

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Рябухиной Марины Викторовны **«Кристаллическая структура и магнитные свойства сверхрешеток Fe/Cr/Gd»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Актуальность темы диссертации

Стимулом к исследованию многослойных магнитных систем является открытие эффекта гигантского магнитосопротивления в многослойных структурах с чередующимися магнитными и немагнитными слоями, когда начало практического применения нового открытия опередило полное понимание лежащего в его основе фундаментального явления. Особый интерес представляет изучение физики магнитных явлений в соединениях с редкоземельными металлами, так как последние являются основой для синтеза различных соединений и обладающими высокими значениями индукции насыщения, коэрцитивной силы и магнитострикции, что важно в случае их прикладного использования. Изучение свойств многослойных структур на основе редкоземельных металлов несомненно открывает новую физику магнитных явлений, где эффекты близости в низкоразмерных системах приводят к появлению новых свойств материалов в сравнении с их «объёмными» аналогами. Диссертационная работа М.В. Рябухиной посвящена установлению корреляции между структурными и магнитными

свойствами сверхрешеток Fe/Cr/Gd. Слоистые наноструктуры Fe/Cr/Gd представляют интерес для фундаментальной науки как совершенно новый тип искусственных материалов с необычными физическими свойствами. Тема является несомненно актуальной, так как для редкоземельных металлов характерно наличие больших значений спонтанных магнитных моментов, которые сильно зависят от температуры. Однако, при комнатной температуре все редкоземельные металлы немагнитны, что ограничивает их практическое применение. В то же время ферромагнитные переходные металлы обладают демонстрируют температуру Кюри, которая значительно выше комнатной температуры, однако величина их спонтанного магнитного момента значительно меньше, чем у редкоземельных металлов. Синтезируя сверхрешетки из чередующихся слоев переходного металла и редкоземельного металла можно рассчитывать получить магнитные материалы с большими значениями намагниченности при комнатной температуре. Известно, что прослойка Cr между слоями Cr и Gd может изменить антиферромагнитное упорядочение, наблюдаемое в Fe/Gd многослойных системах на ферромагнитное в Fe/Cr/Gd системе. Несмотря на очевидную перспективность, системы Fe/Cr/Gd оставались до этой работы малоизученными.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Первая глава представляет собой краткий, но довольно подробный обзор имеющихся в литературе сведений в исследуемой области на сегодняшний день. Особое внимание уделено исследованиям в области многослойных структур на основе Gd. Вторая глава посвящена описанию методик приготовления образцов и исследования их структурных и магнитных свойств, а так же

характеристике использованного экспериментального оборудования. Третья глава посвящена росту образцов, их рентгеноструктурной аттестации и изучению кристаллической структуры. В четвертой главе описаны исследования магнитной структуры с помощью SQUID - магнитометрии и XMCD измерений. В пятой главе описаны особенности магнитной структуры сверхрешеток, исследованные с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов и рентгеновской резонансной магнитной рефлектометрии. Заключение содержит основные выводы диссертационной работы.

Научная новизна результатов диссертационной работы

В работе получены следующие важные экспериментальные результаты:

1. Обнаружено, что при напылении на слой Cr атомов Gd, в дополнении к основной ГПУ фазе в слое Gd формируется ГЦК фаза. В работе установлено, что эта особенность объясняет уменьшение среднего магнитного момента в слое Gd.
2. Получены численные значения средних магнитных моментов Gd в сверхрешетках Fe/Cr/Gd в зависимости от толщины прослойки Cr.
3. Обнаружено, что во внешнем магнитном поле около 1 кЭ при температурах много меньше температуры Кюри объемного Gd в сверхрешетках $[\text{Fe/Cr/Gd/Cr}]_{12}$ с толщинами Cr 5 - 8 Å магнитные моменты слоев Fe и Gd упорядочиваются ферромагнитно.

Эти результаты несомненно обладают научной новизной, обусловленной с одной стороны, синтезом серии новых сверхрешеток Fe/Cr/Gd, позволивших провести систематическое исследование их свойств, а, с другой стороны, использованием комбинации самых современных методов их изучения - рефлектометрии поляризованных нейтронов и рентгеновской резонансной магнитной рефлектометрии.

Достоверность результатов обеспечена использованием современного напылительного оборудования, сертифицированных материалов и метрологически аттестованных измерительных приборов и методик. Основные результаты диссертации докладывались на 11 международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, опубликованы в 3 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Практическая значимость полученных результатов

Полученные результаты исследований зависимостей магнитных характеристик сверхрешеток Fe/Cr/Gd от толщины слоев Cr, могут быть использованы для оптимизации требуемых функциональных характеристик наноматериалов, предназначенных для конкретных практических приложений. И поэтому могут представлять интерес для разработчиков новых устройств микроэлектроники.

Замечания по диссертационной работе:

Хотя в целом работа написана прекрасным русским языком и хорошо структурирована, она не лишена и некоторых огрехов – опечаток и стилистических неточностей.

Например, в некоторых местах «Брэгговские пики» оказываются «Брегговскими» (см. стр. 56 и 58).

Примером стилистической недоработки может служить предложение со страницы 35 *«Отличительной особенностью исследования магнитных характеристик тонких многослойных структур является работа с небольшим количеством магнитного материала в образце, что делает*

необходимым использовать высокочувствительное измерительное оборудование».

Рисунки в диссертации выполнены ясно и четко, но и в них есть некоторые огрехи. Например, на Рисунке 2 (стр. 23) температура измеряется в непонятных единицах «Е», вместо «К» - Кельвин.

В подписях к рисункам в нескольких случаях можно найти некорректные выражения для описания зависимостей. Например, в подписи к Рисунку 37 (стр.80) и Рисунку 41 (стр.84) заявлено, что это «Зависимость величины магнитного момента от толщины слоя», в то время как на Рисунке 37 представлена зависимость величины магнитного момента от координаты z внутри слоя Gd, а на Рисунке 41 представлена зависимость величины магнитного момента от координаты z внутри слоев Fe, Cr и Gd.

Описание экспериментальной установки – рефлектометра поляризованных нейтронов – на стр. 42 содержит ряд неточностей. Почему-то расходимость нейтронного пучка выражена в терминах $\Delta\lambda/\lambda = 1\%$? Видимо описка. Почему-то спин-флиппер – это катушки с переменным магнитным полем? Опишите принцип работы флиппера и дайте ссылку. Почему-то экспериментальный столик вращается на угол 2θ ? Имеется ли в виду геометрия $\theta - 2\theta$, или что-то другое? И наконец, что означает предложение «Регистрация интенсивности отраженного нейтронного пучка может осуществляться детекторами двух типов: монодетектором - для измерений кривых зеркального отражения в случае исследования образцов, не требующих полного поляризационного анализа, или двухкоординатным позиционно-чувствительным детектором, состоящим из 200×200 активных элементов с разрешением 3 мм и применяемым для одновременной регистрации как зеркального отражения, так и диффузного фона. » Кажется, что с монодетектором тоже можно делать поляризационный анализ, а двухкоординатный детектор применяется как раз

для одновременной регистрации как зеркального отражения, так и диффузного фона.

К сожалению, блестящие экспериментальные результаты о неколлинеарном направлении среднего магнитного момента вблизи интерфейса и в центре слоя Gd по отношению к магнитному полю, никак не обсуждаются. В то же время вопрос напрашивается сам собой: является ли это результатом биквадратичного обмена, который автор упоминает на стр.17, или результатом РККИ взаимодействия, то есть фрустрации спинов из-за конкуренции обменных взаимодействий с ближайшими соседями и соседями следующими за ними? Можно ли, основываясь на комбинации методов РПН и РРМР и экспериментальных данных полученных этими методами, однозначно построить модель неколлинеарной спиновой структуры внутри слоя Gd? Возможно ответы на эти вопросы дело будущего, но формулировка рабочих гипотез и выработка возможных решений была бы крайне полезной.

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

Заключение (выводы о работе)

В целом диссертационная работа заслуживает положительной оценки. М.В. Рябухина получила интересные экспериментальные результаты при решении актуальной научной задачи по установлению зависимости между структурными и магнитными свойствами сверхрешеток Fe/Cr/Gd. Содержание и оформление работы удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям.

Автореферат отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений. Диссертационная

работа по своему научному уровню, знанию и достоверности новых результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявленным к кандидатским диссертациям и удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842. М.В. Рябухина заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий отделом
Исследований конденсированного состояния,
ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт»

С.В. Григорьев

«29» ноября 2016 г.

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

Тел.: +7(81371)46561

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

Ученый секретарь

ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им.Б.П. Константинова"

НИЦ "Курчатовский институт"

кандидат физ.-мат. наук

С.И. Воробьев

Подпись руки _____

ЗАВЕРЯЮ:

Нач. отдела кадров _____

7
С ответом ознакомлена
од. 12.2016 г.
/Рябухина

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: Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

Должность: зав. отдела Исследований конденсированного состояния

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

Тел.: +7(813-71)46561

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

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. S. V. Grigoriev, A. S. Sukhanov, S. V. Maleyev / From spiral to ferromagnetic structure in B20 compounds: Role of cubic anisotropy // Phys. Rev. B vol. 91 pp. 224429 (2015).
2. С. В. Григорьев, А. А. Мистонов, В. А. Уклеев / Развитие методов малоугловой дифракции, малоуглового рассеяния и рефлектометрии поляризованных нейтронов для диагностики магнитных наноматериалов // Вестник РФФИ vol. 2 N. 86 pp. 35 – 40 (2015).
3. E. Moskvina, S. Grigoriev, V. Dyadkin, H. Eckerlebe, M. Baenitz, M. Schmidt, H. Wilhelm / Complex Chiral Modulations in FeGe Close to Magnetic Ordering // Phys. Rev. Lett. vol. 110 N. 7 pp. 077207 (2013).
4. V. A. Ukleev, N. A. Grigoryeva, E. A. Dyadkina, A. A. Vorobiev, D. Lott, L. V. Lutsev, A. I. Stognij, N. N. Novitskiy, A. A. Mistonov, D. Menzel, and S. V. Grigoriev / Magnetic properties of the SiO₂(Co)/GaAs interface: Polarized neutron reflectometry and SQUID magnetometry // Physical Review B vol. 86 N. 13 pp. 134424-1 -- 134424-6 (2012)

5. A.N. Pirogov, S.G. Bogdanov, Seongsu Lee, Je-Geun Park, Y.-N. Choi, H. Lee, S.V. Grigoriev, V.V. Sikolenko, E.A. Sherstobitova, R. Schedler / Determining the magnetic ground state of TbNi₅ single crystal using polarized neutron scattering technique // Journal of Magnetism and Magnetic Materials vol. 324 pp. 3811–3816 (2012).

Ученый секретарь

ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им.Б.П. Константинова"

НИЦ "Курчатовский институт"

кандидат физ.-мат. наук

С.И. Воробьев

Подпись руки _____
ЗАВЕРИЛО:
Нач. отдела кадров _____
ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова"