



УТВЕРЖДАЮ  
Института физических проблем  
А. Л. Капицы РАН  
7 В.В. Дмитриев  
« 21 » ноября 2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Антропова Николая Олеговича «**Кристаллическая структура и магнитное упорядочение в сверхрешетках Dy/Gd**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Исследование металлических сверхрешеток, которое активно ведется последние 30 лет, представляет большой интерес в физике магнитных явлений. Слоистые структуры на основе редкоземельных металлов привлекают интерес как искусственные модельные объекты, в которых можно целенаправленно реализовать нетривиальные типы магнитного упорядочения, недостижимые в классических магнитных кристаллах. Примером структур такого рода являются сверхрешетки Dy/Gd. Ещё в 90-х годах XX века теоретически была показана возможность существования в таких структурах различных магнитных фаз в зависимости от толщины слоев, магнитного поля и температуры. Помимо коллинеарных АФМ и ФМ фаз, были предсказаны области устойчивости неколлинеарных типов магнитного упорядочения, включая различные периодические структуры, соизмеримые либо несоизмеримые с периодом сверхрешетки. Однако до сих пор имелось очень мало экспериментальных работ, посвященных магнитным свойствам системы Dy/Gd. Условия экспериментальной реализации предсказанных фаз систематически не изучались. В целом, система Dy/Gd представляется чрезвычайно перспективной как для фундаментальных исследований особенностей косвенного обменного взаимодействия в редкоземельных металлах, так и с точки зрения синтеза новых магнитных материалов с геликоидальным магнитным упорядочением. В этой связи тематика диссертационной работы, безусловно, является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, четырех частей и заключения. Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, отмечена научная новизна, сформулирована цель работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводятся сведения о кристаллической структуре и магнитных фазах, характерных для редкоземельных металлов. При этом особое внимание уделяется свойствам массивных монокристаллов Dy и Gd. Представлен обзор современного состояния исследований в области многослойных структур на основе Dy и Gd. Отмечена скудность имеющихся экспериментальных результатов, касающихся магнитных свойств таких объектов.

**Во второй главе** дается подробное описание экспериментальных методов, используемых в работе для исследования кристаллической структуры и магнитных свойств образцов. Структурные особенности сверхрешеток исследуются методами рентгеновской рефлектометрии и дифракции высокого разрешения, включая метод картирования обратного пространства. Магнитные свойства изучаются с применением статической магнитометрии, рефлектометрии поляризованных нейтронов (ППН), рентгеновского магнитного кругового дихроизма (XMCD) и ядерно-резонансной (мёссбауэровской) рефлектометрии.

**Третья глава** посвящена описанию технологии синтеза образцов и их аттестации рентгеноструктурными методами. Серия сверхрешеток  $[\text{Dy}/\text{Gd}]_{20}$  с различными толщинами слоев Dy и Gd приготовлена методом высоковакуумного магнетронного напыления на подложках  $(11-20)\text{Al}_2\text{O}_3$  с использованием в качестве буфера бислоя Nb/Y, обеспечивающего эпитаксиальные условия роста слоев Dy и Gd. Анализ данных рентгеновской дифракции показал высокое качество кристаллической структуры полученных сверхрешеток со среднсквадратичной шероховатостью межслойных границ  $\sim 2 - 3$  атомных монослоя.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования магнитной структуры образцов методами статической магнитометрии, XMCD, ППН и мёссбауэровской рефлектометрии. Наиболее полный набор данных, включающий все перечисленные методики, получен для одной из исследуемых сверхрешеток –  $[\text{Dy}(60\text{\AA})/\text{Gd}(60\text{\AA})]_{20}$ . Анализ такой большой совокупности экспериментальных данных позволил установить, что в слабом магнитном поле 100 Э и температурном интервале 10 – 170 К в сверхрешетке формируется т.н. «веерное» упорядочение магнитных моментов Dy. При этом магнитные моменты в слоях Dy лежат в базисной плоскости, а магнитные моменты Gd ориентированы преимущественно вдоль направления оси c. Переход в ФМ фазу, наблюдающийся в объемном Dy ниже 85 К, оказывается подавлен, что связывается с деформациями кристаллической структуры тонких слоев Dy в сверхрешетке Dy/Gd. Эффект подавления ФМ фазы наблюдается для серии образцов  $[\text{Dy}(t)/\text{Gd}(60\text{\AA})]_{20}$  с различными толщинами слоев Dy  $t = 30 - 180 \text{\AA}$ .

**В заключении** перечислены основные выводы работы. Отметим наиболее важные **новые научные результаты**, полученные в диссертации. В ходе выполнения работы

впервые отработана технология получения высококачественных эпитаксиальных слоистых структур Dy/Gd методом высоковакуумного магнетронного напыления. Для определения магнитной структуры сверхрешеток Dy/Gd впервые применен комплексный анализ данных магнитометрии, рефлектометрии поляризованных нейтронов, а также рентгеновского магнитного кругового дихроизма. В результате такого анализа впервые продемонстрирована реализация всерного магнитного упорядочения в слоях Dy, когерентно распространяющегося по всей толщине сверхрешетки. При этом обнаружено, что в случае сверхрешетки Dy/Gd такой тип магнитной структуры может существовать в широком интервале температур 10 – 170 К в относительно слабом поле ~ 100 Э, в то время как в объемном Dy всерная фаза возникает лишь при приложении значительных магнитных полей ~ 10 кЭ в более узком температурном диапазоне ~ 90 – 180 К.

**Достоверность** полученных в работе результатов обеспечивается использованием аттестованных образцов и современных методик комплексного исследования, согласием и непротиворечивостью результатов с данными, опубликованными в литературе другими авторами. Основные результаты диссертации докладывались на 5 международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 3 научных статьях, входящих в перечень ВАК.

Научные результаты, полученные в рамках данной работы, позволяют глубже понять механизмы формирования магнитного геликоидального порядка в редкоземельных сверхрешетках, что будет способствовать развитию дальнейших исследований сверхрешеток Dy/Gd, которые могут быть использованы для создания новых материалов спинтроники, что определяет **практическую значимость** полученных результатов.

**К замечаниям** по диссертационной работе можно отнести следующее:

1. Описание метода ядерно-резонансной рефлектометрии в разделе, посвященном экспериментальным методикам, недостаточно подробное и малоинформативное. В представленном виде оно затрудняет понимание основных принципов и возможностей метода широкому кругу читателей.
2. При описании технологических условий роста образцов указано наличие магнитного поля 110 Э, приложенного в плоскости подложки в процессе напыления структуры. Следовало бы пояснить необходимость такого поля.
3. В монокристаллах Dy имеется существенная магнитная анизотропия 6-го порядка в базисной плоскости. В работах, посвященных магнитным свойствам Dy, всегда указывается точное кристаллографическое направление приложения магнитного поля. В диссертации вопрос анизотропии в плоскости никак не затрагивается, хотя исследуются псевдо-монокристаллические образцы.

Указанные исчисления не являются принципиальными ошибками и не снижают общий научный уровень диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Антропова Николая Олеговича представляет собой законченную научно-квалификационную работу и заслуживает положительной оценки. Н. О. Антропов получил интересные экспериментальные результаты при решении актуальной научной задачи по установлению зависимости между структурными и магнитными свойствами сверхрешеток Dy/Gd.

Профиль диссертации соответствует специальности 01.04.11 (физика магнитных явлений), а сама работа по своему научному уровню, информативности и достоверности новых результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявленным к кандидатским диссертациям, и удовлетворяет требованию п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Н. О. Антропов заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Содержание диссертации рассмотрено, и отзыв утвержден на заседании Ученого совета ИФП РАН, протокол № 671 от 21 ноября 2018 года. Отзыв подготовлен д.ф.-м.н. Н.М. Крейнес и к.ф.-м.н. А.Б. Дровосековым.

Ведущий научный сотрудник ИФП РАН

доктор физ.-мат. наук, профессор

Н.М. Крейнес

Научный сотрудник ИФП РАН

кандидат физ.-мат. наук

А.Б. Дровосеков

Почтовый адрес: 119334, Москва, ул. Косыгина 2

Тел.: (499) 137-32-48

E-mail: office@kapitza.ras.ru

Ученый секретарь ИФП РАН,

кандидат физ.-мат. наук

О.А. Андреева

С отзывом ознакомлен

02.12.18

Антропов Н.О.

## Сведения о ведущей организации

диссертации Антропова Николая Олеговича «Кристаллическая структура и магнитное упорядочение в сверхрешетках Dy/Gd»

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П. Л. Капицы Российской академии наук

Краткое наименование: ИФП РАН

Адрес: 119334, Москва, ул. Косыгина 2

Телефон: (499) 137-32-48

Факс: (495) 651-21-25

E-mail: office@kapitza.ras.ru

Сайт: <http://www.kapitza.ras.ru>

## Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

- 1). X-Ray Diffraction Analysis of LiCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Crystals with Additives of Silver Atoms V.P. Sirotkin, A.A. Bush, K.E. Kamentsev, H.S. Dau, K.A. Yakovlev, E.A. Tishchenko, Crystallography Reports **60**(5), 662 (2015).
- 2). Модельно-независимое исследование поверхности кремнезоля методом рентгеновского рассеяния А.М. Тихонов, В.Е. Асадчиков, Ю.О. Волков, Б.С. Рошин, В. Хонкимаки, М. Бланко, Письма в ЖЭТФ **107**(6), 394 (2018).
- 3). Межслойное обменное взаимодействие в многослойных магнитных системах Fe/Cr/Fe" (Обзор). Н.М. Крейнес, Д.И. Холин, С.О. Демокритов, ФНТ **38**, 1041 (2012).
- 4). Рентгеновская рефлектометрия монослоев DMPS на водной подложке А.М. Тихонов, В.Е. Асадчиков, Ю.О. Волков, Б.С. Рошин, Ю.А. Ермаков, ЖЭТФ **152**, (2017).
- 5). Temperature dependence of interlayer coupling in Fe/Cr superlattices. FMR studies. A.B. Drovosekov, D.I. Kholin, N.M. Kreines, O.V. Zhotikova, S.O. Demokritov, JMMM **226**, 1779 (2001).

Ученый секретарь ИФП РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

О.А. Андреева

21.11.2018