

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Пономарева Дмитрия Андреевича «**Модельно-независимый метод определения локального атомного строения с разрешением по глубине в многослойных металлических наногетероструктурах с низкой контрастностью**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**Актуальность темы диссертации.** Многослойные плёночные системы, содержащие слои различных материалов являются объектом интенсивного исследования последних десятилетий. Эффект физической близости двух разнородных материалов может привести как к радикальному изменению свойств каждого из слоёв, так и к возникновению совершенно нового гибридного материала, обладающего уникальными физическими свойствами. В частности, в области магнетизма многослойные структуры могут обладать гигантским магнитосопротивлением или внутренним обменным смещением. Состояние поверхностей слоёв, особенности структуры межслойных областей, зачастую, являются определяющими факторами в формировании свойств многослойных наногетеросистем. Для получения такой информации необходимы методы исследования, позволяющие получать данные о локальном атомном строении межслойных областей, распределении атомов в слоях и интерфейсах. На момент начала обсуждаемой работы существующие методы исследования позволяли получать либо распределение атомов с глубиной в образце и информацию о степени совершенства межслойных интерфейсов, либо информацию о локальной атомной структуре, усредненной по всей глубине образца. Поэтому выбранное Пономаревым Д.А. направление диссертационного исследования, посвященное разработке и апробации метода исследования локальной атомной структуры с разрешением по глубине в многослойных наногетероструктурах, включающий в себя рентгеновскую рефлектометрию и EXAFS-спектроскопию, несомненно, является актуальным.

### Структура и основное содержание работы.

Диссертация написана в соответствии с ГОСТ 7.0.11-2011. Содержание диссертации соответствует формуле Паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 124 страницах, включая 38 рисунков, 5 таблиц, приложение и список литературы из 83 наименований.

Во введении диссертации обоснована актуальность проведенных исследований, определены цель и задачи работы, показана новизна полученных результатов и их научная и практическая значимость, приведены основные защищаемые положения, обозначена структура работы, приведены основные данные о публикациях по теме диссертации.

В первой главе описана методика получения исследованных в работе многослойных структур типа Fe/Cr, рассмотрены основы рентгеновской рефлектометрии и EXAFS-спектроскопии. Приведен обстоятельный обзор литературы, посвященный методам исследования локальной атомной структуры объектов с разрешением по глубине, комбинирующим несколько экспериментальных методик, из которого логично вытекает цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описывается математический алгоритм разработанного метода исследования локального атомного строения многослойных наногетероструктур с разрешением по глубине.

Третья глава посвящена определению возможностей и погрешности разработанного метода. Численный модельный эксперимент, представленный в этой главе, показывает возможности разработанного метода получения информации о локальном атомном строении с разрешением по глубине в слабоконтрастных многослойных наногетероструктурах. Установлены погрешности определения межатомных расстояний и координационных чисел разработанным методом.

В четвертой главе проведена апробация предложенного метода, используя данные экспериментального исследования многослойной наногетероструктуры  $Al_2O_3/Cr(100\text{Å})/[Fe(8\text{Å})/Cr(10.5\text{Å})]_2/Cr(20\text{Å})$ , выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что метод позволяет получить межатомные расстояния для первой и второй координационных сфер на выбранной глубине с точностью ( $\pm 0,01\text{ Å}$ ), а для третьей координационной сферы ( $\pm 0,03\text{ Å}$ ). Информацию о локальном атомном строении образца



по глубине можно получать с шагом 2 Å. Разработанный метод позволяет определять распределение атомов в слоях, интерфейсах и на поверхности синтезированных многослойных наногетероструктур.

В заключении сформулированы научные результаты, полученные в диссертации.

Список литературы содержит достаточно полную библиографию по вопросам, рассмотренным в работе, а автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- на основе комбинации рентгеновской рефлектометрии и EXAFS-спектроскопии с угловой зависимостью разработан метод исследования локального атомного строения многослойных металлических наногетероструктур с разрешением по глубине;
- получена информация о локальном атомном строении многослойной структуры типа *Fe/Cr* с разрешением по глубине;
- разработанный метод позволил определить тип оксида при окислении плёнки Cr, оценить толщину окисленного слоя Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Достоверность результатов и обоснованность выводов обеспечивается использованием хорошо апробированных экспериментальных методик и оборудования, аттестованных образцов, теоретическим обоснованием используемых алгоритмов обработки экспериментальных данных, согласованностью результатов исследования между собой и сопоставлением полученных результатов с известными в литературе данными.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности получать подробную информацию о локальном атомном строении в слоях и интерфейсах многослойных наногетероструктур, создавать новые функциональные материалы, в частности, для устройств микроэлектроники и спинтроники. Результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях занимающихся как разработкой новых тонкопленочных материалов, так и ведущих исследования в области плёночных сенсоров, как например, МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Уральский, Сибирский, Дальневосточный федеральные университеты, Санкт-Петербургский, Новосибирский и Тверской университеты, Воронежский технический университет, МИРЭА, Российский научный центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт

физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург), РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл.), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск) и др.

Замечания по диссертационной работе.

1. Представляется неудачным вынесенное в название диссертации определение метода как «**модельно-независимого**», тем более, что вторая задача диссертационной работы сформулирована в виде: «Определить возможности и погрешности разработанного метода на **модели** слоистой системы Fe/Cr».

2. На стр. 36 диссертации говорится, что «Многослойные наногетероструктуры, являются искусственно синтезированными структурами, обладающими уникальными магнитотранспортными свойствами». Это утверждение является необоснованным сужением широчайшего класса многослойных наногетероструктур, которые совсем не обязательно должны обладать уникальными магнитотранспортными свойствами.

3. Также нельзя согласиться и с ограничением, накладываемым автором при формулировке третьего пункта «*Научной и практической ценности работы*», утверждающего, что «Данные об атомном строении, получаемые с помощью предложенного метода можно будет использовать при построении математических моделей, которые будут помогать в исследованиях магнитных и магнитотранспортных свойств образцов». Нет сомнения, что метод, позволяющий определять локальное атомное строение многослойных металлических наногетероструктур с разрешением по глубине, будет востребован и при исследовании других физических свойств подобных объектов, например, оптических, механических.

4. Преимущества разработанного метода выглядели бы более выигрышно, если бы автор провёл сравнение полученных им результатов с данными, которые можно было бы получить об атомной структуре мультислоёв на основе общепринятых методик обработки спектров рентгеновской рефлектометрии.

5. Работа хорошо написана и оформлена, но встречаются и опечатки, хотя их число и обычно для диссертаций.

Указанные недостатки не снижают ценность работы и не затрагивают основного содержания диссертации.

Заключение. Диссертационная работа Пономарева Дмитрия Андреевича выполнена



на высоком научном уровне, свидетельствующем о профессиональной квалификации соискателя. Автореферат диссертации и опубликованные работы автора полностью отражают научную новизну и содержание работы.

Считаю, что диссертационная работа Пономарева Д.А. «Модельно-независимый метод определения локального атомного строения с разрешением по глубине в многослойных металлических наногетероструктурах с низкой контрастностью» по своей актуальности и научному уровню полностью удовлетворяет п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Пономарев Дмитрий Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент  
старший научный сотрудник отдела  
магнетизма твёрдых тел Института  
естественных наук и математики  
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»,  
доктор физ.-мат. наук,

Свалов Андрей Владимирович  
«12» марта 2018 г.

Почтовый адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Тел.: (343) 3899706  
E-mail: andrey.svalov@urfu.ru

Подпись Свалова А.В. удостоверяю  
Ученый секретарь Ученого совета УрФУ  
кандидат технических наук,  
доцент

Озерец Наталья Николаевна

*С отзивом ознакомлен*  
*26.03.2018г.*



## Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Свалов Андрей Владимирович

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Должность: старший научный сотрудник отдела магнетизма твёрдых тел Института естественных наук и математики

Почтовый адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Тел.: (343) 3899706

E-mail: andrey.svalov@urfu.ru

## Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. A.V. Svalov, P.A. Savin, V.N. Lepalovskij, V.O. Vas'kovskiy, A. Larrañaga, G.V. Kurlyandskaya. Ferromagnetic phase in partially oxidized FeMn films. *J. Magn. Magn. Mater.* V. 451, 2018, P. 546–548.
2. E.E. Shalygina, A.M. Kharlamova, G.V. Kurlyandskaya, A.V. Svalov. Exchange interaction in Co/Bi/Co thin-film systems with Bi interlayer. *J. Magn. Magn. Mater.* V. 440, 2017, P. 136–139.
3. D. Doblas, L.M. Moreno-Ramírez, V. Franco, A. Conde, A.V. Svalov, G.V. Kurlyandskaya. Nanostructuring as a procedure to control the field dependence of the magnetocaloric effect. *Materials and Design* 114 (2017) 214–219.
4. A.V. Svalov, G.V. Kurlyandskaya, V.O. Vas'kovskiy, A. Larrañaga, R. Domingues Della Pace, C.C. Plá Cid. Thickness-dependent Curie temperature in ferrimagnetic Gd-Co/Ti multilayers. *Superlattices Microstruct.* 90 (2016) 242–246.
5. A.V. Svalov, V.O. Vas'kovskiy, K.G. Balymov, J. Alonso, M.L. Fdez-Gubieda, G.V. Kurlyandskaya. Magnetic properties and magnetic entropy change in Gd/Ti multilayers. *IEEE Trans. Magn.*, 2014, Vol. 50, N. 11, p. 2302204.
6. A.V. Svalov, G.V. Kurlyandskaya, V.O. Vas'kovskiy, A.N. Sorokin, D. Diercks.

Magnetoresistance in nanostructured Tb/Ti and Tb/Si multilayers. J. Appl. Phys. 2011, v. 109, p, 023914-6.

Официальный оппонент

Свалов Андрей Владимирович

Ученый секретарь Ученого совета УрФУ

Кандидат технических наук,

доцент

Озерец Наталья Николаевна