

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет»

199034 Санкт-Петербург  
Университетская наб., д 7/9  
Апфонов Сергей Витальевич

26.03.2018г.

## ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Диссертационная работа посвящена разработке нового метода получения информации о локальной атомной структуре межслойных границ, слоев и поверхности мультислойных твердотельных пленок на основе совместного анализа результатов, полученных методами рентгеновской рефлектометрии и EXAFS-спектроскопии.

К настоящему времени в теоретических и экспериментальных работах показано, что многие уникальные свойства сверхрешеток определяются структурой межслойных границ и поверхности. В частности, магнитная структура интерфейса определяется его протяженностью и атомным строением.

Так как протяженность интерфейсной области может изменяться от долей нанометра (нм) до нескольких нанометров, то необходимо использовать

Так как протяженность интерфейсной области может изменяться от долей нанометра (нм) до нескольких нанометров, то необходимо использовать экспериментальные методы диагностики с разрешением по глубине в 1 нм или менее. Метод рентгеновской рефлектометрии, являющийся основным методом определения размерных характеристик нанопленок, позволяет определить распределение атомов определенного сорта с глубиной. Однако, при исследовании магнитных свойств мультислойных систем важно знать ближний порядок и взаимное расположение атомов разного сорта. Рентгеноспектральный структурный анализ (EXAFS), является эффективным методом исследования структурных характеристик, но не дает разрешения по глубине. Поэтому разработка теоретического подхода для определения профиля концентрации атомов в многослойных структурах, в том числе в свехрешетках Fe/Cr, обладающих гигантским магниторезистивным (ГМР) эффектом, представляет большой интерес и является актуальной задачей.

В диссертационной работе представлен и экспериментально апробирован новый подход к исследованию локальной атомной структуры слоев, интерфейсов и поверхности многослойных наногетероструктур, объединяющий рентгеновскую рефлектометрию и EXAFS-спектроскопию с угловым разрешением.

Диссертация состоит из четырех глав.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней описываются свойства системы Fe-Cr, вводятся основные термины описания атомной структуры, дан краткий обзор рентгеновских методов исследования – рефлектометрии и EXAFS-спектроскопии, описана технология приготовления мультислойных образцов.

Во второй главе приведены основные математические алгоритмы, предложенные диссертантом. Они включают новые методы получения структурной информации по комбинированным данным рентгеновской рефлектометрии и EXAFS-спектроскопии с угловым разрешением.

Достоверность алгоритмов, по которым диссертантом были разработаны пакеты прикладных программ, проверяется в третьей главе. Проведены модельные численные эксперименты для мультислойного образца Fe/Cr.

Экспериментальные результаты, полученные диссертантом в Курчатовском центре синхротронного излучения и приведенные в четвертой главе диссертации, позволили получить атомную структуру ближнего порядка вокруг атомов Fe и Cr, расположенных на разных глубинах, в многослойном образце  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}(100\text{\AA})/[\text{Fe}(8\text{\AA})/\text{Cr}(10,5\text{\AA})]_2/\text{Cr}(20\text{\AA})$ , обладающим гигантским магниторезистивным эффектом. Определены реальные размеры интерфейсных областей, толщины слоев железа и хрома. Достигнуто разрешение по глубине 2-3 Å. Было показано, что на поверхности образца присутствует окисел  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Выбор темы, оригинальность подхода к обработке экспериментальных данных, теоретический и математический анализ, проведенный на высоком уровне, определяют новизну данного исследования. Достоверность результатов обеспечивается использованием проверенных экспериментальных методик, современных приемов решения обратных задач.

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, докладывались на научных конференциях.

Материал диссертации изложен ясно и четко. В целом, диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, содержащую решение новой актуальной задачи определения атомной структуры с разрешением по глубине в мультислойных наногетероструктурах.

Вместе с тем по тексту диссертации и автореферата можно сделать следующие замечания:

1. В работе не приведены абсолютные значения измеренных коэффициентов отражения, что не позволяет определить чувствительность разработанного метода относительно протяженности и структуры интерфейса.
2. Данные усреднены по плоскости слоев и было бы целесообразно

более подробно рассмотреть вопрос о связи этих данных с наблюдаемыми характеристиками рассматриваемых гетероструктур, например гигантским магнитосопротивлением сверхрешеток Fe/Cr.

3. Для оценки устойчивости метода представляло бы интерес привлечение других моделей и альтернативных экспериментальных методов.

Результаты диссертации Д.А.Пономарева обсуждались на конференциях, школах и симпозиумах как у нас в стране, так и за рубежом. Основные результаты подробно изложены в 6 статьях, 5 из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и зарубежные системы цитирования.

Диссертация и автореферат написаны хорошим языком, оформлены согласно действующему ГОСТу. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Выводы следуют из теоретических и экспериментальных результатов, представленных в соответствующих главах, что обеспечивает их обоснованность. Предложенный в работе подход к анализу атомного строения с разрешением по глубине является новым и представляет большой интерес для спинтроники.

Тема диссертации соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Д.А. Пономарева является научно-квалификационной работой, которая удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемых к диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01. 04. 07 – физика конденсированного состояния, а ее автор Пономарев Дмитрий Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., профессором кафедры электроники твердого тела СПбГУ Филатовой Е.О. и д.ф.-м.н., профессором кафедры статистической физики СПбГУ Уздиным В.М.

Содержание диссертации и отзыва обсуждено на совместном научном семинаре кафедры электроники твердого тела и кафедры статистической физики, протокол № 2 от 23.03.2018г.

д.ф.-м.н., профессор

Филатова Е.О.

д.ф.-м.н., профессор

Уздин В.М.

зав. кафедрой статистической  
физики, член-корр. РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

Щекин А.К.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
199034, г. Санкт-Петербург,  
Университетская набережная, д. 7/9 Веб-сайт: <http://spbu.ru>  
Тел.: (812) 328-20-00

*С отзывом ознакомлен 30.03.2018г.*

к письму от 30.01.2018 № \_\_\_\_\_**Сведения о ведущей организации**

по кандидатской диссертации Д.А.Пономарева «Модельно-независимый метод определения локального атомного строения с разрешением по глубине в многослойных металлических наногетероструктурах с низкой контрастностью», по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский университет или СПбГУ
Ведомственная принадлежность	Правительство Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д.7/9
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	www.spbu.ru
Телефон	+7 (812) 328-97-01
Адрес электронной почты	spbu@spbu.ru
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет	<p>1. V.P. Romanov, S.V. Ulyanov, V.M. Uzdin, G. Nowak, M. Vadala and H. Zabel, "Information on in- and out-of-plane correlated roughness in multilayers from x-ray specular reflectivity" J. Phys. D: Appl. Phys. <b>41</b> 115401 (7pp) (2008).</p> <p>2. Т.Ю. Петров, В.П.Романов, В.М. Уздин, С.В. Ульянов «Диффузный вклад в зеркальных спектрах и зеркальный в диффузных при рассеянии рентгеновского излучения на шероховатых интерфейсах» // ФТТ, Т. <b>51</b>, №9, 1812-1917 (2009).</p> <p>3. V. P. Romanov, S. V. Ulyanov, V. M. Uzdin, G. Nowak, K. Shokuie, and H. Zabel, "Separation of the diffuse contribution to the specular x-ray scattering of multilayer films" Phys. Rev. <b>B82</b>, 165416/1-165416/11 (2010).</p> <p>4. N.K. Pleshanov, V.L. Aksenov, A.P. Bulkin, A.A. Fraerman, V.A. Matveev, Yu.V. Nikitenko, V.G. Syromyatnikov, S.N. Vdovichev, V.M. Uzdin, "Study of magnetization of a bilayer</p>

- nanoststructure CoCu/Co (GF/F) by polarized neutron reflectometry”, *Journal of Physics: Conference Series* **340**, 012085/1-12 (2012).
5. С.В.Ульянов, В.П.Романов, В.М. Уздин, «Рассеяние рентгеновского излучения на слоистых наносистемах с шероховатыми интерфейсами», *Наносистемы: физика, химия, математика*, 3 (3), 110-122 (2012).
6. V. M. Uzdin, A. Vega, A. Khrenov, W. Keune, V. E. Kuncser, J. S. Jiang, and S. D. Bader, “Noncollinear Fe spin structure in (Sm-Co)/Fe exchange-spring bilayers: Layer-resolved  $^{57}\text{Fe}$  Mossbauer spectroscopy and electronic structure calculations”, *Phys. Rev.* **B85**, 024409/1-024409/15 (2012).
7. Б.В. Сеньковский, В.М. Уздин, «Эволюция электронной плотности d-состояний Ni в сплавах Ti-Ni при изменении концентрации компонент»// *ФТТ*, Т. **55**, №7, 1268-1271 (2013).
8. P.F. Bessarab, V. M. Uzdin, and H. Jónsson, Effect of hydrogen adsorption on the magnetic properties of a surface nanocluster of iron, *Phys. Rev.* **B88**, 214407/1-214407/8 (2013).
9. D. Mishra, H. Zabel, S.V. Ulyanov, V.P. Romanov, V.M. Uzdin, Template assisted self-assembly of iron oxide nanoparticles: An x-ray structural analysis, *J. Appl. Phys.*, **115**, 054104 (2014)
- 10 M.A. Moskalenko, V.M. Uzdin, H. Zabel, Manipulation by exchange coupling in layered magnetic structures *J. Appl. Phys.*, **115**, 053913 (2014)
11. М.Г. Дудник, В.М. Уздин, Управление магнитным состоянием 3d-димера на металлической подложке, *Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, N 6, С. 15-20 (2015)
12. Т.А.Тaaev, К.Sh.Khizriev, А.К.Murtazaev, V.M.Uzdin, Investigation of critical phenomena of the hard/soft magnetic bilayer model by the Monte-Carlo method, *J. Alloys and Compounds*, **678**, 167-170 (2016)
13. A.V. Ivanov, P.F. Bessarab, V.M. Uzdin, and

	H. Jonsson Magnetic exchange force microscopy: Theoretical analysis of induced magnetization reversals, Nanoscale , 2017, 9 , 13320-13325
--	---

Верно

Директор Центра экспертиз

В.А. Семенов

Подпись

М.П.



Приложение №2

к письму от 30.01.2018 № С. 1.1.С

**Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации**

Фамилия, имя, отчество	Аплонов Сергей Витальевич
Ученая степень и отрасль науки, научные специальности, по которым им защищена диссертация	Доктор геолого-минералогических наук 01.04.12 – геофизика Геолого-минералогические науки
Наименование организации, являющееся основным местом работы, должность	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Правительства Российской Федерации. Проректор по научной работе. Профессор кафедры геофизики.

Верно

Директор Центра экспертиз

В.А. Семенов