

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Мягкова Виктора Григорьевича на диссертацию Игуменова Александра Юрьевича «Электронная спектроскопия структур на основе кремния и переходных металлов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Создание современных материалов требует развития новых технологий и методов их исследований. Особенно актуально это для изучения свойств современных наноразмерных материалов. Поиск новых структурных методов исследования и усовершенствование традиционных методов для определения характеристик наноматериалов ведётся в различных направлениях. Одним из таких актуальных направлений является спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ). Удаление из спектров ХПЭЭ вклада от многократного рассеяния электронов приводит к спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов.

Автор диссертации успешно расширил метод для анализа тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов для однозначной идентификации силицидов железа. Плёнки силицидов железа обладают различными физико-химическими свойствами и рассматриваются для практического применения в современной микро- и нанoeлектронике. Поэтому изучение структурных свойств плёнок силицидов железа требует многих новых исследовательских подходов. Это обуславливает актуальность и практическую значимость диссертационной работы Игуменова Александра Юрьевича.

Диссертация изложена на 122 страницах и состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы, включающего 87 наименований.

Во введении обсуждается актуальность, цель и методы исследования, дана структура диссертационной работы, приведены полученные результаты и их апробация, новизна, практическая значимость, личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор по традиционным методам электронной спектроскопии, включая СХПЭЭ, рентгеновскую фотоэлектронную, Оже электронную спектроскопии. Особое внимание уделено, используемой в диссертации для анализа плёнок силицидов железа, спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов (анализ  $K\lambda$ -спектров). Показано преимущество использования  $K\lambda$ -спектроскопии над стандартными методами. В частности показана возможность использования  $K\lambda$ -спектров (на примере  $\text{SiO}_2$ ) для нахождения оптических характеристик. Приведены способы оценок вкладов от поверхностных и объёмных плазмонов. Подробно описана  $K\lambda$ -спектроскопия в двухкомпонентных

$Fe_xSi_{1-x}$ ,  $Mn_xSi_{1-x}$  структурах. В конце главы обосновывается цель диссертации – исследование силицидов железа спектроскопией сечения неупругого рассеяния электронов.

Во второй главе описаны методы получения силицидов  $FeSi_2$ ,  $FeSi$ ,  $Fe_5Si_3$  и их характеристики. Приведены условия записи электронных спектров и методы расчёта спектров неупругого рассеяния электронов с использованием программного пакета QUASES<sup>TM</sup> XS REELS. Подробно разобрана тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов, основанная на использовании трёхпараметрических Лоренцево-подобных функций Тоугаарда. Особое внимание уделено разработанному автором методу анализа тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов, основанному на модификации трёхпараметрической функции Тоугаарда и позволяющий задавать положение пика, используя один параметр.

В третьей главе проведено сравнение спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния для элементных Si, Fe, Mn и силицидов  $FeSi_2$ ,  $FeSi$ ,  $Fe_5Si_3$ . Выявлены преимущества использования спектров сечения неупругого рассеяния для элементного анализа  $Fe_xSi_{1-x}$  силицидов, однако показано, что точный состав силицидов невозможно определить.

Четвёртая и пятая главы посвящены анализу тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов элементных Si, Fe, Mn (четвёртая глава) и силицидов  $FeSi_2$ ,  $FeSi$ ,  $Fe_5Si_3$  (пятая глава). Разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов показывает, что с увеличением энергии первичных электронов возможно разделение вкладов поверхностных от объёмных возбуждений. Вклад поверхностных возбуждений может быть оценён как отношение площадей поверхностноподобного пика к площади всего спектра, который более точен по сравнению с методом Гергели. Для силицидов интервалы энергий объёмных плазмонов в  $FeSi_2$ ,  $FeSi$ ,  $Fe_5Si_3$  не перекрываются, и это важно для экспериментального определения элементного состава силицидов.

Заключительный раздел содержит основные выводы диссертационной работы. Игуменов А.Ю. показал высокий уровень владения современными методами, развитыми в анализе спектров. В частности он использует спектры СХПЭЭ и сечения неупругого рассеяния электронов в дифференциальной форме и для выявления низкоэнергетических возбуждений, которые трудно или невозможно определить из интегральных спектров. Он продемонстрировал возможность разделения пересекающихся вкладов поверхностных и объёмных возбуждений, используя свой подход для анализа тонкой структуры спектров сечения неупругого рассеяния электронов в  $FeSi_2$ ,  $FeSi$ ,  $Fe_5Si_3$ . Это позволило Игуменову А.Ю. создать важную для практических целей новую методику нахождения фазового состава силицидов железа. Несомненно, в дальнейших исследованиях можно расширит данный метод на другие бинарные системы.

Наряду с вышеизложенными оценками следует сделать ряд замечаний:

1. В диссертации исследуются  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  силициды, полученные термическим осаждением из сплавов с атомными соотношениями железа и кремния 1:2, 1:1, 5:3, и отсутствуют структурные данные, подтверждающие однофазность образцов. В результате получения образцы могут быть не однофазные. Это подтверждается для  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  образцов, которые имели пик чистого железа (глава 5, стр.100).

2. На рис.46 показан низкоэнергетический пик (1.6-2.6 эВ) раздваивающийся на поверхностноподобный и объёмноподобный пики (стр 90). Однако, на стр. 91 утверждается, что природа этого пика неизвестна.

Однако, отмеченные недостатки диссертационной работы не умаляют ее несомненных научных достоинств и высокой практической значимости. Представленная диссертация является законченным научным исследованием. Основные результаты, полученные в диссертации, достаточно полно опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на Российских конференциях. Автореферат диссертации отражает основное содержание и выводы работы. По актуальности, новизне, объему выполненных исследований, научной ценности полученных результатов, возможности их использования в практике, количеству публикаций работа Игуменова Александра Юрьевича отвечает всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Мягков Виктор Григорьевич.

Основное место работы, должность: ФГБУН

ИФ СО РАН, старший научный сотрудник  
лаборатории физики магнитных пленок.

Ученая степень, звание: доктор физико-  
математических наук по специальности  
01.04.07 – физика конденсированного  
состояния, старший научный сотрудник.

Почтовый адрес: 660036, Красноярский край,  
гор. Красноярск, Академгородок, 50/38.

Рабочий телефон: +7 (391) 249 46 81.

E-mail: miagkov@iph.krasn.ru.

Мягков В.Г.

Согласен на  
обработку  
персональных  
данных.

Подпись Мягкова Виктора Григорьевича  
заверяю: Учёный секретарь Института  
физики им. Л.В. Киренского,  
ФИЦ КНЦ СО РАН.

Дата: 20 октября 2016 года.



Попков С.И.