

На правах рукописи

Рябухина Марина Викторовна

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА СВЕРХРЕШЕТОК Fe/Cr/Gd**

01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Екатеринбург — 2016

Работа выполнена в лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

Научный руководитель:

Кравцов Евгений Алексеевич кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовой наноспинтроники ФГБУ Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

Официальные оппоненты:

Виктор Иванович Боднарчук, кандидат физико-математических наук, лаборатория нейтронной физики имени Франка, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований

Сергей Валентинович Григорьев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом Исследований конденсированного состояния, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

Ведущая организация:

Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится «16» декабря 2016 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при ФГБУН Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН по адресу: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан « » октября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Большой интерес к изучению многослойных металлических магнитных наноструктур, возникший около 30 лет назад, связан с существенным прогрессом в технологии получения сверхтонких металлических пленок. В этих структурах были обнаружены такие эффекты, как гигантское магнитосопротивление, антипараллельное упорядочение магнитных моментов соседних ферромагнитных слоёв, осциллирующее межслойное обменное взаимодействие, неколлинеарное упорядочение магнитных моментов ферромагнитных слоёв, которые представляют большой интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения [1]. Особый интерес представляет изучение магнитных явлений в гетероструктурах с редкоземельными металлами (РЗМ), так как РЗМ являются основой для наноструктур, обладающих высоким значением намагниченности насыщения, коэрцитивной силы и магнитострикции. Редкоземельные металлы обладают сложной магнитной структурой и непростыми фазовыми диаграммами. Возможность создания эпитаксиальных плёнок и многослойных структур на основе редкоземельных металлов открыла новую физику магнитных явлений, где «эффекты близости» в наноразмерных системах приводят к появлению новых свойств материалов по сравнению с их объемными аналогами.

В то время как гетероструктуры на основе 3d - переходных металлов (ПМ) и редкоземельных металлов хорошо изучены, смешанные ПМ/РЗМ структуры исследованы недостаточно. Система Fe/Gd интересна из-за высокого значения магнитного момента гадолиния и высокой температуры Кюри железа, что можно использовать в практических целях. Отличительной чертой ферромагнетизма мультислоев Fe/Gd является разнообразие типов температурных зависимостей спонтанной намагниченности $M(T)$. При разных толщинах слоев реализуются как монотонные, так и немонотонные температурные зависимости намагниченности. В свехрешётках Fe/Gd при комнатной температуре в слоях Gd в интерфейсных областях из-за эффектов близости возникает спонтанный магнитный момент [2, 3]. Величина индуцированного магнитного момента Gd составляет до 7.5 μ_B /атом и остается неизменной вплоть до комнатной температуры. Толщина возникающего магнитного слоя оценивается в 2 - 4 атомных монослоя Gd. Таким образом, если синтезировать свехрешетку Fe/Gd с достаточно тонкими слоями Gd, то можно получить систему, в которой как 3d - переходный металл, так и редкоземельный металл будут обладать большими магнитными моментами при комнатной температуре.

В последнее время большой интерес вызывает исследование наногетероструктур Fe/Gd, в которых слои ПМ и РЗМ разделены немагнитной прослойкой [4, 5]. Разное строение

электронных оболочек и, как следствие, характер магнетизма 3d - и 4f - элементов могут способствовать появлению новых механизмов межслойного взаимодействия. Предполагается, что изменяя толщину прослойки, можно регулировать интенсивность обменного взаимодействия РЗМ и ПМ. В частности, в работе [4] численным моделированием и экспериментом, проведённым методом рентгеновского магнитного кругового дихроизма, была подтверждена гипотеза об изменении типа межслойного взаимодействия между Fe и Gd в гетероструктурах Fe/Cr/Gd. Однако, только по этим данным нельзя сделать однозначные выводы о характере межслойного обмена. Подобного рода структуры представляют большой фундаментальный интерес, а также прикладной интерес в качестве основы для создания материалов с большим магнитным моментом.

Несмотря на очевидную перспективность, системы Fe/Cr/Gd остаются малоизученными. В частности, остаются неисследованными следующие моменты:

- исследовались отдельные образцы, не производилось систематических исследований структурных и магнитных свойств серий образцов с разными толщинами прослоек Cr;
- в литературе нет исследований корреляции структурных и магнитных свойств;
- до настоящего времени все исследования проводились только на трехслойных структурах Fe/Cr/Gd и Gd/Cr/FeCo и не предпринимались исследования сверхрешёток.

Исходя из вышеизложенного, тема представленной диссертации, посвящённая исследованию структурных и магнитных свойств сверхрешёток Fe/Cr/Gd, является актуальной.

Целью данной работы является установление корреляции между структурными и магнитными свойствами металлических наноструктур Fe/Cr/Gd.

Объектами исследования являются сверхрешетки Fe/Cr/Gd с толщиной слоёв Cr от 0 до 60 Å.

Предметом исследования являются их структурные и магнитные свойства.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- определение внутрислойной кристаллической структуры и свойств межслойных границ сверхрешёток Fe/Cr/Gd в зависимости от толщины прослойки Cr;
- определение макроскопических свойств сверхрешёток методами вибрационной – , СКВИД - магнитометрии и рентгеновского магнитного кругового дихроизма;
- экспериментальное определение магнитного упорядочения в сверхрешётках Fe/Cr/Gd с разрешением по глубине методами рефлектометрии поляризованных нейтронов и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии;

- анализ результатов исследования магнитной структуры, полученных интегральными методами и методами, обеспечивающих разрешение по толщине;
- установление корреляции между кристаллической решеткой и магнитными свойствами;
- выявление роли эффектов близости в формировании магнитных свойств сверхрешёток Fe/Cr/Gd.

Научная новизна

Научную новизну диссертационной работы определяют следующие результаты, полученные лично соискателем:

- впервые проведено систематическое исследование структурных и магнитных свойств серии сверхрешёток Fe/Cr/Gd с разной толщиной слоя хрома: 0 - 60 Å;
- впервые проведено экспериментальное исследование влияния введения прослойки Cr на кристаллическую структуру сверхрешёток Fe/Cr/Gd;
- впервые установлена корреляция структурных и магнитных свойств сверхрешёток Fe/Cr/Gd;
- впервые в сверхрешётках Fe/Cr/Gd обнаружен эффект близости, проявляющийся появлением индуцированного магнитного момента в слоях Gd в том числе при температуре, превышающей температуру Кюри объемного Gd.

Теоретическая и практическая значимость работы

Обнаруженные нами новые свойства сверхрешёток Fe/Cr/Gd, в частности, особенности межслойного обменного взаимодействия и распределение магнитных моментов по глубине могут послужить основой дальнейшего теоретического исследования таких систем.

Полученные в работе результаты по исследованию наногетероструктур Fe/Cr/Gd могут быть использованы для получения на их основе слоистых наноматериалов с большим магнитным моментом, а также для создания новых функциональных материалов спинтроники на основе Gd - содержащих наноструктур.

Методология и методы исследования

Особенностью работы является использование взаимодополняющих методик для изучения магнитной структуры. В работе применяются современные методы для исследования магнитной структуры: СКВИД - магнитометрия, рефлектометрия поляризованных нейтронов (РПН), рентгеновская резонансная магнитная рефлектометрия (РРМР) и рентгеновский магнитный циркулярный дихроизм (XMCD). Отличительной особенностью данных методов состоит в том, что с их помощью можно получать информацию о магнитных свойствах в зависимости от толщины с элементной чувствительностью, и тем самым исследовать каждый из слоёв структуры по отдельности.

Это позволяет подойти к исследованию гетероструктур на качественно новом уровне. Для определения толщины, поверхностной и межслойных шероховатостей применялся метод рентгеновской рефлектометрии. Для определения кристаллической структуры слоёв использовался метод рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения, особенностью которого является высокая поверхностная чувствительность.

Основные положения, выносимые на защиту

- Средние магнитные моменты слоев Fe и Gd в сверхрешётках $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ с толщиной прослойки Cr 6 - 8 Å упорядочиваются ферромагнитно при температурах намного меньше температуры Кюри объемного Gd.
- Введение прослойки Cr между слоями Gd и Fe в сверхрешётках $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ приводит к структурным изменениям в слоях Gd: кроме основной гексагональной плотноупакованной кристаллической решетки Gd формируется гранецентрированная кристаллическая решетка Gd, которая равномерно распределена по всей толщине слоя. Формирование ГЦК фазы Gd приводит к уменьшению среднего магнитного момента в слое Gd.
- При температуре, превышающей температуру Кюри объемного Gd, в сверхрешётках $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ с толщиной прослойки Cr менее 10 Å вблизи интерфейсов в слоях Gd возникает индуцированный магнитный момент.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием аттестованных образцов, проведением измерений на оборудовании лабораторий квантовой наноспинтроники и электрических явлений, центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН, а также проведение экспериментальных нейтронно-синхротронных исследований в крупнейших мировых центрах (институт Лауэ - Ланжевена, FRM - II, Европейский центр синхротронного излучения, ИБР-2, Аргоннская национальная лаборатория). Получено хорошее согласие части экспериментальных результатов настоящей работы с литературными данными. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов модельных и экспериментальных исследований и не противоречат современным научным представлениям.

Изложенные в диссертации результаты соответствуют паспорту специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений: пункту 2 «экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий» и пункту 3 «исследование

изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств».

Результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях: XIII Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-13), (г. Екатеринбург, 2012); VI Всероссийская молодёжная научно – техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов», (г. Екатеринбург, 2012); XLVII Школа ФГБУ «ПИЯФ» по физике конденсированного состояния (ФКС-2013), (г. Санкт - Петербург, 2013); Международная молодёжная научная школа «Современная нейтронография», (г. Дубна, 2013); Совещание по малоугловому рассеянию нейтронов «МУРолец 2013», (г. Гатчина, 2013); VII Всероссийская молодёжная научно – техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов», (г. Екатеринбург, 2013); XLVIII Школа ФГБУ «ПИЯФ» по физике конденсированного состояния (ФКС-2014), (г. Санкт - Петербург, 2014); Международная конференция «Исследование твердого тела на IBR-2», (г. Дубна, 2014); Молодёжная конференция по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах, (г. Санкт-Петербург, 2014); Международная конференция «Исследование твердого тела на IBR-2», (г. Дубна, 2015); XVI Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-16), (г. Екатеринбург, 2015).

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных работах: в 3 статьях в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК и в 10 тезисах докладов на всероссийских и международных конференциях. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Постановка задач и обсуждение полученных результатов проводились М. В. Рябухиной совместно с научным руководителем к. ф.-м. н. Е. А. Кравцовым. Образцы были изготовлены методом магнетронного распыления в лаборатории электрических явлений (ИФМ УрО РАН) В.В. Проглядо и к. ф.-м. н. Л.И. Наумовой. Лично М.В. Рябухиной проведены систематические исследования серии образцов с разной толщиной прослоек Cr методами рентгеновской рефлектометрии и рентгеновской дифракции, магнитные измерения при комнатной температуре на вибрационном магнетометре. Эксперименты по низкотемпературной магнетометрии были проведены в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН к. ф.-м. н. А.В. Королевым. Измерения спектров $[\text{Fe/Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd/Cr}]_{12}$ PPMР и XMCD в Аргоннской национальной лаборатории на синхротроне APS было проведено D.

Haskel. Автор принимал участие в проведении экспериментов методом рефлектометрии поляризованных нейтронов на инструментах NREX (FRM-II, г. Гархинг), SuperADAM (Институт Лау Ланжевена, г. Гренобль), REMUR (ИБР-2, г. Дубна)) и методами PPMР, XMCD на инструменте ID-12 (ESRF, г. Гренобль). Автором проведено исследование корреляции между структурными и магнитными свойствами сверхрешёток Fe/Cr/Gd. Результаты исследований неоднократно докладывались М.В. Рябухиной на всероссийских и международных конференциях. Совместно с руководителем Е.А. Кравцовым автор готовила статьи и тезисы докладов к публикации

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, условных обозначений и списка литературы. Общий объем диссертации 106 страниц, включая 7 таблиц и 47 рисунков. Список литературы включает 135 наименования.

Работа выполнена в рамках следующих программ и грантов

Грант Минобрнауки № 14 Z 50.31.0025; грант Минобрнауки РФ № 8682; программы Президиума УрО РАН (проекты № 12-П-2-1051): РФФИ (проект № 12-02-12054, № 14-22-01063, 14-02-00013 и 12-02-31563).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика диссертации, обсуждается актуальность рассматриваемых вопросов, изложена цель работы, обосновывается её новизна и научная ценность, изложены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приводится краткое изложение основных экспериментальных и обзорных статей, отражающие современное состояние в области систем ферромагнитный металл/неферромагнитный металл/ферромагнитный металл, редкоземельный металл/переходный металл и многослойных структур на основе Gd. Кратко описываются физические причины, объясняющие возникновение эффектов магнитной близости.

Во **второй главе** описана методика синтеза сверхрешеток при помощи высоковакуумного магнетронного распыления. Описаны методики проведения структурной аттестации образцов с помощью рентгеновской рефлектометрии, незеркального рассеяния и исследования кристаллической структуры образцов с помощью метода рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения. Приведено описание методик измерения намагниченности при помощи вибрационной магнитометрии. А также дано описание рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) и резонансной рентгеновской магнитной

рефлектометрии (РРМР). Данные методы позволяют получать информацию о распределении магнитных моментов в сверхрешетках с разрешением по глубине.

Третья глава посвящена описанию синтеза образцов, их рентгеноструктурной аттестации и определении их кристаллической структуры.

Серия сверхрешёток $\text{Cr}(50 \text{ \AA})/[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Cr}(t, \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Cr}(t, \text{ \AA})]_{12}/\text{Cr}(30 \text{ \AA})$, $t = 0 - 60 \text{ \AA}$ была приготовлена на монокристаллических подложках (001) Si методом магнетронного распыления на постоянном токе. Структурная аттестация образцов была проведена методами рентгеновской рефлектометрии на лабораторном дифрактометре Panalytical Empyrean Series 2. Качество межслойных границ наноструктур оценивалось при помощи рентгеновской рефлектометрии. Для изучения межслойной шероховатости были сняты карты диффузного рассеяния и ω - сканы. Обработка рефлектограмм была проведена с помощью коммерческой программы X-Pert Reflectivity. Согласно результатам исследований, все слои сверхрешёток представлены сплошными слоями (кроме образца $[\text{Fe}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})]_{12}$). Образцы имеют слоистую периодическую структуру, резкие межслойные границы со среднеквадратичной амплитудой шероховатостей $\sigma = 4 - 9 \text{ \AA}$. Никакой систематической зависимости свойств межслойных границ от толщины прослойки Cr нами не выявлено. Фактическая толщина слоёв в сверхрешетках отличалась от номинальных значений на 1-8 %. Плотность образующих сверхрешетку слоев, как правило, меньше плотности соответствующих объемных материалов на 1.4-5.5 %. На поверхности сверхрешеток образуется слой Cr_2O_3 толщиной в 15-20 \AA , обеспечивающий защиту сверхрешетки от окисления.

Кристаллическая структура сверхрешёток $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ была определена с помощью рентгеновской дифракции в геометрии скользящего пучка. На Рисунке 1 (а) представлены дифрактограммы от четырех образцов серии $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$, а также для сверхрешётки $[\text{Fe}/\text{Gd}]_{12}$, снятые при фиксированном угле скольжения $\omega = 3^\circ$. Проведенные исследования показали, что в сверхрешетках Fe/Gd без прослойки Cr гексагональная плотноупакованная кристаллическая фаза (ГПУ) Gd является единственной, а введение прослойки Cr приводит к формированию новой фазы - гранецентрированной кристаллической фазы (ГЦК). Для образцов, приведенных на Рисунке 1 (а), были рассчитаны параметры решеток Gd по положениям брэгговских пиков ГПУ (0002) и ГЦК (111). Значения параметров решеток находятся в хорошем согласии с результатами других авторов. Параметр c для ГПУ Gd в сверхрешётках отличается от объемного Gd на 4.3 – 6 %. Это свидетельствует о том, что нет систематической зависимости параметра решетки c от толщины слоя Cr. Погрешность значений параметров решетки оценивается около 0.01 \AA .

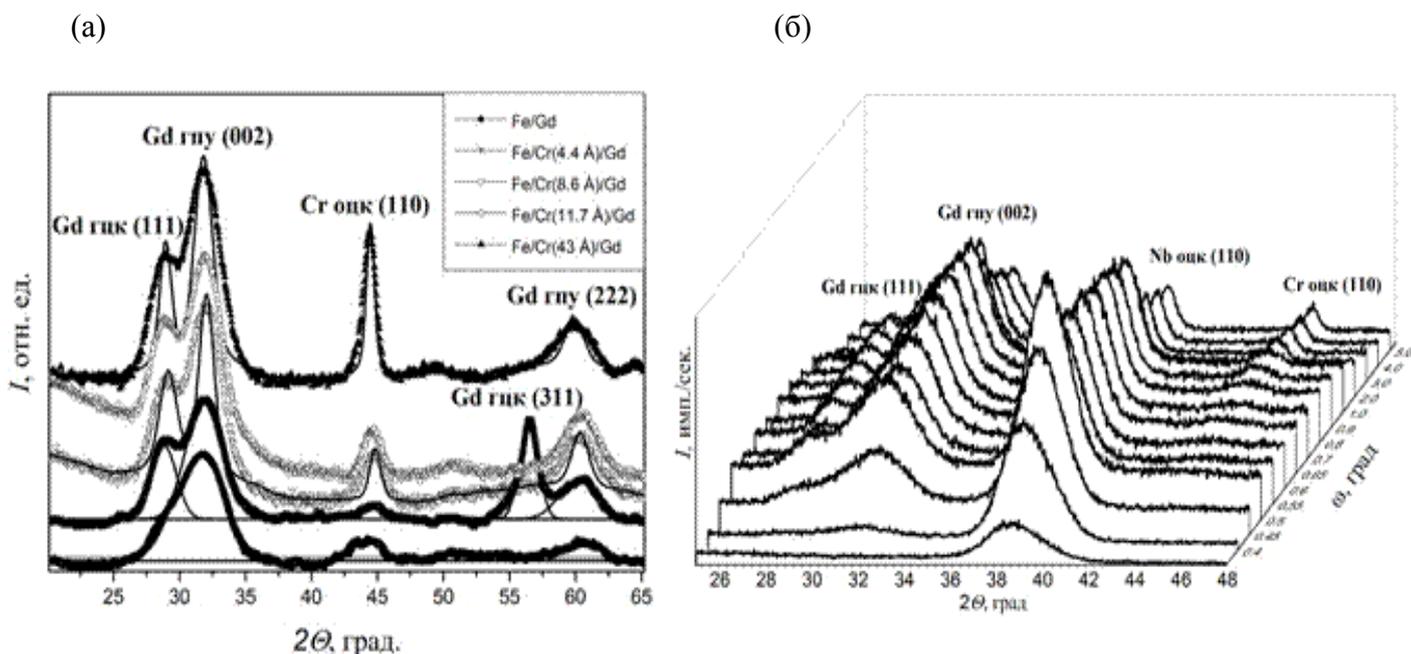


Рисунок 1. Спектры рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения от сверхрешеток (а) Fe/Gd, Fe/Cr(4.4 Å)/Gd, Fe/Cr (8.6 Å)/Gd , Fe/Cr (11.7 Å)/Gd и Fe/Cr (43 Å)/Gd, (б) от пленки Si//Cr (100 Å)/Gd (600 Å)/Nb (300 Å) при разных углах падения от 0.2° до 5°

Для того, чтобы понять влияние ГЦК фазы на магнитные свойства сверхрешёток Fe/Cr/Gd важно выяснить, каким образом ГЦК и ГПУ фазы распределены в слоях Gd в зависимости от глубины. Особенно, интересно выяснить какая фаза формируется вблизи межслойных границ Cr/Gd. Для выяснения данного вопроса нами был исследован дополнительный модельный образец Si//Cr(100 Å)/Gd(600 Å)/Nb (300 Å), выращенный при тех же условиях, что и сверхрешетки Fe/Cr/Gd. Такая конфигурация образца позволяет регулировать глубину проникновения пучка в образец и получать структурную информацию с разрешением по глубине, устанавливая угол падения рентгеновского пучка на образец. При малых углах падения рентгеновского пучка сначала будет получена информация о структуре Gd вблизи границы с Nb и далее, по мере увеличения угла, информация о структуре в глубине слоя и на интерфейсе с Cr. На Рисунке 1 (б) представлен скан рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения от трехслойной структуры Si//Cr (100 Å)/Gd (600 Å)/Nb (300 Å) в диапазоне углов падения ω от 0.2° до 5°, а также проиндексированы наблюдаемые рефлексы. Таким образом, можно оценить толщину слоя Gd, где сформирована ГЦК фаза. При угле падения 0.7° луч проходит через весь слой Gd и наблюдается пик Cr. Так как пики ГЦК (111) и ГПУ (002) появляются при одном угле падения, можно сделать вывод, что ГЦК и ГПУ фазы Gd формируются одновременно и распределены по всему объёму слоя.

В четвертой главе приводятся результаты исследования магнитной структуры интегральными методами, сделанные при помощи методами вибрационной – , СКВИД - магнитометрии и рентгеновским магнитным круговым дихроизмом (XMCD).

В первой части главы описаны измерения при комнатной температуре на вибрационном магнетометре и при низких температурах на SQUID – магнетометре. Всю серию образцов $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ можно разделить на две группы. Первая группа, которая характеризуется немонотонной зависимостью намагниченности от температуры, включает образцы с прослойкой хрома $t_{\text{Cr}} = 0 - 7.2 \text{ \AA}$ (Рисунок 2 (а)) Образцы второй группы (с прослойкой хрома $t_{\text{Cr}} = 8.6 - 60 \text{ \AA}$) характеризуются монотонно убывающей температурной зависимостью намагниченности (Рисунке 2 (б)). Температурные кривые для образцов первой группы (Рисунок 2 (а)) выходят на насыщение при температурах $T \geq 250 \text{ K}$. При понижении температуры намагниченность образцов уменьшается, что свидетельствует об увеличении намагниченности в слоях Gd, так как в данном диапазоне температур магнитный момент Fe остается постоянным. Намагниченность Fe направлена по полю, Gd – против поля. Наименьшее значение намагниченности соответствует температуре компенсации, при которой средние магнитные моменты подрешеток Fe и Gd компенсируют друг друга. При уменьшении температуры ниже температуры компенсации намагниченность увеличивается, причем магнитные моменты слоев Gd разворачиваются по полю, а Fe – против поля. Также на температурных кривых образцов $[\text{Fe}/\text{Cr}(5.8 \text{ \AA})/\text{Gd}/ \text{Cr}(5.8 \text{ \AA})]_{12}$ и $[\text{Fe}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})/\text{Gd}/ \text{Cr}(7.2 \text{ \AA})]_{12}$ имеются локальные максимумы. Их происхождение вызвано с образованием неколлинеарной магнитной структуры, в рамках которой увеличивается намагниченность.

Для образцов второй группы при $t_{\text{Cr}} > 8.6 \text{ \AA}$ (Рисунок 2 (б)) величина намагниченности с ростом температуры монотонно убывает, что свидетельствует об увеличении намагниченности в слоях Gd. Средние магнитные моменты слоёв Gd и Fe при этом ориентированы по направлению внешнего магнитного поля. Такое поведение свидетельствует о малости (или отсутствии) межслойного обменного взаимодействия и, как следствие, о ферромагнитном упорядочении магнитных моментов слоев Fe и Gd в приложенном магнитном поле. Величина намагниченности для образцов второй группы слабо меняется с увеличением толщины прослойки.

Анализ полученных в настоящей работе температурных и полевых зависимостей намагниченности для серии образцов Fe/Cr/Gd с различной толщиной прослойки хрома позволяет говорить о быстром уменьшении величины межслойного обменного взаимодействия с ростом толщины Cr.

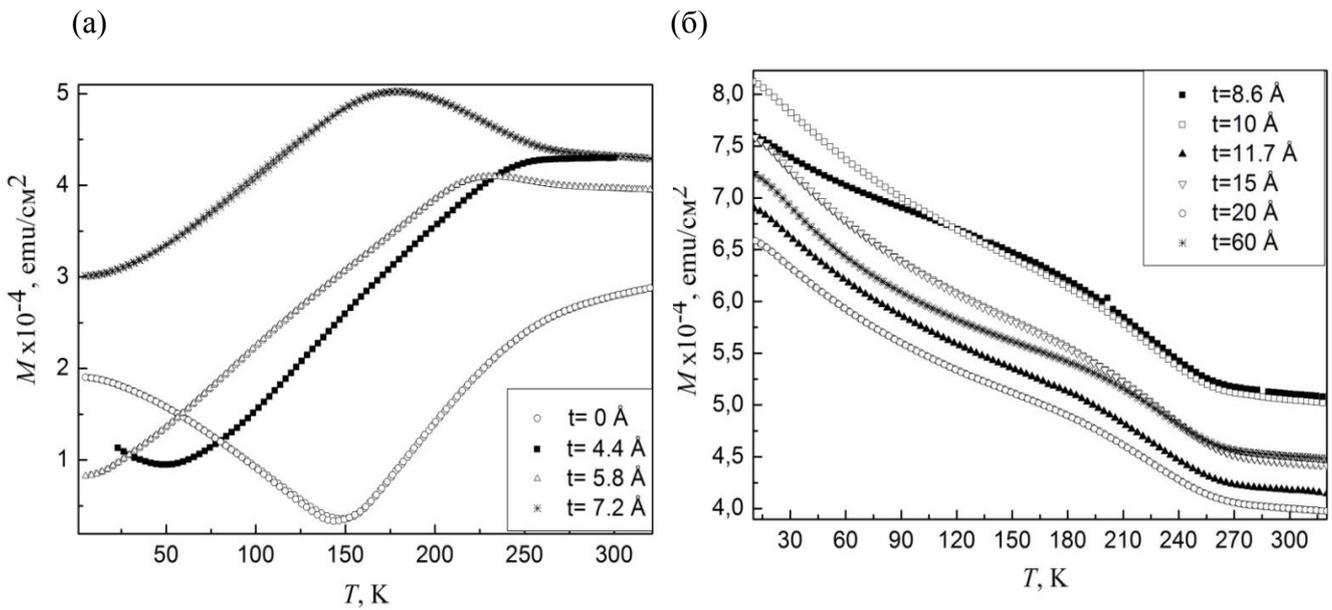


Рисунок 2. Зависимости намагниченности от температуры для образцов (а) Fe/Gd, Fe/Cr(4.4 Å)/Gd, Fe/Cr(5.8 Å)/Gd, Fe/Cr(7.2 Å)/Gd, и (б) Fe/Cr(8.6 Å)/Gd, Fe/Cr(10 Å)/Gd, Fe/Cr(11.7 Å)/Gd, Fe/Cr(15 Å)/Gd, Fe/Cr(20 Å)/Gd, Fe/Cr(60 Å)/Gd, измеренные в магнитном поле $H=500$ Э.

Элементно-чувствительные магнитные свойства сверхрешеток $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ были исследованы методом рентгеновского циркулярного магнитного дихроизма. Во второй части

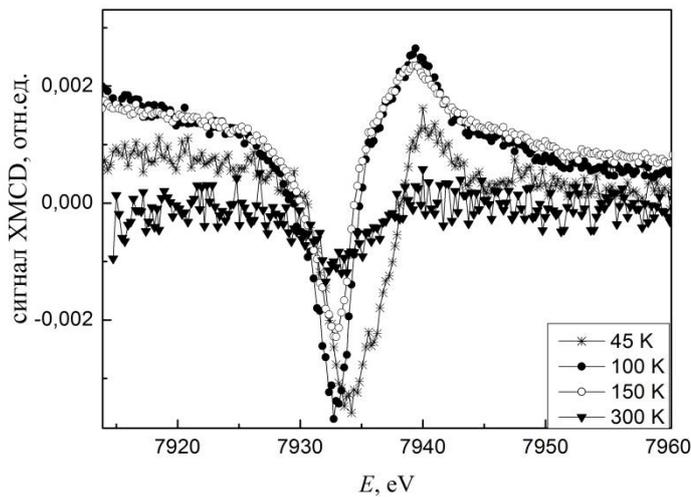


Рисунок 3. Спектры циркулярного магнитного дихроизма в области L_2 -края поглощения Gd для образца $[\text{Fe}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})]_{12}$, измеренные при температурах 45 К, 100 К, 150 К, 300 К в магнитном поле $H=500$ Э.

главы описаны XMCD измерения. В диссертационной работе приведены представлены спектры рентгеновского циркулярного магнитного дихроизма, полученные при сканировании энергии фотонов вблизи L_2 - края поглощения Gd ($E=7.93$ keV) для образца $[\text{Fe}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})]_{12}$, измеренные при температурах 10 К, 100 К, 150 и 300 К и для образца $[\text{Fe}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})]_{12}$ при температурах 45 К, 100 К, 150 и 300 К (Рисунок 3). Все спектры XMCD двух образцов были измерены во внешнем магнитном поле $H=500$ Э. Сигнал магнитного дихроизма Gd сильно зависит от температуры. Знак магнитного дихроизма не меняется и, следовательно, в

рассматриваемом образце нет ориентационного перехода. Единственная особенность - это наличие слабого магнитного сигнала при комнатной температуре, т.е. при температуре выше температуры Кюри объемного Gd (293 К).

Выполненные эксперименты показали, что гадолиний остается магнитным во всем диапазоне температур от 45 К до 300 К. С увеличением температуры средний магнитный момент Gd уменьшается. Данные, полученные разными интегральными методами, согласуются.

В пятой главе приведены результаты исследования распределения магнитных моментов в сверхрешетках Fe/Cr/Gd с разрешением по глубине методами РПН и РРМР.

В первой части главы рассматриваются структуры $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ с толщиной прослойки Cr меньше 8 Å. Были получены и обработаны рефлектометрические кривые сверхрешеток методами РПН и РРМР (таблица 1). Магнитное поле прикладывалось в плоскости образца. В ходе эксперимента РРМР измерялась разница коэффициентов отражения для фотонов с противоположными круговыми поляризациями при энергии фотонов в области L_2 - края поглощения ($E=7.94$ keV).

Магнитная структура Fe/Cr/Gd с антиферромагнитной прослойкой хрома с фактической толщиной 3.9 Å (около 3 монослоев Cr) (Рисунок 4) отличается от структуры Fe/Gd. В данном образце не формируется сплошной слой Cr.

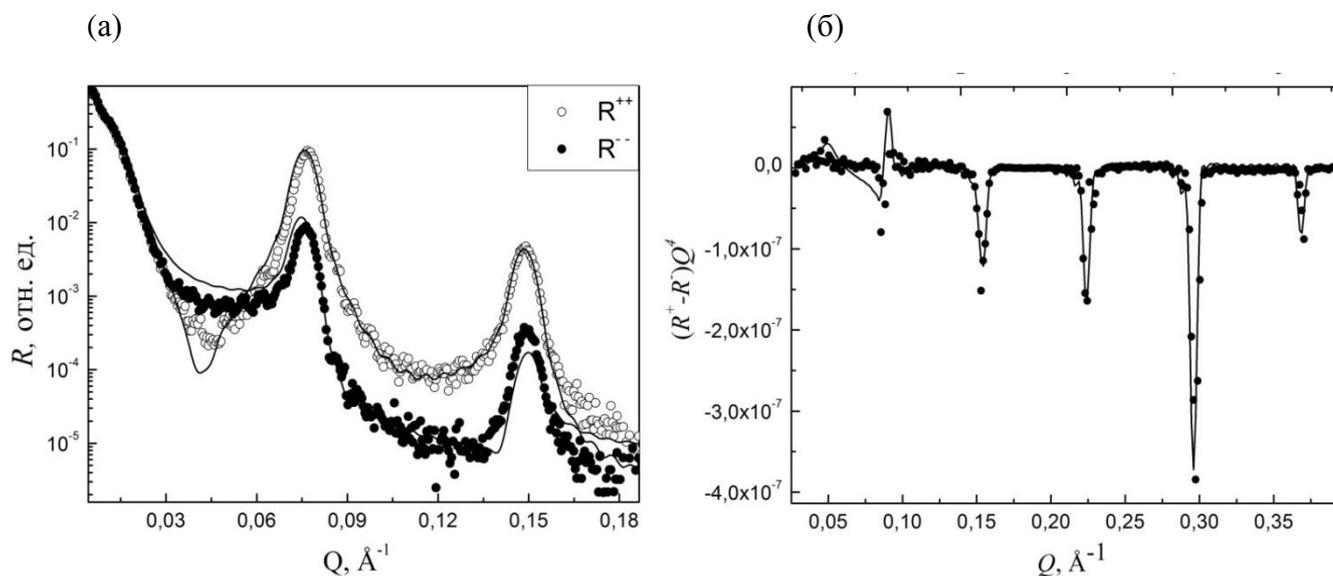


Рисунок 4. (а) Зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}) и против магнитного поля (R^{--}), от переданного импульса для структуры $[\text{Fe}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})]_{12}$ при значении напряженности магнитного поля $H = 500$ Э и температуре 15 К (экспериментальные значения – символ, расчетные значения – линия); (б) РРМР спектры сверхрешеток $[\text{Fe}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})]_{12}$, при $T=15$ К, $H=500$ Э.

Gd является хорошим поглотителем нейтронов, поэтому на кривых виден только край полного отражения при $Q \approx 0.005 \text{ \AA}^{-1}$ и два брэгговских пика при значениях $Q = 0.075 \text{ \AA}^{-1}$, 0.158 \AA^{-1} , соответственно. Экспериментальные зависимости $R^{++}_{\text{эксп}}(Q)$ и $R^{-}_{\text{эксп}}(Q)$ описывались расчетными кривыми $R^{++}_{\text{рас}}(Q)$ и $R^{-}_{\text{рас}}(Q)$. Анализ данных проведен при одновременной обработке спектров отражения поляризованных нейтронов и рентгеновских лучей, причем использовалась единая параметризация химического и элементарно – чувствительного профиля намагниченности в сверхрешетках. Для расчета каждый слой Gd разбивался на три подслоя, характеризующиеся плотностью длины рассеяния (реальная часть, мнимая и магнитная), магнитными моментами и скоростью изменения магнитного момента. Для описания распределения магнитного момента внутри слоев Gd, использовалась следующая параметризация [3]:

$$M(z) = M_0 + \frac{\sinh[|t-2z|/2\tau]}{\sinh[t/2\tau]} \times [(M_B - M_0)\eta(t - 2z) + (M_H - M_0)\eta(2z - t)], \quad (1)$$

где $\eta(x)$ – функция Хевисайда; t – толщина слоя; M_0 , M_B , M_H - значения магнитного момента в центральной, верхней и нижней части слоя. Параметр τ описывает скорость изменения величины магнитного момента внутри слоя.

Из обработки спектров был определен средний магнитный момент в подслое в расчете на атом. Было установлено, что средние магнитные моменты Gd в интерфейсных областях M_B , M_H при $T=15 \text{ К}$ равны $7 \mu_B/\text{атом}$, а в центральной части M_0 $4 \mu_B/\text{атом}$, при комнатной температуре $M_0=0 \mu_B/\text{атом}$, $M_B=M_H=3 \mu_B/\text{атом}$ (таблица 1). Значения магнитных моментов в сверхрешетке $[\text{Fe}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd}/ \text{Cr}(4.4 \text{ \AA})]_{12}$ близки к значениям магнитных моментов в $[\text{Fe}/\text{Gd}]_{12}$. Это можно объяснить прямым обменным взаимодействием Fe и Gd из-за наличия прорастания через слой Cr.

Таблица 1. Среднее значение магнитного момента подслоев Gd и угол между направлением магнитного момента подслоев Gd и внешним магнитным полем для образцов серии сверхрешеток Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr < 8.6 Å.

образец	температура, К	внешнее магнитное поле, кЭ	среднее значение магнитного момента подслоев Gd в расчете на атом, μ_B /атом			угол между направлением среднего магнитного момента подслоев и магнитным полем, градусы		
			M_B	M_O	M_H	θ_B	θ_O	θ_H
Fe/Gd	15	0.5	7	4	7	-	-	-
	300	0.5	3	0	3	-	-	-
Fe/Cr(4.4)/Gd	15	0.5	7	4	7	0	0	0
	300	0.5	1	0	1	0	0	0
	15	4.6	6	5	6	30	30	30
	150	4.6	6	5	6	10	10	10
Fe/Cr(5.8)/Gd	15	0.5	4.9	3	6	40	30	52
	15	1	6	4	6	15	15	15
Fe/Cr(7.2)/Gd	15	0.5	5	2	5	-	-	-
	150	0.5	1	0.7	1	-	-	-
	300	0.5	0.5	0	0.3	-	-	-
	15	1	6	2.5	6	20	20	20
	15	4	6	4.5	6	15	15	15

В отличие от образца Fe/Cr(4.4 Å)/Gd, в образцах с прослойками Cr $t_{Cr}=5.8$ Å и $t_{Cr}=7.2$ Å формируется сплошной слой Cr, поэтому рассмотрим их отдельно. Для гетероструктуры [Fe/Cr(7.2 Å)/Gd/Cr(7.2 Å)]₁₂ была определена толщинная зависимость относительной величины магнитного момента слоев Fe, Cr и Gd описываемая формулой (1). Данная зависимость приведена на Рисунке 5 (а). Главное отличие от поведения магнитных моментов Fe и Gd в данной структуре от [Fe/Gd]₁₂ и [Fe/Cr(4.4 Å)/Gd/Cr(4.4 Å)]₁₂ – это уменьшение магнитного момента Gd в интерфейсных подслоях на 28 %, центральном подслое на 50 %.

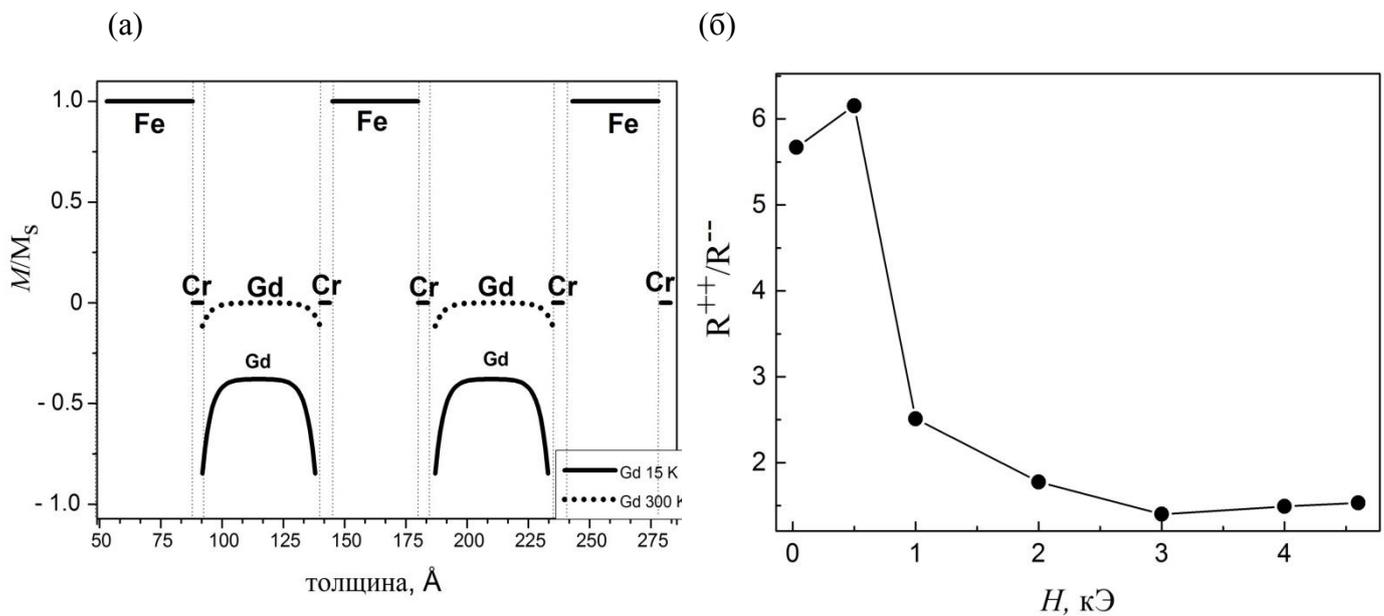


Рисунок 5. (а) Зависимость относительной величины магнитного момента Fe, Cr и Gd в гетероструктуре $[\text{Fe}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})]_{12}$ от толщины прослойки Cr при $H=500 \text{ Э}$ и $T=15$ и 300 K . (б) Зависимость отношения интегральных значений коэффициентов отражения R^{++}/R^{--} первых брэгговских пиков от внешнего магнитного поля для структуры $[\text{Fe}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})/\text{Gd}/\text{Cr}(7.2 \text{ \AA})]_{12}$ при температуре 15 K .

Согласно данным из Рисунка 5 (а) справедливы следующие оценки толщин подслоев: толщина каждого интерфейсного подслоя $\sim 8 - 10 \text{ \AA}$, центрального подслоя $\sim 30 - 34 \text{ \AA}$. Что согласуется с [2], где авторы оценили толщину возникающего магнитного слоя в 2 - 4 атомных монослоя Gd ($\sim 10 - 23 \text{ \AA}$).

Для исследования зависимости распределения магнитных моментов от внешнего магнитного поля, были измерены коэффициенты отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}), против магнитного поля (R^{--}) во внешних магнитных полях 30 Э, 1 кЭ, 2 кЭ, 3кЭ, 4 кЭ при $T=15 \text{ K}$. На Рисунке 5 (б) представлена зависимость отношения интегральных значений коэффициентов отражения нейтронов R^{++}/R^{--} от внешнего магнитного поля. Из приведенных данных видно, что с увеличением внешнего магнитного поля разница по высоте между пиками R^{++} и R^{--} уменьшается, что говорит об увеличении среднего магнитного момента гадолия. Из этого следует, что величины внешнего магнитного поля 1 кЭ достаточно, чтобы развернуть магнитные моменты слоев Gd по направлению внешнего магнитного поля в системе $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$. И при толщине прослойки Cr 7.2 \AA наблюдается максимальная намагниченность в системе $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$.

Из полученных результатов для образцов Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr $t < 8 \text{ \AA}$ можно выделить следующие моменты:

- во всех образцах в слоях Gd средний магнитный момент меньше чем в Fe/Gd и объемном Gd;

- в интерфейсных подслоях средний магнитный момент Gd больше, чем центральном подслое;

- при $T=300$ К наблюдается эффект близости, проявляющийся в возникновении индуцированного магнитного момента в интерфейсных подслоях Gd;

- магнитный момент в слоях железа в диапазоне температур 15 – 300 К остается постоянным и равен 2.1 μ_B ;

- в магнитных полях не менее 1 кЭ при температурах сильно ниже температуры Кюри объемного Gd в сверх решетках Fe/Cr/Gd с толщинами Cr 5 - 8 Å магнитные моменты слоев Fe и Gd упорядочиваются ферромагнитно.

Во второй части главы описано исследование структур $[Fe/Cr/Gd/Cr]_{12}$ с толщиной прослойки Cr более 8 Å. В серии сверх решеток с прослойкой Cr $t_{Cr} > 8$ Å нами были исследованы три образца: $[Fe/Cr (10 \text{ Å})/Gd/Cr (10 \text{ Å})]_{12}$, $[Fe/Cr (11.7 \text{ Å})/Gd/Cr (11.7 \text{ Å})]_{12}$, $[Fe/Cr (20 \text{ Å})/Gd/Cr (20 \text{ Å})]_{12}$. Эксперименты методом рефлектометрии поляризованных нейтронов проводились при двух температурах (15 К и 300 К) во внешнем магнитном поле 500 Э при одинаковых условиях.

Таблица 2. Среднее значение магнитного момента подслоев Gd и угол между направлением магнитного момента подслоев Gd и внешним магнитным полем для образцов серии сверх решеток Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr > 8.6 Å в магнитном поле 500 Э.

образец	температура, К	среднее значение магнитного момента подслоев Gd в расчете на атом, μ_B /атом			угол между направлением среднего магнитного момента подслоев Gd и магнитным полем, градусы		
		M_B	M_0	M_H	θ_B	θ_0	θ_H
$t_{Cr}=10 \text{ Å}$	15	3.3	3	3.3	20	20	20
	300	1	0	1	0	0	0
$t_{Cr}=11.7 \text{ Å}$	15	3	2	3	-	-	-
	300	0	0		-	-	-
$t_{Cr}=20 \text{ Å}$	15	1.6	0.4	1.4	-	-	-
	300	0	0	0	-	-	-

Из анализа РПН спектров для структур Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr больше 8 Å следует, что магнитные моменты внутри слоев Gd распределены неоднородно и среднее значение магнитного момента слоя при низких температурах существенно ниже относительно значений для объемного Gd и Fe/Gd. При данных толщинах Cr (кроме $t_{Cr}=10$ Å) магнитные моменты Fe и Gd упорядочены ферромагнитно вдоль направления внешнего магнитного поля и значения магнитных моментов меньше, чем в структурах с $t_{Cr} < 8$ Å. При толщине прослойки Cr больше 10 Å при комнатной $T=300$ К в интерфейсных подслоях слоя Gd магнитный момент равен 0 μ_B .

На Рисунках 6 (а) и 6 (б) приведены зависимости среднего значения магнитного момента в слое Gd от толщины прослойки Cr. Из графиков видно, что в интерфейсных областях магнитный момент с увеличением толщины уменьшается монотонно (Рисунок 6 (а)), а в центральной части (Рисунок 6 (б)) наблюдается осциллирующая зависимость.

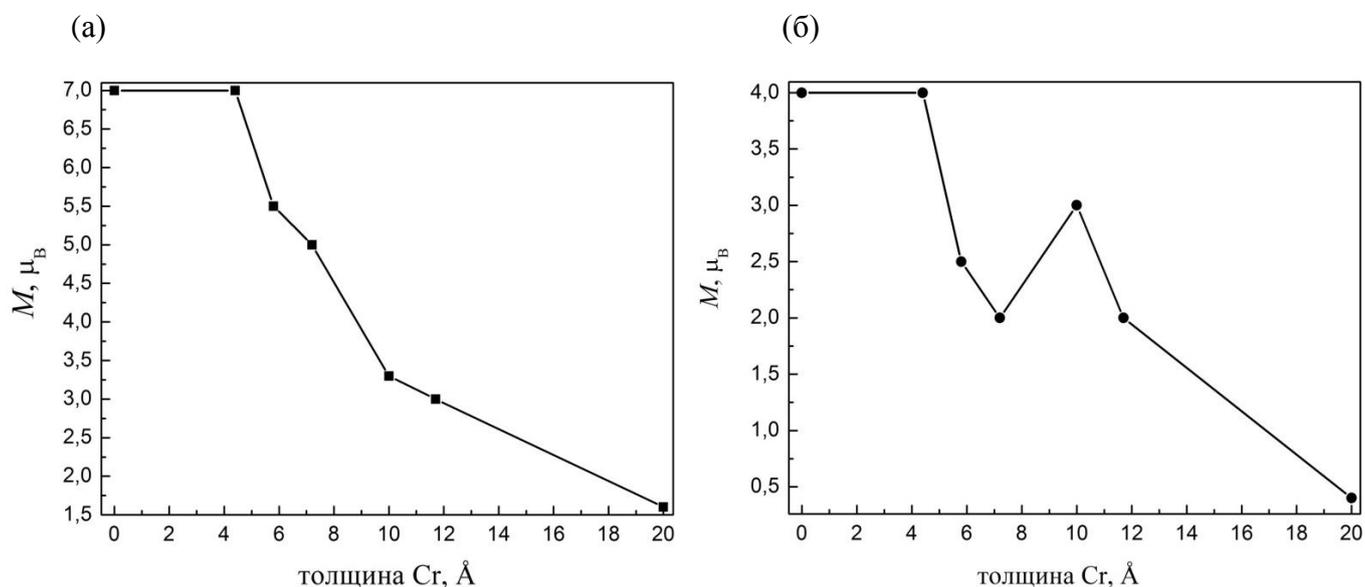


Рисунок 6. Зависимость значения магнитного момента Gd (а) в интерфейсных подслоях и (б) в центральном подслое от толщины прослойки Cr при $T=15$ К и $H=500$ Э.

В третьей части 5 главы приведено обсуждение полученных результатов. Во всех исследованных образцах методами РПН и РРМР нами было обнаружено неоднородное распределение намагниченности в слоях Gd, а именно образование индуцированного магнитного момента вблизи интерфейсной области, толщиной в 10 Å. Как было сказано выше, обменное взаимодействие на границе между слоями Fe/Gd имеет большую величину, сравнимую с обменом внутри слоёв Gd. Неоднородное распределение магнитного момента в слоях Gd в зависимости от толщины обусловлена обменным взаимодействием Fe и Gd через прослойку Cr. Данный эффект наблюдается как в сверхрешётках Fe/Gd, так и в

$[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ с $t_{\text{Cr}} < 8.6 \text{ \AA}$. Наши результаты по $[\text{Fe}/\text{Gd}]_{\text{N}}$ согласуются с результатами следующих работ [2, 3, 6, 7, 8]. Авторы обнаружили, что образуется пространственная неоднородность неколлинеарной фазы, в которой угол между локальной намагниченностью и внешним полем уменьшается от границы раздела к центру слоев [3, 9, 11, 12]. Как следует из нашего исследования и работы [13], введение прослойки Cr толщиной более 4 \AA между слоями ПМ и Gd приводит к существенному уменьшению межслойного обменного взаимодействия. В структурах $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ с толщиной прослойки Cr более 10 \AA межслойное обменное взаимодействие отсутствует и наблюдается более однородное распределение магнитного момента слоев Gd, но из-за несовершенства межслойных границ интерфейсные подслои Gd имеют магнитных характеристики, отличающиеся от внутренних областей.

Нами установлено уменьшение магнитного момента в слоях Gd относительно значения объёмного Gd методами РПН, РРМР, что подтверждают также данные методов СКВИД - и вибрационной - магнитометрии. Этот результат согласуется с данными работ по исследованию Gd/Cr/FeCo [14] и пленки Gd [15]. С помощью СКВИД - измерений, авторами этих работ было обнаружено значительное уменьшение намагниченности насыщения Gd по сравнению с объемным Gd. Высказано предположение, что причиной уменьшения намагниченности могут быть структурные особенности системы, например, образование немагнитной ГЦК фазы.

Уменьшение магнитного момента Gd может быть объяснено разными эффектами: несовершенством межслойных границ, интердиффузией, структурными изменениями в слоях Gd.

По данным рентгеновской рефлектометрии в сверхрешётках $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ формируется слоистая структура с резкими межслойными границами. Формируются сплошные слои (кроме образца $\text{Fe}/\text{Cr}(4.4 \text{ \AA})/\text{Gd}$), что исключает интердиффузию и прорастания через слой Cr. Таким образом, мы исключаем влияние несовершенства межслойных границ и интердиффузии на формирование магнитных свойств Gd.

Методом рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения нами была исследована кристаллическая структура слоев Gd. Установлено, что формируется ГЦК фаза в слоях Gd как вблизи межслойных границ так и, по мере продвижения вглубь слоя. Данный результат согласуется с работами [16, 17, 14], который наблюдался в пленках Gd и Gd/Cr/FeCo. Поскольку намагниченность ГЦК фазы в несколько раз меньше намагниченности ГПУ Gd [14,15], то это может объяснять значительное уменьшение суммарной намагниченности в слоях Gd. Нами установлено, что в сверхрешётках $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ ГЦК фаза формируется однородно по всей толщине слоя. Таким образом, не

подтверждаются результаты работы [16], в которой авторы предположили, что Gd сначала начинает формироваться в ГЦК фазу на границе раздела с промежуточным слоем, затем РЗМ переходит в ГПУ фазу с дальнейшей кристаллизацией. Также не подтвердились результаты об ОЦК фазе Gd [18], в которой авторы описали образование ОЦК фазы Gd в пленке Ta/Gd/Ta при разных температурах осаждения. Мы полагаем, что в [18] были неправильно индексированы рефлексы на дифрактограмме. А в работе [5] указана только чистая ГПУ фаза Gd в гетероструктуре Fe/Cr/Gd(200 Å), хотя на дифрактограмме изображен неопознанный брэгговский пик при $2\theta=29.4^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе были проведены систематические исследования структурных и магнитных свойств серии сверхрешёток Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(t, Å)/Gd(50 Å)/Cr(t, Å)]₁₂/Cr(30 Å) с толщиной слоёв Cr от 0 до 60 Å.

В ходе работы были поставлены и выполнены следующие задачи:

1. Изучены свойства межслойных границ сверхрешёток и определена внутрислойная кристаллическая структура в зависимости от толщины прослойки Cr. На основании анализа рефлектометрических данных, мы исключаем существенное влияние несовершенства межслойных границ и интердиффузии на формирование магнитных свойств Gd. Обнаружено, что введение прослойки Cr между слоями Gd и Fe приводит к структурным изменениям в слоях Gd: в дополнение к основной ГПУ фазе Gd формируется ГЦК фаза Gd, обладающая меньшим магнитным моментом. Обе кристаллические фазы равномерно распределены по всему объёму слоя Gd.

2. Экспериментально определено распределение магнитных моментов слоев Fe, Cr и Gd сверхрешёток [Fe/Cr/Gd/Cr]₁₂ (толщина Cr варьировалась от 0 до 60 Å) с разрешением по глубине. Получены численные значения средних магнитных моментов слоев Fe и Gd и значение угла между направлением магнитных моментов и внешним магнитным полем. В диапазоне температур 15 – 300 К наблюдается уменьшение среднего магнитного момента слоя Gd по сравнению с объёмным Gd и Fe/Gd. Обнаружено, что в магнитных полях около 1 кЭ при температурах сильно ниже температуры Кюри объёмного Gd в сверхрешётках [Fe/Cr/Gd/Cr]₁₂ с толщинами Cr 5 - 8 Å магнитные моменты слоев Fe и Gd упорядочиваются ферромагнитно.

3. Сделан анализ полученных результатов и установлена корреляция между кристаллической решеткой и магнитными свойствами сверхрешёток [Fe/Cr/Gd/Cr]₁₂ с разной толщиной прослойки Cr. Согласно анализу полученных в настоящей работе температурных

и полевых зависимостей намагниченности для серии образцов $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ интенсивность межслойного обменного взаимодействия убывает с ростом толщины прослойки Cr, а с толщиной прослойки Cr более 10 Å межслойное обменное взаимодействие отсутствует. Доказано, что ГЦК фаза Gd является причиной уменьшения среднего магнитного момента слоя Gd.

4. Выявлена роль эффектов близости в формировании магнитных свойств. При температурах от 15 К до 300 К в сверхрешётках $[\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Gd}/\text{Cr}]_{12}$ наблюдается эффект близости, проявляющийся в возникновении индуцированного магнитного момента в интерфейсных подслоях Gd толщиной около 10 Å.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных работах: в 3 статьях в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК:

1. Применение поляризационной нейтронной рефлектометрии для исследования сверхрешёток Fe/Cr/Gd / М.В. Рябухина, Е.А. Кравцов, Д.В. Благодатков, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов, Ю. Хайдуков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. - № 10. - с. 26-29.
2. Магнетизм сверхрешёток Fe/Cr/Gd / М.В. Рябухина, Е.А. Кравцов, Д.В. Благодатков, Л.И. Наумова, Ю.В. Никитенко, В.В. Проглядо, Ю. Хайдуков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. - № 1. - с. 1-3.
3. Межслойное взаимодействие в многослойных структурах Fe/Cr/Gd / А.Б. Дровосек, Н. М. Крейнс, А. О. Савицкий, Е.А. Кравцов, Д.В. Благодатков, М.В. Рябухина, М.А. Миляев, В.В. Устинов, Э.М. Пашаев, И.А. Субботин, Г.В. Пруцков // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. - Т. 147, № 6.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Heinrich B., Bland J.A.C. (Eds.) Ultrathin Magnetic Structures V. I – IV / Heinrich B., Bland J.A.C. - Berlin: Springer, 2005.
2. Enhanced interfacial magnetic coupling of Gd/Fe multilayers / D. Haskel, G. Srajer, J.C. Lang, J. Pollmann, C.S. Nelson, J.S. Jiang and S.D. Bader // Phys. Rev. Lett. – 2001. – V.87, N.20. – 207201.
3. Complementary polarized neutron and resonant x-ray magnetic reflectometry measurements in Fe/Gd heterostructures: Case of inhomogeneous intralayer magnetic structure / E. Kravtsov, D. Haskel, S. G. E. te Velthuis, J. S. Jiang, and B. J. Kirby // Phys. Rev. B – 2009. – V.79 – 134438.

4. Forcing ferromagnetic coupling between rare-earth-metal and 3d ferromagnetic films / B. Sanyal, C. Antoniak, T. Burkert, B. Krumme, A. Warland, F. Stromberg, C. Praetorius, K. Fauth, H. Wende, O. Eriksson // PRL. – 2010. - 104, 156402.
5. Textured growth of the high moment material Gd(0 0 0 1)/Cr(0 0 1)/Fe(0 0 1) / F. Stromberg, C. Antoniak, U. von Horsten, W. Keune, B. Sanyal, O. Eriksson and H. Wende // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2011. - Vol. 44. - P. 265004.
6. Magnetic superlattices / J. Kwo, M. Hong, D. B. McWhan, Y. Yafet, R. M. Fleming, F. J. DiSalvo, J. V. Waszczak, C. F. Majkrzak, D. Gibbs, A. I. Goldman, P. Boni, J. Bohr, H. Grimm, C. L. Chien, and J. W. Cable // J. Phys. – 1988. – V. 8, N. 49. – P.1651.
7. Twisted magnetization states near the compensation temperature of Fe/Gd multilayers: Anisotropy and surface-termination effects / Y. Choi, D. Haskel, A. Cady, J.C. Lang, D.R. Lee, G. Srajer, J.S. Jiang, Bader S.D. // Phys. Rev. B – 2006. – V. 73. – P. 17440.
8. Hard x-ray magnetic circular dichroism study of a surface-driven twisted state in Gd/Fe multilayers / D. Haskel, Y. Choi, D.R. Lee, J.C. Lang, G. Srajer, J.S. Jiang, S.D. Bader // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 93, N. 10. – P. 6507–6509.
9. Nature of inhomogeneous state in artificial Fe/Gd ferromagnetic multilayers / D. Haskel, G. Srajer, Y. Choi, D.R. Lee, J.C. Lang, J. Meersschat, J.S. Jiang, S.D. Bader // Phys. Rev. B. – 2003. – V.67, N. 180406.
10. Кравцов, Е.А. Комплементарное применение нейтронного и рентгеновского синхротронного рассеяния для определения магнитной микроструктуры обменно-связанных слоистых наногетероструктур / Е.А. Кравцов, В.В. Устинов // Физика твердого тела. – 2010. – Т.52, N.11. – С.2116 – 2119.
11. Charge-magnetic interference resonant scattering studies of ferromagnetic crystals and thin films / D. Haskel, E. Kravtsov, Y. Choi, J.C. Lang, Z. Islam, G. Strajer, J.S. Jiang, S.D. Bader, P.C. Canfield // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2012. – V.208. – P.141 – 155.
12. Ishimatsu, N. Magnetic structure of Fe/Gd multilayers determined by resonant x-ray magnetic scattering / N. Ishimatsu, H. Hashizume // PRB. – 1991. – V.60, N.13. – P. 9596 – 9606.
13. Suciú, G. 4f – 3d exchange coupling in Gd/X/Co (X=Pt, Cr) multilayers / G. Suciú, J. C. Toussaint, J. Voiron // J. Magn. Magn. Mater. – 2002. – V. 240. – P.229 – 231.
14. Realizing a high magnetic moment in Gd/Cr/FeCo: The role of the rare earth / C. Ward, G. Scheunert, W.R. Hendren, R. Hardeman, M.A. Gubbins, R.M. Bowman // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V. 102, N. 092403.
15. Ferromagnetic properties of fcc Gd thin films/ T.P Bertelli, E.C. Passamani, C. Larica, V.P. Nascimento, A.Y. Takeuchi // J. Appl. Phys. – 2015. – V.117. – 203904.

16. Influence of strain and polycrystalline ordering on magnetic properties of high moment rare earth metals and alloys / G. Scheunert, C. Ward, W.R. Hendren, A.A. Lapicki, R. Hardeman, M.Mooney, M.A. Gubbins, R.M. Bowman // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2014. – V. 47,N. 415005.
17. Magnetization of 2.6T in gadolinium thin films / G. Scheunert, W. R. Hendren, C. Ward, and R. M. Bowman // App. Phys. Lett. – 2012. – V. 101, N. 142407.
18. Effects of preparation conditions on the magnetocaloric properties of Gd thin films / H.F. Kirby, D.D. Belyea, J.T. Willman, C.W. Miller // J. Vac. Sci. Technol. A. - 2013. - V. 31. - P. 031506.