

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кравцова Евгения Алексеевича «Комплементарное применение рассеяния нейтронного и синхротронного излучений для исследования магнитных металлических наноструктур», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Магнитные металлические наноструктуры - искусственные магнитные материалы, которые обладают новыми уникальными свойствами и открывают новые возможности по сравнению с традиционными объемными материалами. Исследование металлических наноструктур представляет большой интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и с точки зрения прикладного использования материалов на их основе. Характерной особенностью таких систем является проявление размерных эффектов, эффектов близости соседних слоев, интерфейсных эффектов, которые приводят к неоднородному изменению распределения магнитных моментов внутри отдельных слоев. Понимание природы возникновения таких эффектов в наноструктурах, механизмов их формирования и особенностей проявления критически важно для достижения прогресса в развитии нанотехнологий, в создании новых материалов и устройств микро- и нанoeлектроники, что, в свою очередь, требует развития и использования неразрушающих экспериментальных методик определения атомной и магнитной структуры отдельных слоев, образующих наноструктуры. Диссертация Кравцова Е.А., посвященная развитию и применению комплементарных методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения для исследования магнитных наноструктур несомненно является актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Во введении дан краткий обзор проблематики, связанной с исследованиями магнитных металлических наноструктур, обосновывается актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации исследуется структура межслойных границ в сверхрешетках Fe/Cr и ее влияние на формирование неколлинеарного магнитного упорядочения соседних слоев Fe. С помощью рентгеновской рефлектометрии были определены структурные свойства межслойных границ в сверхрешетках Fe/Cr, выращенных при различных температурах подложки.

Впервые было экспериментально показано, что в сверхрешетках Fe/Cr формируется латеральная доменная структура, рассеяние поляризованных нейтронов на которой приводит к незеркальному рассеянию нейтронов с переворотом спина. Для определения угла между магнитными моментами соседних слоев Fe диссертантом предложен оригинальный метод, основанный на анализе незеркального рассеяния поляризованных нейтронов. Предложенный метод был успешно применен к определению и установлена прямая корреляция между степенью несовершенства межслойных границ и типом магнитного упорядочения в сверхрешетках Fe/Cr.

**Во второй главе** диссертации развит метод определения элементарно-чувствительных векторных профилей намагниченности внутри отдельных слоев магнитных сверхрешеток, основанный на комплементарном применении рефлектометрии поляризованных нейтронов и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии. С использованием разработанного метода диссертанту удалось определить распределение магнитных моментов внутри отдельных слоев сверхрешеток Fe/Gd с беспрецедентным разрешением, близким к атомному. Важным результатом является определение зависимости вектора намагниченности с глубиной внутри слоев Gd, для которого характерно изменение модуля при высоких температурах и вращение при низких температурах.

**В третьей главе** диссертации методами нейтронной и рентгеновской дифрактометрии систематически исследованы волны спиновой плотности в тонких пленках Cr и сверхрешетках Cr/V: влияние эффектов близости, эпитаксиальных напряжений, размерных эффектов на поляризацию, период и направление распространения волн спиновой плотности. Установлено, что эпитаксиальные напряжения определяют, главным образом, направление распространения волны спиновой плотности в многослойных пленках Cr/V, а близость слоев ванадия может влиять как на поляризацию волны спиновой плотности так и на направление ее распространения в V/Cr/V. По мере увеличения толщины слоев Cr магнитное состояние в сверхрешетках Cr/V изменяется от парамагнитного состояния к соизмеримой фазе волны спиновой плотности и, наконец, к несоизмеримой волне спиновой плотности в достаточно толстых слоях Cr. Экспериментально продемонстрировано, что магнитным состоянием в сравнительно толстых слоях хрома можно контролируемым образом изменять путем насыщения водородом соседних с ними слоев ванадия.

**В четвертой главе** развита техника DAFS спектроскопии, позволяющая определять локальную атомную структуру неэквивалентных кристаллографических позиций в тонкопленочных системах. Разработанная техника успешно применена для определения локальной структуры атомов Mn в тонких пленках  $\text{Fe}_2\text{MnO}_4$ , что невозможно достичь

традиционным методом EXAFS спектроскопии. Было показано, что наблюдается значительное уменьшение координационных чисел Mn на позициях с октаэдрическим окружением.

**В заключении** диссертации сформулированы выводы по работе.

Успешное применение комплементарных методов нейтронного и синхротронного рассеяния к исследованию магнитных металлических наноструктур позволило диссертанту получить **новые оригинальные результаты**.

1. Было показано, что существует прямая корреляция между свойствами межслойных границ и магнитным упорядочением в сверхрешетках Fe/Cr: неколлинеарное упорядочение, наблюдаемое в этих сверхрешетках, обусловлено несовершенством межслойных границ.
2. Экспериментально установлено, что в сверхрешетках Fe/Cr формируется латеральная доменная структура, которая приводит к незеркальному рассеянию нейтронов с переворотом спина.
3. Разработана методика и экспериментально определены элементарно-чувствительные векторные профили намагниченности в магнитных сверхрешетках Fe/Gd с помощью комплементарного применения рефлектометрии поляризованных нейтронов и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии.
4. Впервые показано, что эффекты близости слоев ванадия приводят к изменению поляризации и направления распространения волн спиновой плотности в наноструктурах Cr/V. Установлено, что в слоях Cr в сверхрешетках Cr/V вблизи межслойных границ формируются парамагнитные области толщиной до 5 нм. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность управляемого обратимого изменения магнитного состояния сверхрешеток Cr/V путем насыщения их водородом.
5. Впервые экспериментально обнаружено значительное уменьшение координационного числа первой координационной сферы для атомов Mn, расположенных в узлах типа B в пленках искусственных марганцевых ферритов.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием аттестованных образцов и апробированных методик исследования, проведением различных экспериментов на одних и тех же образцах при одних и тех же экспериментальных условиях, согласием и непротиворечивостью полученных результатов и результатов, полученных другими авторами и опубликованных в литературе. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат отражает основные положения диссертационной работы. Материалы диссертации опубликованы в 22 статьях в реферируемых журналах из списка ВАК, докладывалась на

многочисленных российских и зарубежных конференциях.

Разработанные в диссертационной работе методы исследования магнитных наноструктур, основанные на комплементарном применении нейтронного и синхротронного рассеяния, будут полезны при развитии новых методик нейтронно-синхротронных исследований. Полученные результаты будут полезны при создании новых материалов спинтроники.

#### **Замечания по диссертационной работе**

Диссертация написана ясно, с большим количеством графического экспериментального материала. Тем не менее, можно указать следующие недостатки работы. Во-первых, следовало бы более подробно изложить методические аспекты проведения экспериментов. Во-вторых, диссертант допускает непоследовательность в использовании обозначений: толщин слоев следовало бы характеризовать либо в ангстремах, либо в нанометрах. В третьих, хотя работа и написана хорошим русским языком, однако в тексте диссертации встречается большое количество опечаток. Особенно этим страдают введения и заключения к главам. Кроме того, глаз читателя сильно коробит слово «брегтовский» через букву «е» вместо принятого в русском языке написания «брэгговский». Указанные недостатки не снижают в целом положительной оценки представленной диссертационной работы.

#### **Заключение (выводы о работе)**

Диссертационная работа Кравцова Е.А. «Комплементарное применение рассеяния нейтронного и синхротронного излучений для исследования магнитных металлических наноструктур» является завершенной научно-квалификационной работой на актуальную тему, содержит новые научные результаты в области исследования структурных и магнитных свойств металлических наноструктур с использованием комплементарных нейтронно-синхротронных методик. Работа выполнена на высоком научном уровне, является самостоятельным исследованием, имеет большое практическое значение для развития нейтронно-синхротронных методов исследования магнитных наноструктур. Полученные результаты являются обоснованными и достоверными, имеют существенное значение для науки и техники.

Диссертационная работа Кравцова Е.А. по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Кравцов Евгений Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени

доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук,

зам. директора по международной деятельности,

старший научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения

«Петербургский институт ядерной физики

им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»

С.В. Григорьев

« 5 » декабря 2017 г.

Почтовый адрес:

188300, Ленинградская обл.,

г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1

Тел.: +7(81371)46561

E-mail: [grigor@lns.pnpi.spb.ru](mailto:grigor@lns.pnpi.spb.ru)

Почтовый адрес: 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1

Телефон: (81371) 30278

E-mail: [grigor@lns.pnpi.spb.ru](mailto:grigor@lns.pnpi.spb.ru)

Ученый секретарь

ФГБУ «Петербургский институт

ядерной физики им. Б.П. Константинова»

НИЦ «Курчатовский институт»

кандидат физ.-мат. наук

И. Воробьев

*С. отзвонили  
- Е. А. Кравцов  
08.12.2017*

### Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Григорьев Сергей Валентинович

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

Полное наименование организации: федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Должность: заместитель директора по международной деятельности НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Почтовый адрес: 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1

Телефон: (81371) 30278

E-mail: grigor@lns.pnpi.spb.ru

#### Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. V. Tarnavich, E. Tartakovskaya, Yu. Chetverikov, V. Golub, D. Lott, Yu. Chernenkov, A. Devishvili, V. Ukleev, V. Kapaklis, A. Oleshkevych, V. Fedorov, V. Bairamukov, A. Vorobiev, S. Grigoriev Magnetic field induced chirality in Ho/Y multilayers with gradually decreasing anisotropy. Physical Review B vol. 96 N. 1 (2017)
2. Чубова И.М., Москвин Е.В., Дядькин В.А., Dewhurst Ch., Малеев С.В., Григорьев С.В. Роль критических флуктуаций в формировании скирмионной решетки в MnSi ЖЭТФ vol. 152 N. 5 pp. 933-943 (2017)
3. С.В. Демишев, В.В. Глушков, С.В. Григорьев, М.И. Гильманов, И.И. Лобанова, А.Н. Самарин, А.В. Семенов, Н.Е. Случанко Квантовые фазовые переходы в спиральных магнетиках без центра инверсии Успехи физических наук vol. 186 N. 6 pp. 628 - 632 (2016)
4. S. V. Grigoriev, A. S. Sukhanov, E. V. Altynbaev, S.-A. Siegfried, A. Heinemann,

- P. Kizhe, and S. V. Maleyev Spin waves in full-polarized state of Dzyaloshinskii-Moriya helimagnets: Small-angle neutron scattering study. Phys. Rev. B vol. 92 pp. 220415(R) (2015)
5. V. V. Tarnavich, D. Lott, S. Mattauch, A. Oleshkevych, V. Kapaklis, and S. V. Grigoriev Field-induced chirality in the helix structure of Ho/Y multilayers. Physical Review B vol. 89 pp. 054406 (2014)

Ученый секретарь

ФГБУ «Петербургский институт  
ядерной физики им. Б.П. Константинова»

НИЦ «Курчатовский институт»

кандидат физ.-мат. наук

С.И. Воробьев