $K\lambda$ -	Подгоночные $K\lambda$ -
	Энергия пика, эВ	
FeSi_2	$20,6 \pm 0,2$	21,1
FeSi	$20,0 \pm 0,6$	$20,9 \pm 0,1$
Fe_5Si_3	$20,0 \pm 0,7$	20,7

4. Установлена возможность идентификации силицидов железа разного состава по амплитуде подгоночных пиков, описывающих потери энергии на возбуждение объемного плазмона (Рисунок 6).

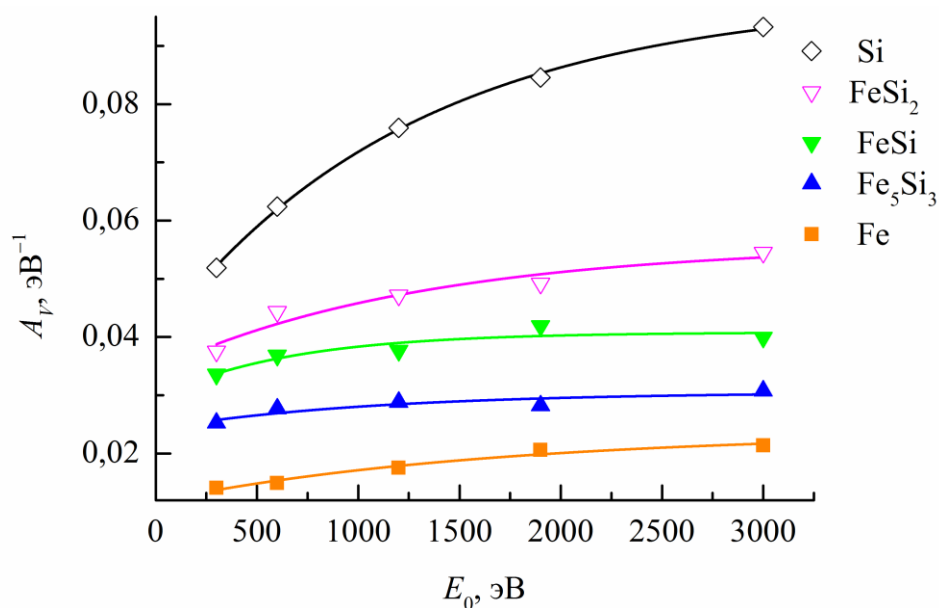


Рисунок 6 – Зависимость амплитуд подгоночных пиков (A_p), описывающих потери энергии на возбуждение объемного плазмона, от энергии первичных электронов

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы:

1. Исследованы спектры характеристических потерь энергии и сечения неупругого рассеяния электронов элементарных Si, Fe, Mn, силицидов FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃. Исследование спектров сечения неупругого рассеяния электронов силицидов FeSi₂, FeSi, Fe₅Si₃ проведено впервые.

Показано, что спектры сечения неупругого рассеяния электронов более чувствительны к изменению энергии первичных электронов, чем спектры потерь энергии отраженных электронов. Это проявляется в изменении формы, ширины и энергии максимумов данных спектров вследствие перераспределения интенсивности между потерями поверхностной и объемной природы. Абсолютные единицы интенсивности потерь энергии делают спектры сечения неупругого рассеяния электронов гораздо более информативными, чем спектры потерь энергии отраженных электронов.

2. Амплитуда спектров сечения неупругого рассеяния электронов значительно чувствительнее к содержанию железа в силицидах разного состава, чем энергия объемного плазмона в спектрах характеристических потерь энергии электронов и химические сдвиги в рентгеновских фотоэлектронных спектрах. При увеличении содержания железа амплитуда спектров существенно уменьшается, что показывает возможность определения элементного состава железокремниевых структур по спектрам сечения неупругого рассеяния электронов.

3. Исследование тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов элементарных Si, Fe, Mn и силицидов FeSi_2 , FeSi , Fe_5Si_3 с авторским подходом к разложению $K\lambda$ -спектров на пики потерь позволило получить следующие результаты:

а. Достоверное определение энергий пиков потерь. Если на энергии экспериментальных пиков потерь в $K\lambda$ -спектрах оказывают влияние поверхностные возбуждения, то разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов позволяет исключить влияние сложения интенсивностей различных вкладов на результирующие положения максимумов на спектрах.

б. Определение энергий неразрешенных пиков потерь. Это особенно актуально для анализа спектров силицидов железа, в которых поверхностный плазмон неразрешен даже на дифференциальных спектрах.

в. Определение природы пиков потерь по зависимости амплитуд подгоночных пиков от энергии первичных электронов. Для объемноподобных возбуждений амплитуда пика возрастает с увеличением энергии первичных электронов, для поверхностноподобных – уменьшается.

г. Возможность расчета параметра поверхностных возбуждений в случае неразрешенного объемного плазмона с детализацией до

поверхностного параметра отдельных возбуждений. При данном подходе поверхностный параметр равен площади поверхностноподобного пика.

д. Использование амплитуды подгоночного пика, описывающего потери энергии на возбуждение объемного плазмона, для идентификации силицидов железа разного состава.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паршин, А. С. Электронная спектроскопия поверхности твердых тел : учебное пособие / А. С. Паршин. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2014. – 224 с.

2. Лифшиц, В. Г. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии / В. Г. Лифшиц, Ю. В. Луняков. – Владивосток : Дальнаука, 2004. – 315 с.

3. Tougaard, S. Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy / S. Tougaard, I. Chorkendorff // *Physical Review B*. – 1987. – Vol. 35. – № 13. – P. 6570-6577.

4. Gergely, G. Elastic backscattering of electrons: determination of physical parameters of electron transport processes by elastic peak electron spectroscopy / G. Gergely // *Progress in Surface Science*. – 2002. – Vol. 71. – № 1. – P. 31-88.

5. Jin, H. Measurement of optical constants of Si and SiO₂ from reflection electron energy loss spectra using factor analysis method / H. Jin, H. Shinotsuka, H. Yoshikawa, H. Iwai, S. Tanuma, S. Tougaard // *Journal of applied physics*. – 2010. – № 107. – P. 083709, 1-11.

6. 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.

Кущенко, О. П. Пчеляков, Ю. Л. Михлин // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – Вып. 3. – С. 344-349.

7. Ohtsu, N. Dependence of core-level XPS spectra on iron silicide phase / N. Ohtsu, M. Oku, K. Satoh, K. Wagatsuma // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 264. – P. 219-224.

8. 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.

9. Паршин, А. С. Новые возможности количественного анализа в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов структур Fe_xSi_{1-x} / А. С. Паршин, С. А. Кущенко, Г. А. Александрова, С. Г. Овчинников // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – Вып. 5. – С. 69-74.

10. 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. – Т. 6. – С. 5-9.

11. 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. **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. – Т. 56. – Вып. 4. – С. 230-235.

2. 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.

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. 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 и 3 статьи из данного списка имеют переводные версии в журналах, включенных в международную базу данных Web of Science, а 4 статья – в базу данных Scopus:

1. Parshin, A. S. On the Fine Structure of Spectra of the Inelastic-Electron-Scattering Cross Section and the Si Surface Parameter / A. S. Parshin, **A. Yu. Igumenov**, Yu. L. Mikhlin, O. P. Pchelyakov, A. I. Nikiforov, V. A. Timofeev // Semiconductors. – 2015. – Vol. 49. – № 4. – P. 423-427.

2. Parshin, A. S. Comparative Analysis of the Characteristic Electron Energy-Loss Spectra and Inelastic Scattering Cross-Section Spectra in Fe / A. S. Parshin, **A. Yu. Igumenov**, Yu. L. Mikhlin, O. P. Pchelyakov, V. S. Zhigalov // Physics of the Solid State. – 2016. – Vol. 58. – № 5. – P. 908-914.

3. Parshin, A. S. Electron Spectroscopy of Iron Disilicide / A. S. Parshin, **A. Yu. Igumenov**, Yu. L. Mikhlin, O. P. Pchelyakov, V. S. Zhigalov // Technical Physic. – 2016. – Vol. 61. – № 9. – P. 1418-1422.

Оригинальная статья в журнале, включенном в международную базу данных Scopus:

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. – P. 012025, 1-7.

Результаты публичного представления исследований опубликованы в 7 печатных работах:

1. **Игуменов, А. Ю.** Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si / **А. Ю. Игуменов**, А. С. Паршин, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, А. И. Никифоров, В. А. Тимофеев // Тез. докл. Научной конференции по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур. Новосибирск. – 2014. – С. 30.

2. **Игуменов, А. Ю.** Новый метод оценки влияния поверхностных возбуждений в спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов / **А. Ю. Игуменов**, А. С. Паршин, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, А. И. Никифоров, В. А. Тимофеев // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск) : в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск. – 2014. –

Том 1. – С. 469-471.

3. **Игуменов, А. Ю.** Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si и Fe / **А. Ю. Игуменов**, А. С. Паршин, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, А. И. Никифоров, В. А. Тимофеев, В. С. Жигалов // Наука и образование в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 января 2015 г.: в 5 частях. Часть I. М.: «АР-Консалт». – 2015. – Ч. I. – С. 23-25.

4. Паршин, А. С. Количественный анализ полупроводниковых материалов методом спектроскопии потерь энергии отраженных электронов / А. С. Паршин, **А. Ю. Игуменов**, С. А. Кущенко // Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников. Москва, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. – 2015. – С. 169.

5. **Игуменов, А. Ю.** Электронная спектроскопия дисилицида железа / **А. Ю. Игуменов**, А. С. Паршин, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, В. С. Жигалов // Тезисы докладов российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых). Новосибирск. – 2015. – С. 97.

6. **Игуменов, А. Ю.** Исследование силицида FeSi методами электронной спектроскопии / **А. Ю. Игуменов**, А. С. Паршин, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, В. С. Жигалов, С. А. Кущенко // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск. – 2015. – Ч. 1. – С. 525-527.

7. **Игуменов, А. Ю.** Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов силицидов железа / **А. Ю. Игуменов**, А. С. Паршин, Ю. Л. Михлин, О. П. Пчеляков, В. С. Жигалов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. Междунар. конф. 4-7

июля 2016 года. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 147-148.

Работа по теме диссертации отмечена следующими **наградами**:

1. Грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К.», 2015 г.
2. Государственная премия Красноярского края в области профессионального образования, 2015 г.

Подписано в печать ____ 2016 г.
Формат 60x84/16. Объем 1,7 п.л. Тираж 150 экз. Заказ № ____.
Отпечатано в отделе копировально-множительной техники СибГАУ.
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31