

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

На правах рукописи
УДК 537.621.5: 537.622

КРАШЕНИННИКОВ Алексей Петрович

**СПИНОВЫЙ И ОРБИТАЛЬНЫЙ МАГНЕТИЗМ В
МАГНИТНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ НА ОСНОВЕ Fe**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2007

Работа выполнена на кафедре общей физики и магнитоупорядоченных сред физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, профессор П. Н. Стеценко
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор В. Н. Прудников доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Н. М. Крейнес
Ведущая организация	Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова (ИОФАН или ИОФ РАН), г. Москва

Защита состоится “24” мая 2007 года в 19-00 часов на заседании диссертационного совета К 501.001.02 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЮФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан “24” апреля 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 501.001.02,
кандидат физико-математических наук

И. А. Никанорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Проблема изучения различных гетероструктур и объектов пониженной размерности уже около сорока лет является одной из наиболее интересных и важных для фундаментальной науки и приложений. Гетеросистемы позволяют изучать взаимовлияние различных элементов и соединений, эффекты, связанные с переносом заряда и спиновой поляризации через различного рода материалы, а в конечном итоге — получать новые, так называемые «функциональные материалы» и «метаматериалы» с абсолютно новыми свойствами. В низкоразмерных системах становится возможным обнаружение и предсказание новых эффектов, связанных с доминирующей ролью поверхностных энергетических факторов в поведении исследуемой системы.

Уникальные свойства магнитных многослойных гетероструктур позволяют на их основе создавать высокочувствительные датчики магнитных полей на основе эффекта гигантского магнитосопротивления, среды для различных видов магнитной записи информации, а также различные специальные покрытия, обладающие уникальными свойствами в переменных электромагнитных полях.

Синтез и исследование новых магнитных материалов является одной из основных задач современной физики магнитных явлений. Магнитные материалы на основе бислоев, сэндвичей и мультислоев (сверхрешеток) нашли широкий спектр применений в современной электронной промышленности благодаря таким свойствам, как возможность записи и неразрушающего считывания информации за счет анизотропии обменного взаимодействия, детектирования слабых магнитных полей и их изменений с использованием эффекта гигантского магнитосопротивления и т. д.

Системы на основе слоистых наноструктур позволяют исследовать такие фундаментальные проблемы физики магнитных явлений, как природа обменного взаимодействия между магнитными слоями через немагнитные (проводящие, полупроводниковые или непроводящие) разделительные слои, различные вопросы экспериментальной проверки предсказаний о магнитных свойствах систем пониженной размерности, изучать принципы формирования обменной анизотропии, магнитных моментов и других ключевых характеристик магнитных материалов. Все это становится

возможным благодаря обнаружению таких эффектов как осциллирующий характер величины межслойного обменного взаимодействия, приводящий к осцилляциям основных магнитных параметров в зависимости от толщины немагнитных и, в некоторых случаях, также магнитных слоев; обменное смещение петель гистерезиса в образцах, полученных при росте или охлаждении в магнитном поле, содержащих антиферромагнитные компоненты.

Особый интерес вызывают вопросы участия орбитальных моментов электронов проводимости и атомных оболочек в формировании магнитных свойств слоистых магнитных наноматериалов связи с недавно обнаруженными эффектами гигантской магнитной восприимчивости примесей 3d-переходных металлов в щелочных матрицах и немагнитных пленок золота с нанесенным тиоловым покрытием (характеристическая тиоловая группа содержит немагнитные элементы серу и водород: $-SH$), гигантского магнитосопротивления в ультратонких пленках немагнитного бериллия и гигантской анизотропии магнитосопротивления в таких пленках.

Цель работы

Диссертационная работа посвящена синтезу и комплексному изучению наноразмерных слоистых гетеросистем на основе Fe с немагнитными прослойками Ag и Be с переменными толщинами ферромагнитной и немагнитной компонент, а также выяснению характера влияния орбитальных магнитных моментов на основные магнитные свойства данных материалов.

Для этого в работе методом катодного распыления в разряде с осциллирующими электронами (типа Пеннинга) на подложки из оптического покровного стекла и мусковита (слюды) осуществлен синтез систем магнитных сверхрешеток Fe/Be с переменной толщиной слоев Fe: $[Fe(7-19\text{\AA})/Be(8\text{\AA})]$, Fe/Be с переменной толщиной слоев Be: $[Fe(10\text{\AA})/Be(4-25\text{\AA})]$, $[Fe(5\text{\AA})/Be(5-20\text{\AA})]$ и систем Fe/Ag с переменной толщиной слоев Fe: $[Fe(10\text{\AA})/Ag(7-22\text{\AA})]$ и Fe/Ag с переменной толщиной слоев Ag: $[Fe(8-22\text{\AA})/Ag(7\text{\AA})]$. Число периодов сверхрешеток изменялось от 70 до 150.

Полученные образцы изучались с применением методов рентгенодифракционного анализа, вибрационной магнитометрии, а также мессбауэровской спектроскопии. Исследованы температурные зависимости намагниченности в магнитном поле в широком диапазоне температур. Получены результаты независимого исследования спектров ферромагнитного резонанса в нескольких образцах MCP Fe/Be.

Основные положения, выносимые на защиту

Методом катодного распыления на стекло и слюду в разряде с осциллирующими электронами получены магнитные сверхрешетки систем Fe/Be и Fe/Ag, образующие несколько серий с переменной толщиной одной из компонент (магнитной или немагнитной) при постоянной толщине слоев второй компоненты: $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Be}(t_{\text{Be}})]$, $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Ag}(t_{\text{Ag}})]$, $[\text{Fe}(t_{\text{Fe}})/\text{Be}(8\text{\AA})]$, $[\text{Fe}(t_{\text{Fe}})/\text{Ag}(7\text{\AA})]$ и $[\text{Fe}(5\text{\AA})/\text{Be}(t_{\text{Be}})]$. Магнитные сверхрешетки Fe/Be получены и исследованы диссертантом впервые.

1. Магнитные сверхрешетки Fe/Be и Fe/Ag имеют слабо текстурированную структуру слоев Fe в направлении (011) с характерными размерами областей когерентного рассеяния 40-90 Å в МСР Fe/Be и сосуществованием структур ОЦК и ГЦК в МСР Fe/Ag.
2. Обнаружена зависимость формы петель магнитного гистерезиса, спонтанной намагниченности, коэрцитивной силы и других параметров от соотношения толщин Fe и немагнитных компонент МСР.
3. Установлено наличие в исследованном интервале толщин осциллирующих зависимостей спонтанной намагниченности МСР Fe/Be от толщины слоев Be ($\Lambda=6-8\text{\AA}$) и спонтанной намагниченности МСР Fe/Ag от толщины слоев Ag ($\Lambda=6$ и $\Lambda=8\text{\AA}$), обусловленных знакопеременным поведением интегралов обменного взаимодействия между слоями Fe, а также осциллирующей зависимости спонтанной намагниченности МСР Fe/Ag от толщины Fe, обусловленной интерференционными эффектами электронного транспорта через межслойные границы.
4. Установлено значительное влияние орбитальных эффектов на магнитные свойства МСР Fe/Be и Fe/Ag, проявляющееся в частности, в наличии гигантских магнитных моментов в ряде МСР Fe/Be, малых величинах сверхтонких магнитных полей на ядрах ^{57}Fe в МСР Fe/Be и Fe/Ag, обладающих спонтанной намагниченностью более, чем в полтора раза превышающей таковую для массивного Fe, а также в больших средних значениях g-фактора для МСР Fe/Be по данным ФМР-спектроскопии.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется, во-первых, тем, что в ней впервые получены и исследованы серии магнитных сверхрешеток Fe/Be, а

также получены и исследованы серии сверхрешеток Fe/Ag с переменными толщинами Fe, Be и Ag соответственно; во-вторых, предложен и реализован метод поиска начальных параметров для аппроксимации спектров поглощения гамма-излучения без отдачи и разработана спектральная модель, представляющая МСР в опытах по изучению спектров эффекта Мёссбауэра; в-третьих, измерены экспериментально гигантские значения спонтанной намагниченности в некоторых сверхрешетках Fe/Be, а также превышающие спонтанную намагниченность чистого массивного железа значения спонтанной намагниченности в некоторых сверхрешетках Fe/Ag; в-четвертых, показано, что наблюдаемые величины магнитных моментов и величины сверхтонких магнитных полей на ядрах ^{57}Fe могут быть обусловлены возрастанием орбитальных вкладов в магнитные моменты ионов Fe.

Научная и практическая значимость

Ценность полученной совокупности экспериментальных результатов определяется тем, что впервые получен совершенно новый перспективный класс материалов, свойства которого позволяют предлагать его модификации для использования в устройствах записи информации и детектирования слабых магнитных полей. Результаты работы могут использоваться для получения и дальнейшего исследования магнитных сверхрешеток с уникальными магнитными свойствами. Показана перспективность исследования нано- и низкоразмерных систем на основе Fe/Be наряду с другими широко исследуемыми системами.

Разработанная в рамках настоящей диссертационной работы программа обработки мессбауэровских спектроскопических данных, может использоваться в исследованиях как магнитных сверхрешеток, так и при изучении локальных магнитных состояний в аморфных или кристаллических сплавах.

Апробация работы

Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: Международной конференции по спиновой электронике (и гировекторной динамике) в 2002, 2003, и 2004 годах; Московском международном симпозиуме по магнетизму в 2002 и 2005 годах; VIII Международной конференции «Мессбауэровская спектроскопия и ее применения» в 2002 году; Международной школе-семинаре «Новые магнитные материалы микроэлектроники» в 2004 и 2006 годах;

II Международной конференции-школе по полупроводниковой спинтронике и квантово-информационной технологии SpinTech II в 2003 году; Международной конференции по функциональным материалам ICFM в 2003 году; Международном симпозиуме по магнитным материалам и их применениям (зимней конференции Корейского магнитного общества) SOMMA/KMS в 2003 году, а также конференциях «Ломоносовские чтения» и «Ломоносов» в 2005 году.

Всего по результатам работы над методикой синтеза и исследования магнитных сверхрешеток и обработки спектров эффекта Мессбауэра автором в соавторстве представлено 18 (восемнадцать) докладов на всероссийских и международных конференциях. Материалы диссертации также неоднократно представлялись на обсуждение кафедры общей физики и магнитоупорядоченных сред.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации автором опубликовано 4 (четыре) статьи в рецензируемых научных журналах: JMMM — две статьи, Phys. Stat. Sol. (b) — одна статья, и «Исследовано в России» — одна статья. Кроме того, 3 (три) статьи опубликовано в рецензируемых сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Полный список опубликованных автором в соавторстве с коллективом лаборатории и другими коллегами статей и тезисов докладов на конференциях приведен в конце автореферата.

Личный вклад диссертанта

Выбор направления исследований, обсуждение результатов и формулировка задач проводились совместно с научным руководителем профессором П. Н. Стеценко и сотрудниками лаборатории доцентом С. Д. Антиповым, с.н.с. Г. Е. Горюновым и д.т.н. Г. В. Смирницкой. Диссертант принимал участие в подготовке экспериментов по напылению образцов магнитных сверхрешеток, проводившихся д.т.н. Г. В. Смирницкой и О. В. Скабицкой, лично проводил измерения кривых намагничивания и температурных зависимостей намагниченности и обрабатывал данные всех измерений: рентгеновской дифрактометрии, полученные с.н.с. Г. Е. Горюновым, и мессбауэровской спектроскопии, полученные доцентом С. Д. Антиповым. Обработка данных ФМР-спектроскопии, полученных в лаборатории доцента Н. Е. Сырьева и с.н.с. Е. В. Лебедевой, проводилась совместно с доцентом С. Д. Антиповым. Диссертантом написаны программы

для обработки данных магнитных измерений и программа обработки мессбауэровских спектров, использующая наработки сотрудников лаборатории и возможности научной библиотеки функций ROOT Framework, включая алгоритмы минимизации FUMILI и MINUIT и основные средства отображения. Эволюционный поиск начальных параметров и используемые спектральные модели реализованы диссертантом лично.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 157 страниц, включая 47 рисунков, 9 таблиц и список цитируемой литературы из 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится аргументация, подтверждающая актуальность выбранной темы, формулируются цель работы и основные задачи исследования, определяется степень новизны полученных результатов и их практическая значимость.

Первая глава содержит краткий обзор литературы по теме диссертационной работы, рассматриваются некоторые аспекты методик синтеза наноструктур, характеристики роста слоев в различных условиях, влияние материала и состояния подложки на свойства пленок и многослойков, основные структурные и магнитные свойства магнитных сверхрешеток и многослойков, особенности транспортных свойств многослойных пленок, а также обоснование сделанного в диссертационной работе выбора материалов для синтеза. Затрагиваются вопросы анизотропии, суперпарамагнетизма, магнитосопротивления и некоторых эффектов орбитальной природы, наблюдаемых в пленках и на примесях.

Вторая глава описывает использованные методы получения и исследования магнитных сверхрешеток, характеристики установки по их напылению, рентгено-дифракционного и вибрационно-магнитометрического комплексов и мессбауэровского спектрометра.

Показано, что использованный метод синтеза магнитных сверхрешеток позволяет получать качественные образцы с хорошей адгезией к подложке, контролируемыми толщинами слоев компонент и низким содержанием примеси рабочего газа. Указано на возможность формирования в разряде режима распыления кластеров материалов мишеней с малым числом атомов.

Использованный уникальный полностью компьютеризированный магнитометрический комплекс позволяет проводить измерения намагниченности с чувствительностью $2 \cdot 10^{-7}$ Гс·см³ (эме), причем выбранный закон изменения намагничивающего поля позволил повысить качество петель магнитного гистерезиса путем плавного снижения скорости dH/dt при приближении к точке $H = 0$. Описаны способы измерения температурных зависимостей намагниченности в диапазонах температур 77-300 К и 300-1100 К. Описана методика калибровки магнитометра для получения абсолютных величин намагниченности.

Измерения мессбауэровских спектров проводились в режиме постоянных ускорений образца при неподвижном источнике всегда при комнатной температуре.

Третья глава содержит описание использованного метода обработки мессбауэровских спектров и спектральной модели сверхрешеток, а также основные сведения об известных методах обработки данных мессбауэровской спектроскопии.

Особенность использованной модели состоит в использовании лоренцевской формы распределения плотности вероятности сверхтонких магнитных полей, что исключает необходимость аппроксимации экспериментального спектра в свою очередь аппроксимированными функциями Фойгта или аппроксимацию лоренцевскими линиями с почти произвольными параметрами. В использованном методе исключена также возможность произвольного описания уширения естественной ширины линии мессбауэровского изотопа. Вместо этого используется концепция непрерывного распределения параметров сверхтонкого взаимодействия, приводящая к формированию широких или узких лоренцевых пиков в функции распределения плотности вероятности данного параметра.

Спектральная модель сверхрешеток предполагала наличие нескольких групп локальных магнитных состояний, отвечающим расположению ионов Fe в различных окружениях: в слоях, интерфейсах и в прослойке. Дополнительные группы магнитных состояний введены для положений катионов в окружении, характерном для ступенек, островков и др. несовершенств структуры слоев компонент. Предполагалась пропорциональная зависимость изомерного сдвига и квадрупольного расщепления от величины сверхтонкого магнитного поля с коэффициентами, различными для различных групп локальных магнитных состояний.

Использовано приближение слабого по сравнению с зеемановским квадрупольного расщепления с нулевым параметром асимметрии градиента электрического поля на ядре.

Четвертая глава подводит итоги выполненным исследованиям структуры и интегральных магнитных свойств магнитных сверхрешеток Fe/Be и Fe/Ag.

Указано на значительное превышение значения спонтанной намагниченности сверхрешеток по сравнению со значением для чистого массивного железа в большинстве образцов. В некоторых сверхрешетках Fe/Be спонтанная намагниченность достигала 4 800–5 300 Гс.

Наблюдался гистерезис перемагничивания сверхрешеток в направлении внешнего поля перпендикулярном плоскости образца с техническим насыщением в полях менее 5 кЭ, причем и в случае сверхрешеток с гигантскими значениями намагниченности, для которых размагничивающее поле должно быть весьма значительным.

Обнаружено наличие осциллирующей зависимости (рис.) спонтанной намагниченности, коэрцитивной силы и некоторых других параметров кривых перемагничивания от толщин слоев Ag и Be при постоянной толщине слоев Fe, причем в случае Ag период соответствует полученному в расчетах по модели РККИ. Не делается никаких заключений о соответствии или несоответствии фазы и амплитуды осцилляций теоретическим расчетам. Для Be экспериментально определен период осцилляций, однако расчетов в модели РККИ для Be, насколько известно автору, до настоящего времени не производилось.

Некоторые сверхрешетки Fe/Ag проявили суперпарамагнитный характер магнитного поведения при комнатной температуре, что было подтверждено наличием гистерезиса при азотной температуре и значительным магнитным моментом, вычисленным по результатам аппроксимации кривых перемагничивания при комнатной температуре функцией Ланжевена.

Приведены данные о магнитном старении образцов Fe/Ag за период 10 месяцев и о поведении магнитных сверхрешеток Fe/Be при отжиге в постоянном магнитном поле и после отжига.

Пятая глава содержит обсуждение результатов исследования локальных магнитных состояний ионов Fe в магнитных сверхрешетках на

основе восстановленных функций распределения плотности вероятности сверхтонких магнитных полей на ядрах ^{57}Fe .

Показано, что даже с учетом влияния подложки на поглощение мессбауэровского излучения в области малых скоростей поглотителя спектры магнитных сверхрешеток, как правило, характеризуются преобладанием малых и средних магнитных полей.

Доля квазиобъемных локальных магнитных состояний, характеризующихся классическим секстетом линий поглощения, отвечающих значению сверхтонкого поля около 320–340 кЭ, оказалась достаточно значительной только в случае магнитной сверхрешетки $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Be}(4\text{\AA})]$, где из-за малой толщины прослойки в результате диффузии могли образоваться переходы между слоями Fe с образованием областей, сходных по свойствам с ультратонкими пленками Fe.

В остальных случаях наблюдалось преобладание сверхтонких магнитных полей не более 100 кЭ, что не соответствует наблюдаемым значениям магнитных моментов Fe в магнитных сверхрешетках Fe/Be и Fe/Ag (в предположении, что величина среднего сверхтонкого магнитного поля должна коррелировать с величиной магнитного момента иона). Делается заключение, что этот эффект обусловлен возрастанием вклада орбитального момента атома и электронов проводимости в магнитное сверхтонкое поле на ядрах ^{57}Fe магнитоактивных ионов.

Приводятся данные о распределении углов выхода магнитных моментов из плоскости сверхрешетки, определены

Приводятся результаты вспомогательного исследования магнитных сверхрешеток Fe/Be методом ферромагнитного резонанса в Московском и Кубанском университетах и ИРЭ НАН Украины и расчета g-факторов в киттелевском приближении, свидетельствующие о больших средних значениях g-факторов, достигающих 3,07 и 6,0 для сверхрешеток $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Be}(8\text{\AA})]_{100}$ и $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Be}(11\text{\AA})]_{110}$ соответственно.

На последующих страницах приводятся наиболее интересные иллюстрации, относящиеся, в основном, к впервые полученным магнитным сверхрешеткам Fe/Be.

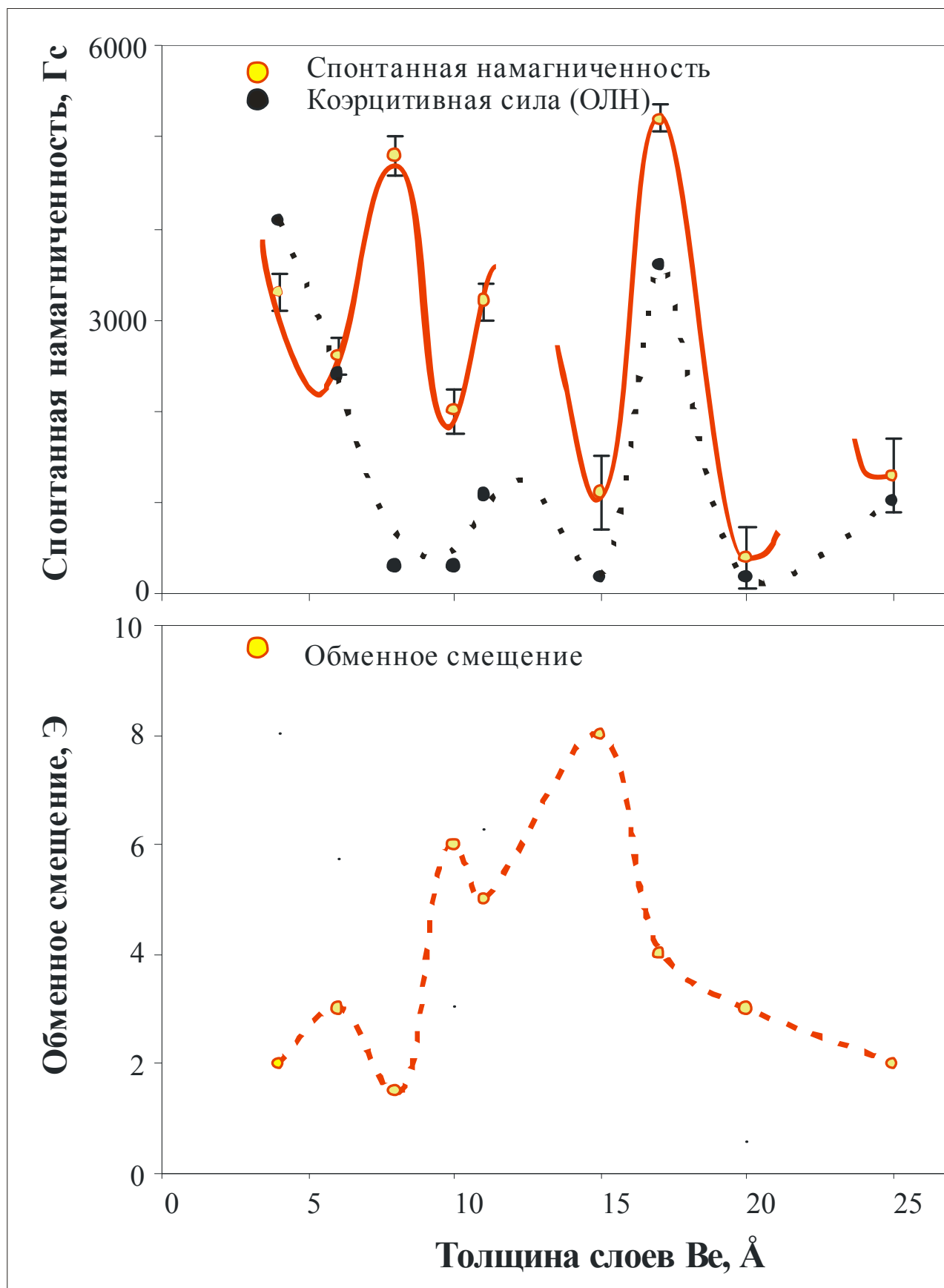


Рис. 1. Зависимость магнитных характеристик МСР Fe/Be от толщины слоев Be при толщине Fe 10Å.

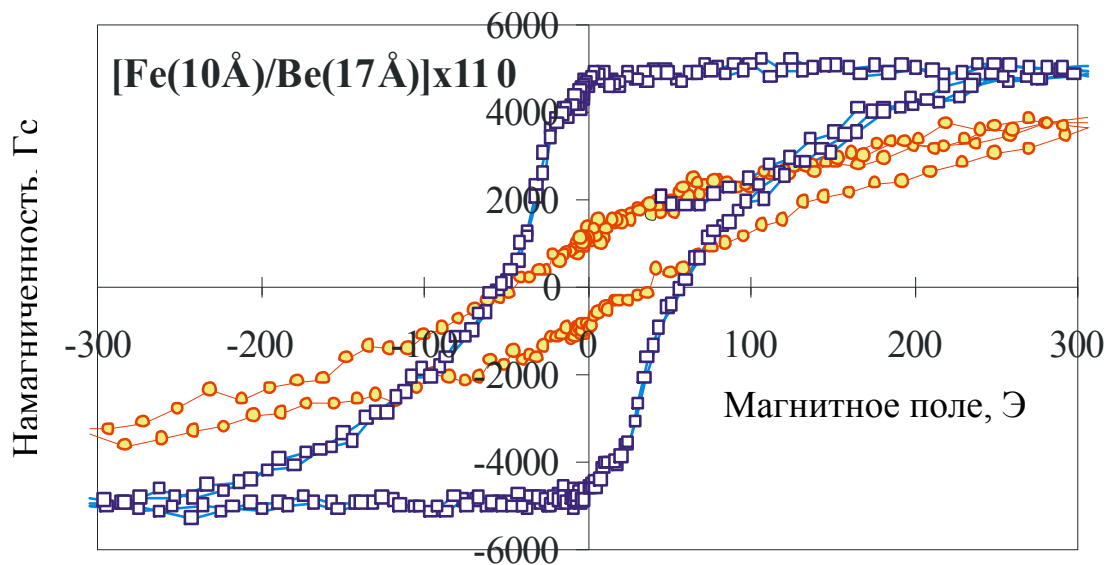


Рис. 2а Центральная часть петли перемагничивания МСР $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Be}(17\text{\AA})]_{110}$ в плоскости сверхрешетки вдоль направления магнитного поля при напылении (трудная ось) и поперек поля при напылении (легкая ось).

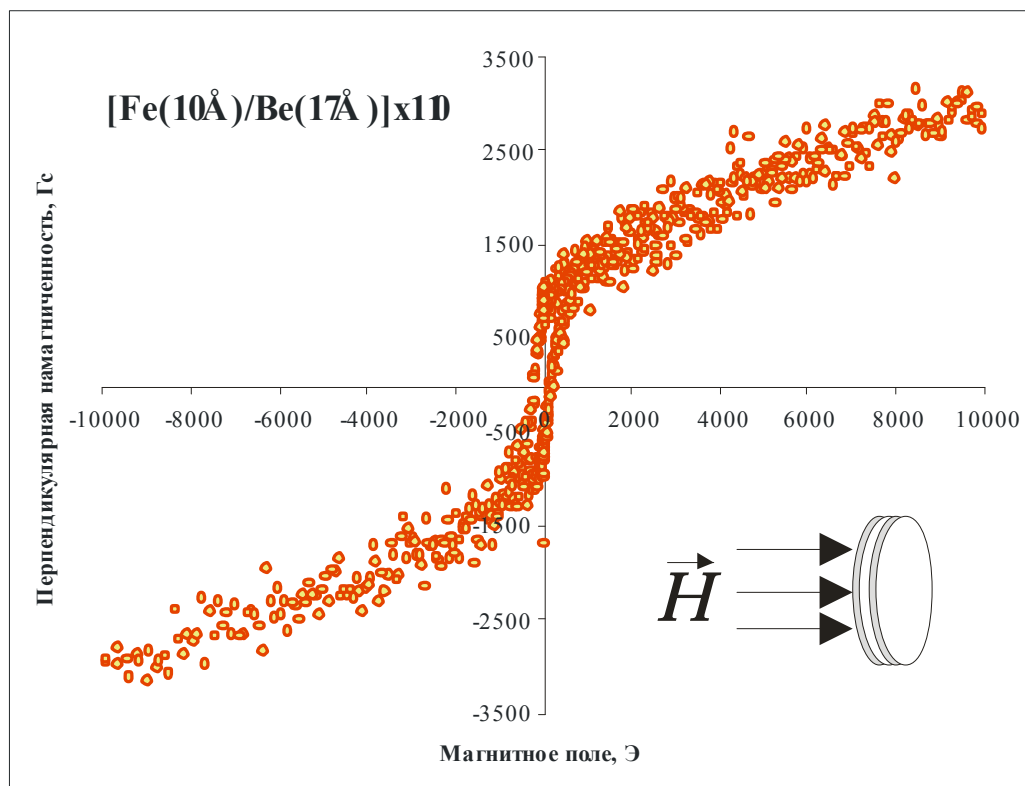


Рис. 2б Центральная часть петли перемагничивания МСР $[\text{Fe}(10\text{\AA})/\text{Be}(17\text{\AA})]_{110}$ перпендикулярно плоскости сверхрешетки.

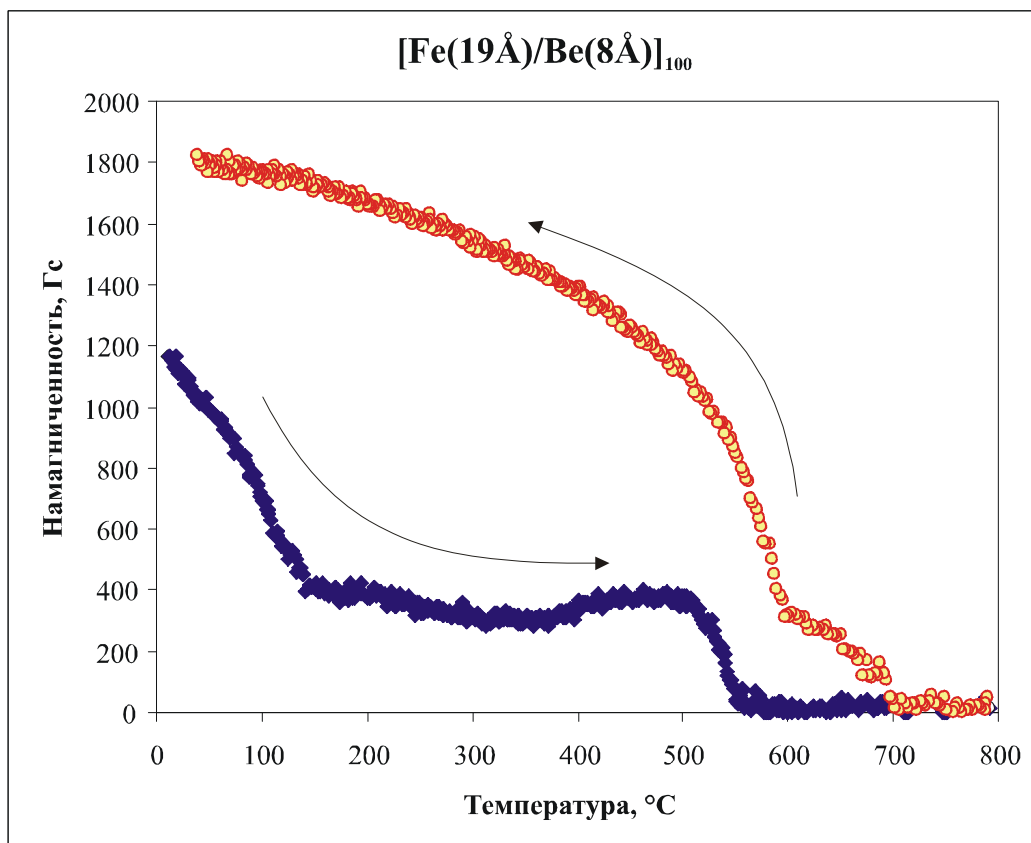


Рис. 3 Температурная зависимость намагниченности образца $[\text{Fe}(19\text{\AA})/\text{Be}(8\text{\AA})]_{100}$ при нагревании до 800 °C и охлаждении в магнитном поле 500 Э.

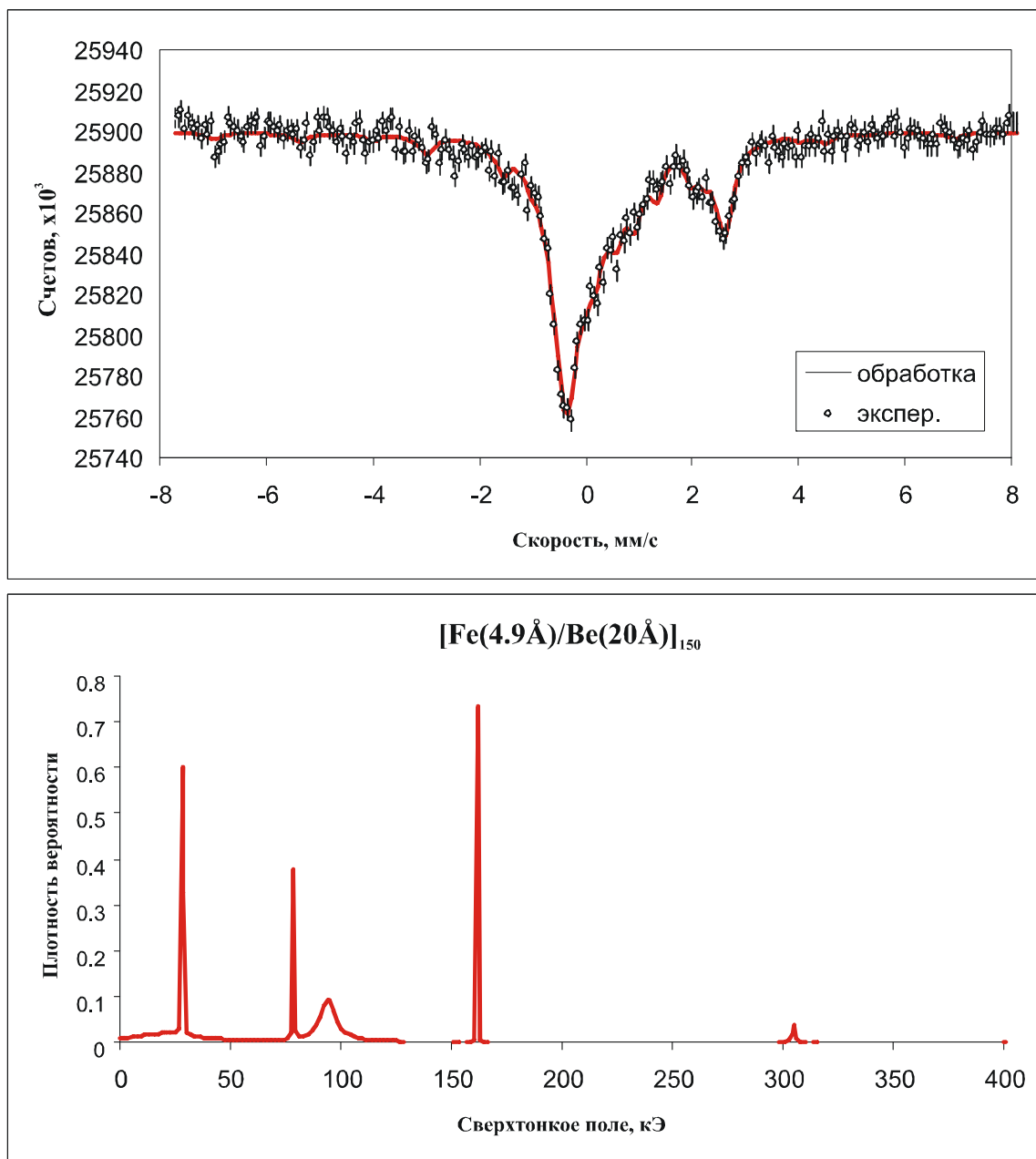


Рис. 4 а) Спектр ядерного гамма-резонанса МСР $[\text{Fe}(4,9 \text{ \AA})/\text{Be}(20 \text{ \AA})]_{150}$,
 б) распределение сверхтонких полей на ядрах ^{57}Fe .

Основные публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертационной работы полностью отражено в следующих публикациях А.П.Крашенинникова:

1. Антипов С.Д., Горюнов Г.Е., Колумбаев А.Л., Крашенинников А.П., Смирницкая Г.В., Стеценко П.Н. Сверхтонкие взаимодействия и локальные магнитные состояния ионов Fe в магнитных сверхрешетках Fe/Pd // Сборник трудов XI Международной конференции по спиновой электронике. 2002 г. С. 7-19.
2. Avksentjev Ju.I., Antipov S.D., Goryunov G.E., Kamenskikh I.R., Krasheninnikov A.P., Panin I.A., Stetsenko P.N. Magnetic properties and possibility of spontaneous spin-reorientation in the Fe-sublattice of intermetallic compounds $Tm(Fe_{1-x}Rh_x)_2$ // Ab-stracts of Moscow International Symposium on Magnetism. 2002 г. С. 117-118.
3. Авксентьев Ю.И., Антипов С.Д., Горюнов Г.Е., Каменских И.Р., Крашенинников А.П., Садков Д.В., Стеценко П.Н. Магнитные свойства и ядерный гамма-резонанс интерметаллических соединений $Ho_xY_{1-x}Fe_2$ // Тезисы докладов VIII международной конференции "Мессбауэровская спектроскопия и ее применения". 2002 г. С. 41.
4. Avksentjev Ju.I., Antipov S.D., Goryunov G.E., Kamenskikh I.R., Krasheninnikov A.P., Panin I.A., Stetsenko P.N. Magnetic properties and possibility of spontaneous spin-reorientation in the Fe-sublattice of intermetallic compounds $Tm(Fe_{1-x}Rh_x)_2$ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials T. 258-259. 2003 г. С. 335-337.
5. С.Д. Антипов, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, Г.В. Смирницкая, П.Н. Стеценко, Спиновый и орбитальный магнетизм сверхрешеток Fe/Be // Сборник трудов XII международной конференции по спиновой электронике. 2003 г. С. 111-126.
6. S. Antipov, V. Buravtsova, E. Gan`shina, G. Gorjunov, V. Guschin, A. Krasheninnikov, F. Pudonin, P. Stetsenko The Peculiarities of Magnetic State of Ferromagnetic-Semiconductor Multilayers // Abstract Notebook of The 2-nd International Conference and School on Semiconductor Spintronics and Quantum Information Technology SpinTech II. 2003 г. С. 200.
7. Antipov S.D., Goryunov G.E., Smirnitskaya G.V., Stetsen-ko P.N., Krasheninnikov A.P. Formation of local magnetic states of magnetic ions and

hyperfine fields on nuclei in magnetic superlattices // Abstr. of International conference on functional materials (ICFM-2003). 2003 г. С. 288.

8. P.N. Stetsenko, G.E. Goryunov, S.D. Antipov, G.V. Smirnitskaya, A.P. Krashenninnikov, O.V. Skabitskaya Oscillations of magnetic parameters and giant magnetization of Fe/Be superlattices // 2003 SOMMA/KMS meeting International Symposium on Magnetic Materials and Applications and Winter Conference of the Korean Magnetism Society. 2003 г. С. 134.

9. Goryunov G.E., Antipov S.D., Smirnitskaya G.V., Krashenninnikov A.P., Skabitskaya O.V., Stetsenko P.N. Oscillations of magnetic parameters and giant magnetization of Fe/Be superlattices // Phys.Stat.Sol. (b) T. 241. 2004 г. С. 1439-1443.

10. С.Д. Антипов, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, Г.В. Смирницкая, П.Н. Стеценко, Роль орбитальных вкладов в формировании локальных атомных магнитных моментов ионов Fe в магнитных сверхрешетках // Сборник трудов XIX Международной конференции магнитные материалы микроэлектроники НМММ-19. 2004 г. С. 397 - 399.

11. П.Н. Стеценко, Г.В. Смирницкая, С.Д. Антипов, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, О.В. Скабицкая Пространственное распределение намагниченности в магнитных сверхрешетках Fe/Be // Сборник трудов XIX Международной конференции магнитные материалы микроэлектроники НМММ-19. 2004 г. С. 436-437.

12. С.Д. Антипов, В.Е. Буравцова, Е.А. Ганьшина, Г.Е. Горюнов, В.С. Гушин, С.И. Касаткин, А.П. Крашенинников, Ф.А. Пудонин, П.Н. Стеценко Магнитные и магнитооптические свойства спин-туннельных магнитодиэлектрических наногетероструктур // Сборник трудов XIX Международной конференции магнитные материалы микроэлектроники НМММ-19. 2004 г. С. 601-603.

13. С.Д. Антипов, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, П.Н. Стеценко, Г.В. Смирницкая, О.В. Скабицкая Влияние орбитального момента на формирование локальных магнитных моментов и сверхтонких магнитных полей в магнитных сверхрешетках Fe/Be // Сборник трудов XII международной конференции по спиновой электронике и гироевекторной электродинамике. 2004 г. С. 119-131.

14. S.D. Antipov; G.E. Goryunov; A.P. Krashenninnikov; O.V. Skabitskaya; G.V. Smirnitskaya; P.N. Stetsenko; S.A. Taraskin; Ferromagnetism

and superparamagnetism in Fe/Ag magnetic superlattices // Proceedings of the Third Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, June 25-30 2005). 2005 г. С. 172-176.

15. А.П.Крашенинников, Спиновый и орбитальный магнетизм в магнитных сверхрешетках Fe/Be // Тезисы конференции «Ломоносов 2005». 2005 г. С.

16. С.Д. Антипов, Т.В. Багмут, С.А. Вызулин, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, Е.В. Лебедева, С.В. Недух, Г.В. Смирницкая, П.Н. Стеценко, Н.Е. Сырьев О роли орбитальных вкладов в намагниченность магнитных сверхрешеток железо-бериллий // Сборник трудов конференции «Ломоносовские чтения 2005». 2005 г. С.

17. S.D. Antipov, G.E. Goryunov, A.P. Krashennnikov, G.V. Smirnitskaya, P.N. Stetsenko Giant magnetic moments of Fe ions in Fe/Be magnetic superlattices // Journal of Magnetism and Magnetic Materials T. 300. 2006 г. С. e455-e458.

18. С.Д. Антипов, Т.В. Багмут, С.А. Вызулин, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, Е.В. Лебедева, С.В. Недух, Г.В. Смирницкая, П.Н. Стеценко, Н.Е. Сырьев О роли орбитальных вкладов в намагниченность магнитных сверхрешеток железо-бериллий // Сборник трудов XX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». 2006 г. С. 298-300.

19. С.Д. Антипов, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, Г.В. Смирницкая, П.Н. Стеценко Особенности магнитных свойств трехкомпонентных магнитных сверхрешеток на основе Fe/Co/Mo // Сборник трудов XX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». 2006 г. С. 885-887.

20. С.Д. Антипов, Г.Е. Горюнов, А.П. Крашенинников, В.А. Сенина, Г.В. Смирницкая, П.Н. Стеценко Магнитные свойства и локальные состояния ионов Fe в трехкомпонентных магнитных сверхрешетках на основе Fe/Co/Mo // Электронный журнал "Исследовано в России". 2007 г. С. 27-36 (002/061211).