

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

КРАВЦОВА Евгения Алексеевича

на тему: « КОМПЛЕМЕНТАРНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАССЕЙНИЯ НЕЙТРОННОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР»

по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Магнитные наноструктуры, содержащие тонкие слои одного или двух магнитоупорядоченных металлов - ферромагнетика или антиферромагнетика, представляют большой интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и с практической точки зрения в качестве потенциальных элементов спинтроники. В прошлом столетии при изучении магнитных наноструктур исследователи удовлетворялись информацией о магнитных моментах, усредненных по отдельным слоям, и межслойном обменном взаимодействии. В последние годы усилился интерес к изучению внутрислойной магнитной структуры. Для такого рода исследований уже оказывается недостаточным использование того или иного пусть и уникального метода. Совокупное применение различных нейтронных и рентгеновских синхротронных методов для определения магнитной структуры внутри тонких ферромагнитных и антиферромагнитных слоев развивается в России в известной степени благодаря усилиям диссертанта. Таким образом, актуальность диссертации и научная ценность представленного в ней материала несомненны.

Цель диссертации состояла в исследовании атомной и магнитной микроструктуры магнитных металлических наноструктур, основанных на комплементарном (взаимодополняющем) использовании рассеяния нейтронов и синхротронного излучения.

Достоверность результатов, приведенных в работе, не вызывает сомнений. В диссертации используется уникальное оборудование. Вызывает уважение высокий уровень анализа полученных результатов. По теме представленной диссертации автором опубликовано 22 статьи в журналах, включенных ВАК в перечень ведущих рецензируемых журналов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, перечислены методы исследований, указаны область, объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, выделены восемь положений, которые выносятся на защиту, отмечаются научная и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации изложены результаты исследований сверхрешеток Fe/Cr. Вообще говоря, сверхрешетки, содержащие слои хрома, привлекают повышенное внимание. Хорошо известно, что основным магнитным состоянием металлического хрома при температурах ниже температуры Нееля $T_N=311$ К является антиферромагнитное несоизмеренное состояние волн спиновой плотности (ВСП). При этом величины антиферромагнитно упорядоченных магнитных моментов оказываются синусоидально модулированными с периодом около 60 \AA в кристаллографическом направлении [001]. Несоразмеренное состояние ВСП в металлическом хrome возникает вследствие делокализованного характера электронов, являющихся носителями магнетизма. В тонких пленках Cr несоизмеренное состояние ВСП оказывается зависящим от магнитных и электронных свойств границ. В гетероструктурах Fe/Cr ВСП представляет собой периодическую модуляцию величины антиферромагнитно-упорядоченных магнитных

моментов хрома с типичным периодом 50 – 70 Å. ВСП в системах на основе Cr сосуществуют с волной зарядовой плотности и волной упругих напряжений, которые представляют собой периодическую модуляцию соответственно зарядовой плотности и межатомных расстояний с периодом вдвое меньше периода ВСП. Переход между соизмеримой и несоизмеримой фазами может существенным образом сказываться на магнитных свойствах всей системы. В сверхрешетках Fe/Cr в свое время впервые было обнаружено осциллирующее с толщиной слоя Cr межслойное обменное взаимодействие. Так при толщине слоев хрома равной 9 Å в сверхрешетках реализуется антипараллельное упорядочение слоев железа, а при 18 Å - параллельное. В ряде случаев в сверхрешетках Fe/Cr наблюдалось неколлинеарное магнитное упорядочение. В литературе бурно обсуждались причины возникновения такого неколлинеарного состояния. В качестве возможных механизмов так называемого биквадратичного обменного взаимодействия предлагались нелинейные поправки к РККИ взаимодействию, флуктуации толщины слоев хрома, наличие магнитных примесей вблизи интерфейсов в прослойке и др. Кравцов при теоретической поддержке профессора Бориса Топерверга удалось однозначно показать, что в сверхрешетках Fe/Cr, выращенных при различных температурах подложки, существует прямая корреляция между шероховатостью межслойных границ и углом неколлинеарности. Этот результат был получен при анализе данных по рентгеновской рефлектометрии и незеркального рассеяния нейтронов и является, на мой взгляд, **наиболее сильным** в данной главе.

Во второй главе диссертации комбинированное применение нейтронных и рентгеновских методов иллюстрируется на примере магнитно-неоднородных ферромагнитных сверхрешеток Fe/Gd. Показано, что характер изменения магнитных моментов как по величине, так и по направлению внутри ферромагнитных слоев может быть установлено путем комбинированного применения поляризационной нейтронной и резонансной магнитной рефлектометрии, а внутри антиферромагнитных слоев – совокупного применения рентгеновской и нейтронной рефлектометрии. Автором было продемонстрировано, что в гетероструктуре $[\text{Fe}(35\text{\AA})/\text{Gd}(50\text{\AA})]_5$ одновременный самосогласованный анализ рентгеновских и нейтронных спектров позволяет определять элементарно-чувствительные толщинные зависимости вектора намагниченности в плоскости слоев в мультислойных системах. **Замечательным успехом диссертанта** является наблюдение внутри слоев гадолиния неоднородного состояния с атомным разрешением, характеризующимся увеличением магнитного момента вблизи границы раздела Fe/Gd и уменьшением их к середине слоев. При $T=20$ К и $H=5$ кЭ наблюдалось сильное вращение магнитных моментов внутри слоев гадолиния, причем магнитные моменты гадолиния ориентированы в направлении приложенного магнитного поля в середине слоев и против магнитного поля вблизи границы раздела. Сравнение с данными, полученными с помощью только одной из использованных Кравцовым методик, показывает, что комплексный подход позволяет обнаружить неоднородное распределение вектора намагниченности внутри отдельных слоев с разрешением в несколько атомных слоев.

Третья глава посвящена комплексному применению нейтронных и рентгеновских методов для исследования антиферромагнитных наноструктур Cr/V. Было показано, что гибридизация на границе V/Cr вызывает сильное и далекодействующее влияние на поведение ВСП в пленке Cr. Во-первых, было найдено, что гибридизация на границе раздела Cr/V изменяет поляризацию ВСП от перпендикулярной к параллельной, т.е. поперечная несоизмеримая ВСП проходит в плоскости пленки и магнитные моменты находятся также в плоскости пленки. Во-вторых, для периода ВСП и параметра порядка была обнаружена смесь черт, присущих сплавам Cr/V и простым пленкам Cr. Из этих экспериментов автор заключает, что влияние очень тонких (порядка 14 Å) слоев ванадия на достаточно толстые пленки хрома оказывается удивительно сильны, коренным образом изменяя основные черты ВСП внутри пленки Cr. Это касается поляризации ВСП, периода

и температурной зависимости магнитных моментов хрома в области низких температур. Вместе с тем, температура Нееля остается такой же, как и в массивных образцах. Остроумной идеей, на мой взгляд, является наводораживание образцов, которое касается селективным образом слоев ванадия. Для гетероструктур $[\text{Cr}(500\text{\AA})/\text{V}(14\text{\AA})]_4$ получено свидетельство о том, что насыщение водородом слоев ванадия позволяет контролируемым образом изменять спин-волновое состояние в слоях хрома и, в частности, осуществлять переход между несоизмеримой и соизмеримой фазами ВСП. Эта возможность управления спин-волновым состоянием может оказаться полезной при создании элементов спинтроники, предполагающих использование гетероструктур на основе хрома.

Четвертая глава диссертации посвящена развитию спектроскопии протяженной тонкой структуры DAFS, которая дает информацию о структуре ближнего порядка, то есть о длине связей, координационных числах, типах соседних атомов и разупорядочении связей для атомов, окружающих резонансно рассеивающие атомы. Спектроскопия DAFS использована для разрешения локальной структуры Mn в пленке феррита Fe_2MnO_4 , выращенного в неравновесных условиях. Анализ данных был проведен с использованием соотношений Крамерса-Кронига, которые позволили определить локальную структуру вокруг различного окружения ионов Mn в элементарной ячейке. В диссертации получены экспериментальные свидетельства о том, что длина связей Mn(A)-O оказываются значительно большими длинами связей Fe(A)-O. Особенно важным выглядит заключение, о том что спектроскопия DASF способна установить локальное атомное окружение атомов Mn в позиции B и обнаружить значительное уменьшение их координационных чисел. Это находится в соответствии с одной из точек зрения о том, что тенденция марганца оказаться в тетраэдрически координированной позиции в таких системах. Данный вывод является определяющим в установлении причин перепутывания позиций Mn.

В **заключении** отмечается, что в диссертации развиты методы определения атомной и магнитной микроструктур, основанные на комплексном исследовании рассеяния нейтронов и синхротронного излучения.

Диссертация Е.А. Кравцова, естественно, не лишена недостатков. Следует сделать несколько замечаний общего характера.

В первую очередь следует отметить телеграфный стиль изложения, который не позволяет изложить детали экспериментальных результатов.

Во вторых, в диссертации реализовано несколько принципиально возможных комплексных применений нейтронных и рентгеновских методик. Однако каждая из возможностей показана, как правило, на одном объекте. В первую очередь это относится к Главе II. Хорошо известно, что среди редкоземельных элементов аналогично гадолинию ферромагнитными являются тербий, диспрозий и гольмий. Было бы интересно сравнить данные анализа гетероструктур Fe/Gd с другой гетероструктурой, например, Fe/Tb и особенно Fe/Ho. Гольмий, сам по себе, представляет принципиальный интерес. Однако такие эксперименты не были поставлены. В докторской диссертации, именуемой «Комплементарное применение рассеяния нейтронного и синхротронного излучения для исследования магнитных металлических наноструктур», хотелось бы видеть более широкий фронт исследований. Это же замечание касается и последней, четвертой главы диссертации, где автор также ограничивается исследованиями пленок лишь одного феррита Fe_2MnO_4 .

Другое замечание касается освещения состояния исследованных вопросов. В диссертации практически не приводится сравнение полученных автором результатов с результатами, которые могли бы быть получены с применением одного из методов в отдельности. Это могло бы заметно укрепить выводы диссертации.

Подробная схема расчета, приведенная в разделе 2.5.2., не читается. Эта «болезнь» присуща многим экспериментаторам, когда в ущерб более подробному изложению

деталей эксперимента, автор приводит длинные теоретические выкладки, которые кажутся ему интересными.

Для читателя было бы удобным видеть в диссертации отдельно список публикаций автора, а в названии главы, номера публикаций, на основе которых написана та или иная глава.

Мне не очень понравился в названии диссертации термин «Комплементарный...» Я бы предложил «взаимодополняющий» или лучше «совокупный или комплексный». Для старшего поколения читателей это слишком новый термин.

Есть в диссертации и мелкие огрехи оформления: при указании размеров используются то нанометры, то ангстремы.

Однако следует с полной убежденностью подчеркнуть, что указанные недостатки диссертации ни в коей мере не порочат ее в целом, как результат большой и весьма плодотворной работы, безусловно достоверной в каждом приведенном в ней экспериментальном факте.

Таким образом, диссертация Е.А. Кравцова заслуживает самой высокой оценки, как весьма разностороннее исследование в важной области современной физики, содержащее новые и достоверные результаты. Эти результаты уже используются и будут использоваться в будущем физиками, работающими в области свойств наноструктур.

Отмеченные недостатки, однако, не являются принципиальными и не снижают ценности диссертации. Она выполнена на высоком научном уровне. Автореферат отражает основные положения диссертационной работы, материалы диссертации достаточно полно освещены в публикациях автора, с которым я знаком с 2000-х годов, когда наши пути пересеклись в Рурском Университете г. Бохума.

В целом диссертационная работа Е.А. Кравцова «Комплементарное применение рассеяния нейтронного и синхротронного излучения для исследования магнитных металлических наноструктур» представляет собой целостную научную работу, в которой автором разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение.

Диссертационная работа Кравцова Е.А. 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,
профессор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Казанский
физико-технический институт им. Е.К. Завойского
Казанского научного центра Российской
Академии Наук

И.А. Гарифуллин

Почтовый адрес: Российская Федерация, Республика Татарстан,
420029, г.Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7
Тел.: (843) 272 05 03
E-mail: ilgiz0garifullin@gmail.com

Экспертное
затверждение
28.11.2017
- Е.А. Кравцов

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Гарифуллин Ильгиз Абдулсаматович

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

Полное наименование организации: Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской академии, г. Казань

Должность: главный научный сотрудник лаборатории физики перспективных материалов

Почтовый адрес: Российская Федерация, Республика Татарстан,
420029, г.Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

Тел.: (843) 272 05 03

E-mail: ilgiz0garifullin@gmail.com

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Kamashev, A.A., Leksin, P.V., Schumann, J., Kataev, V., Thomas, J., Gemming, T., Büchner, B., Garifullin, I.A. Proximity effect between a superconductor and a partially spin-polarized ferromagnet: Case study of the Pb/Cu/Co2Cr1-xFexAl trilayer. Physical Review B 96(2), 024512 (2017).
2. Leksin, P.V., Kamashev, A.A., Schumann, J., Kataev, V.E., Thomas, J., Büchner, B., Garifullin, I.A. Boosting the superconducting spin valve effect in a metallic superconductor/ferromagnet heterostructure. Nano Research 9(4), 1005 (2016).
3. Leksin, P.V., Garifyanov, N.N., Kamashev, A.A., Validov, A.A., Fominov, Ya.V., Schumann, J., Kataev, V., Thomas, J., Büchner, B., Garifullin, I.A. Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in Co O_x/Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb multilayer. Physical Review B 91(21),214508 (2015).

Ученый секретарь Казанского физико-технического института
КазНЦ РАН, доктор физ.-мат. наук

Э.К. Воронкова



31.10.201