

УТВЕРЖДАЮ

Директор Объединённого института ядерных исследований,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, академик РАН

В.А. Матвеев

« 01 » \_\_\_\_\_ 2017 г.

[

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Международной межправительственной организации Объединённый институт ядерных исследований 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 объёмными материалами. Исследование металлических наноструктур представляет большой интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и с точки зрения прикладного использования материалов на их основе. Для понимания природы эффектов, присущих металлическим магнитным наноструктурам, и эффективного их прикладного использования необходимо развитие и применение новых неразрушающих методов исследования атомной и магнитной микроструктуры отдельных слоев, образующих такие наноструктуры. Диссертация Кравцова Е.А., посвященная экспериментальному исследованию широкого класса металлических наноструктур, выполненному с использованием комплементарных методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения, несомненно, является актуальной. Заявленной целью диссертации является исследование атомной и магнитной микроструктуры магнитных металлических наноструктур, основанное на комплементарном (взаимодополняющем) использовании рассеяния нейтронов и синхротронного излучения.

## Структура и основное содержание работы

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.

Первая глава диссертации посвящена исследованию атомной и магнитной структуры сверхрешеток Fe/Cr с использованием рентгеновской рефлектометрии, рефлектометрии поляризованных нейтронов и незеркального рассеяния поляризованных нейтронов. Основное внимание в данной главе уделено роли межслойных границ в формировании магнитного упорядочения в сверхрешетках Fe/Cr. Методами рентгеновской рефлектометрии было исследовано влияние условий роста (температуры подложки) на структурные свойства межслойных границ в сверхрешетках Fe/Cr. 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. Автором предложен оригинальный метод определения угла неколлинеарности в магнитных сверхрешетках, основанный на анализе незеркального рассеяния поляризованных нейтронов. Предложенный метод был успешно применен к определению угла между магнитными моментами соседних слоев Fe и установлена прямая корреляция между степенью несовершенства межслойных границ Fe-Cr и типом магнитного упорядочения в сверхрешетках Fe/Cr.

Вторая глава диссертации посвящена развитию метода определения элементарно-чувствительных векторных профилей намагниченности внутри отдельных слоев магнитных сверхрешеток, основанного на комплементарном применении рефлектометрии поляризованных нейтронов и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии. Разработанный метод был успешно применен диссертантом к определению неоднородных магнитных состояний внутри слоев гадолиния в сверхрешетках Fe/Gd с беспрецедентным разрешением, близким к атомному. Важным результатом мы считаем определение зависимости вектора намагниченности с глубиной, которое характеризуется сильным вращением магнитных моментов внутри слоев Gd при низких температурах в сильных магнитных полях.

Третья глава диссертации посвящена систематическому исследованию эффектов близости, эпитаксиальных напряжений и размерных эффектов на волн спиновой плотности в многослойных наноструктурах на основе Cr. Методами нейтронной и рентгеновской дифрактометрии показано, что эпитаксиальные напряжения, вызываемые подложкой,

ответственны за направление распространения волны спиновой плотности в многослойных пленках Cr/V, близость слоев ванадия определяет поляризацию волны спиновой плотности в тонкопленочных системах Cr/V, а также направление ее распространения в V/Cr/V. По мере увеличения толщин 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. Важным результатом является прямое экспериментальное доказательство возможности управления магнитным состоянием в сравнительно толстых слоях хрома путем насыщения водородом соседних с ними слоев ванадия.

В четвертой главе развита техника DAFS спектроскопии, предназначенная для определения локальной атомной структуры для неэквивалентных кристаллографических позиций в сложных тонкопленочных наноструктурах. Разработанная техника применена для определения локальной структуры атомов Mn в тонких пленках  $\text{Fe}_2\text{MnO}_4$ , причем диссертанту удалось установить значительное уменьшение их координационных чисел на позициях с октаэдрическим окружением.

В заключении сформулированы выводы по работе.

**Научная новизна результатов диссертационной работы** связана с тем, что диссертант успешно применил комплементарные нейтронно-синхротронные методы исследования для определения атомной и магнитной микроструктуры широкого класса металлических наноструктур. В работе были получены следующие основные научные результаты.

1. Установлена корреляция между степенью несовершенства межслойных границ Fe-Cr и углом между магнитными моментами соседних слоев Fe в сверхрешетках Fe/Cr с неколлинеарным магнитным упорядочением. Экспериментально показано, что в сверхрешетках Fe/Cr формируется латеральная доменная структура, рассеяние поляризованных нейтронов на которой приводит к незеркальному рассеянию нейтронов с переворотом спина.
2. Впервые экспериментально определены элементно-чувствительные векторные профили намагниченности в магнитных сверхрешетках Fe/Gd с помощью комплементарного применения рефлектометрии поляризованных нейтронов и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии.
3. 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.

4. Впервые экспериментально обнаружено значительное уменьшение координационного числа первой координационной сферы для атомов Mn, расположенных в узлах типа В в пленках искусственных марганцевых ферритов.

#### **Достоверность результатов и обоснованность выводов**

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Она 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. Материалы диссертации опубликованы в 22 статьях в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, докладывалась на многочисленных российских и зарубежных конференциях. Автореферат отражает основные положения диссертационной работы.

#### **Практическая значимость полученных результатов**

Разработанные в диссертационной работе методы исследования магнитных наноструктур, основанные на комплементарном применении нейтронного и синхротронного рассеяния, будут востребованы в ведущих нейтронных и синхротронных центрах для проведения исследований, усовершенствования и создания экспериментальных установок.

Результаты исследований по управлению магнитным состоянием сверхрешеток Fe/V путем насыщения их водородом могут быть использованы для конструирования датчиков водорода.

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

Диссертация написана ясно, с большим количеством графического экспериментального материала. Тем не менее, можно указать следующие недостатки работы. Во-первых, в диссертации изложены, главным образом, экспериментальные результаты, которые следовало бы детально сравнить с известными результатами теоретических расчетов. Во-вторых, отметим некоторую непоследовательность в использовании обозначений: в обозначении толщин слоев используются ангстремы и нанометры. В-третьих, вызывает некоторые сомнения использованный диссертантом термин – «комплементарное применение». Можно было бы рекомендовать термин «взаимодополняющее применение». 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 неразрушающих ядерно-физических методов диагностики 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.

Отзыв составлен на основании знакомства с текстом диссертации, автореферата и доклада Кравцова Е.А. на семинаре Научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований 13 октября 2017 г..

Отзыв составил

Начальник сектора нейтронной оптики

НЭО НИКС ЛНФ ОИЯИ

доктор физ.-мат. наук

М.В. Авдеев

Ученый секретарь ЛНФ ОИЯИ

*С отзывом  
ознакомлен*

*08.12.2017*

*Е.А. Кравцов*

*is*  
Д.Худоба

**Сведения о ведущей организации**  
диссертации Кравцова Евгения Алексеевича «Комплементарное применение  
нейтронного и синхротронного излучений для исследования магнитных  
металлических наноструктур»

Полное наименование: Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований

Краткое наименование: ОИЯИ

Место нахождения: 141980. Московская область, г. Дубна, ул. Жолио Кюри, д. 6

Почтовый адрес: 141980. Московская область, г. Дубна, ул. Жолио Кюри, д. 6

Тел.: Секретариат +7 (49621) 6-50-59

E-mail: [post@jinr.ru](mailto:post@jinr.ru)

<http://www.jinr.ru>

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

1. Релаксация магнитного состояния ферромагнитно-сверхпроводящей слоистой структуры Жакетов В.Д., Никитенко Ю.В., Петренко А.В., Чик А., Аксенов В.Л. ЖЭТФ, 2017 г., Том 152, Вып. 3, стр. 565.
2. Магнетизм в структурах с ферромагнитными и сверхпроводящими слоями Жакетов В.Д., Никитенко Ю.В., Радю Ф., Петренко А.В., Csik A., Борисов М.М., Мухамеджанов Э.Х., Аксенов В.Л. ЖЭТФ, 2017, Том 151, Вып. 1, стр. 132.
3. System of neutron microbeams from a planar waveguide S. V. Kozhevnikov, V. K. Ignatovich, Yu. V. Nikitenko, F. Ott, A. V. Petrenko Письма в ЖЭТФ, 2015, том 102, Вып. 1, стр. 3.
4. Особенности движения частиц со спином 1/2 в некомпланарном магнитном поле Д. А. Татарский, А. В. Петренко, С. Н. Вдовичев, О. Г. Удалов, Ю. В. Никитенко, А. А. Фраерман УФН, 2016, Том 186, Вып. 6, стр. 654.
5. On the feasibility to study inverse proximity effect in a single S/F bilayer by polarized neutron reflectometry Yu. N. Khaydukov, B. Nagy, J.-H. Kim, T. Keller, A. Ruhm, Yu. V. Nikitenko, K. N. Zhernenkov, J. Stahn, L. F. Kiss, A. Csik, L. Bottyan, V. L. Aksenov Письма в ЖЭТФ, 2013, Том 98, Вып. 2, стр. 116.
6. Магнитно-структурные фазовые переходы в NiO и MnO: нейтронные дифракционные данные А. М. Балагуров, И. А. Бобриков, С. В. Сумников, В. Ю. Юшанхай, Н. А. Миронова-Улмане Письма в ЖЭТФ, 2016, Том. 104, Вып. 2, стр. 84.
7. Дифракция нейтронов на импульсных источниках В. Л. Аксёнов, А. М. Балагуров УФН, 2016, 186, Вып. 3, стр. 293.

Директор ОИЯИ

В.А. Матвеев

«    »                    2017 г.