

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

На правах рукописи

Пхонгхирун Сонгсак

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ
ФЕРРОМАГНИТНЫЙ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК И
НАНОМУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК
ФЕРРОМАГNETИК - ПОЛУПРОВОДНИК

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

| | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель | доктор физико-математических наук, профессор Е. А. Ганьшина |
| Официальные оппоненты: | доктор физико-математических наук, профессор А. С. Андреев кандидат физико-математических наук, доцент А. Н. Юрасов |
| Ведущая организация | Институт металлургии и металловедения им. А.А.Байкова РАН г.Москва. |

Защита состоится “ 15 ” ноября 2007 года в 17.00 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 _____.

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

Автореферат разослан “ ” октября 2007 года.

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

И. А. Никанорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Устойчивый интерес к наноструктурам, возникший в последнее время, обусловлен возможностью значительной модификации и принципиального изменения качеств известных материалов при переходе в нанокристаллическое состояние. В низкоразмерных магнитных материалах, наблюдаются необычные физические явления, представляющие как самостоятельный научный интерес, так и важное практическое значение: гигантский магнитный импеданс (ГМИ), гигантское магнитосопротивление (ГМС) [1], гигантский аномальный эффект Холла (АЭХ) [2], аномальные оптические эффекты [3], сильный магнитооптический отклик [4].

Эти свойства нанокомпозитов лежат в основе широких возможностей их практического применения в различных областях техники: при разработке новых искусственных материалов для спинтроники и магнитофоники, при создании элементов магнитной и магнитооптической записи, высокочувствительных датчиков магнитного поля и т.п.

Объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований является вопрос взаимного влияния состава и микроструктуры на магнитные, магнитотранспортные, оптические и магнитооптические свойства пленочных нанокомпозитов. Несмотря на большое количество работ до сих пор нет достаточной ясности в понимании процессов, сопровождающих структурную перестройку вещества, так как трудно предсказать свойства пленок, в которых значительную роль играют взаимодействия наночастиц между собой, с матрицей и с подложкой, при огромном влиянии размерных и поверхностных эффектов, вызываемых частицами, их границами и поверхностью пленок.

В связи с этим актуальным оказываются экспериментальные методы, позволяющие получить представление о внутренней структуре таких материалов и особенностях магнитного взаимодействия в них. К таким методам относятся магнитооптические методы и метод ферромагнитного резонанса, позволяющие изучать физические свойства в широком частотном диапазоне. Оба эти метода чувствительны к наличию магнитных неоднородностей, к изменению формы и размера частиц, к их объемному распределению и к появлению новых магнитных фаз в образце.

С этой точки зрения детальные экспериментальные исследования магнитных, магнитотранспортных и магнитооптических свойств нанокompозитных материалов в зависимости от состава, концентрации и технологических параметров получения необходимы, как для понимания общих закономерностей формирования физических свойств нанокompозитов, так и для реализации практических задач и в первую очередь, для конструирования наноструктурных материалов с заданными магнитными и магнитооптическими характеристиками.

Цель работы состояла в исследовании особенностей магнитооптических и магнитных свойств двух групп наноструктурных материалов — спин-туннельных нанокompозитов (ферромагнитный металл – диэлектрик) и спин-туннельных многослойных магниторезистивных структур (ферромагнетик – полупроводник).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. проведение автоматизации экспериментальной установки для исследования экваториального эффекта Керра (ЭЭК)
2. исследование зависимости магнитооптической активности аморфных гранулированных нанокompозитов от состава металлических гранул $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$;
3. исследование влияния матрицы на магнитооптические свойства нанокompозитов с гигантским туннельным магнитосопротивлением;

4. изучение влияния технологических условий получения нанокompозитов ферромагнетик – сегнетоэлектрик $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ на их магнитные и магнитооптические свойства;
5. исследование магнитных и магнитооптических свойств многослойных систем: $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})/(\text{a-Si})]_{40}$ и $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}]/\alpha\text{-Si:H}]_{30}$.

Научная новизна и практическая ценность работы состоит в следующем:

- Обнаружено, что магнитооптический отклик возрастает в ряду нанокompозитов с гранулами $\text{CoNbTa} \rightarrow \text{CoFeV} \rightarrow \text{CoFeZr}$. Установлена корреляция между максимальными значениями экваториального эффекта Керра, туннельного магнитосопротивления нанокompозитов и магнитострикции насыщения материала металлических гранул, связанная с возрастанием вклада поляризованных d-электронов в плотность состояний вблизи уровня Ферми и ростом спин-орбитального взаимодействия в ряду нанокompозитов с гранулами $\text{CoNbTa} \rightarrow \text{CoFeV} \rightarrow \text{CoFeZr}$.
- Установлено, что существует оптимальное значение давления кислорода в распылительной камере, при котором достигаются максимальные значения магнитооптического отклика нанокompозитов ФМ металл – сегнетоэлектрик и расширяется концентрационная область существования нанокompозитов с большим значением магнитосопротивления.
- Впервые исследована зависимость магнитооптических и магнитных свойств от толщины полупроводниковых слоев для наномультислойной структуры нанокompозит - аморфный гидрогенизированный Si – $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\text{aSiH}]_{40}$. Обнаружено, что образование межгранульной полупроводниковой прослойки aSi:H в многослойной системе приводит к возникновению

сильного эффективного обменного взаимодействия между изолированными гранулами ФМ сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$.

Практическая ценность. Полученные в диссертационной работе результаты расширяют представление о магнитооптических явлениях в наноструктурных материалах. Результаты исследования могут быть использованы для развития технологий получения наноструктур необходимой конфигурации с заданными свойствами и для разработки новых материалов для спинтроники.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: Международной школе – семинаре “Новые магнитные материалы микроэлектроники”, Москва, 2002, 2004, 2006; Международном симпозиуме “Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODP0”, Сочи, 2002, 2003, 2004, 2007; на секции по проблемам магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах, Астрахань 2003; XXI international conference on “Relaxation phenomena in solids (RPS-21)”, Voronezh', October 5-8, 2004; Московском международном симпозиуме по магнетизму MISM 2005, Москва, 25-30 июня, 2005; Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов, Краснодар, 2-5 октября 2006; II International Conference “Electronics and Applied Physics” Kyiv, Ukraine, 11-14 October 2006

Личный вклад автора. Проведена автоматизация экспериментальной установки для исследования ЭЭК. Подготовка образцов и измерения магнитооптических свойств проведены лично автором. Обсуждение и анализ полученных экспериментальных результатов проводились авторами соответствующих работ совместно.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 21 научная работа, включая 6 статей и 15 публикаций в материалах конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем работы - 123 страницы машинописного текста, включая 60 рисунков, 4 таблицы и 105 библиографических ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность изучения рассматриваемых в диссертации проблем, сформулирована цель работы. Обозначена научная новизна и практическая ценность работы, дана краткая характеристика основных разделов диссертации. Представлена степень апробации, количество публикаций и структура диссертации.

Первая глава диссертационной работы носит обзорный характер. В ней изложены основные результаты экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию свойств нанокompозитных материалов на основе 3d металлов.

В параграфе 1.1 обсуждается актуальность исследований наноразмерных материалов и возможности их практического применения.

В параграфе 1.2 описаны способы изготовления магнитных гранулированных нанокompозитов, методы изучения их микроструктуры и магнитных свойств.

В параграфе 1.3 дан обзор литературных источников, в которых изучается явление гигантского магнитосопротивления в гранулированных сплавах типа “ферромагнитных металл – диэлектрик” и многослойных магнитополупроводниковых структурах.

В параграфе 1.4 приведены существующие результаты экспериментальных и теоретических исследований магнитооптических свойств магнитных нанокompозитов. Представленные данные свидетельствуют о том, что изучение магнитных, магнитотранспортных и магнитооптических свойств нанокompозитных материалов является

актуальным и перспективным научным направлением, активно развивающимся в настоящее время. Однако для того, чтобы такие материалы могли успешно применяться в практических целях, необходимо решить ряд проблем, таких как:

- Изготовление хорошо воспроизводимых, обладающих заданными свойствами наноструктур. Следует отметить, что предсказание свойств таких материалов является сложной задачей, так как при её решении необходимо учитывать влияние многих факторов, например, таких как взаимодействие наночастиц между собой, с матрицей и с подложкой, размерные и поверхностные эффекты.
- Нахождение компромисса между составом нанокompозита, значением магнитосопротивления и величиной внешнего магнитного поля.
- Установление взаимосвязи между составом гранулированного сплава, его микроструктурой и величиной магнитооптических эффектов.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что детальные исследования изменений магнитных, электрических и магнитооптических характеристик магнитных композитных материалов в зависимости от их состава, микроструктуры и технологических режимов их получения являются актуальными.

Во второй главе описана методика эксперимента и установка, для измерения экваториального эффекта Керра в области энергий падающего света 0.5 – 4.5 эВ в переменном магнитном поле ~ 2.5 кЭ. Автором проводилась автоматизация работы установки. Приводится блок-схема установки и алгоритм работы программного обеспечения.

Третья глава посвящена исследованию влияния элементного состава ферромагнитной компоненты и матрицы на магнитные и магнитооптические свойства аморфных нанокompозитов.

В параграфе 3.1 описываются технические параметры и метод изготовления гранулированных композиционных материалов аморфный ферромагнитный металл – диэлектрик $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и нанокompозитов, обладающих значительным туннельным магнитосопротивлением. Приведены данные о микроструктуре и составах исследованных нанокompозитов.

В параграфах 3.2- 3.4 представлены результаты МО исследования спектральных, концентрационных и полевых зависимостей экваториального эффекта Керра аморфных гранулированных нанокompозитов ферромагнетик – диэлектрик для трех различных составов ферромагнитной металлической компоненты.

Установлено, что спектры $\delta(h\nu)$ изучаемых нанокompозитов существенно отличаются по знаку, величине и характеру от спектров

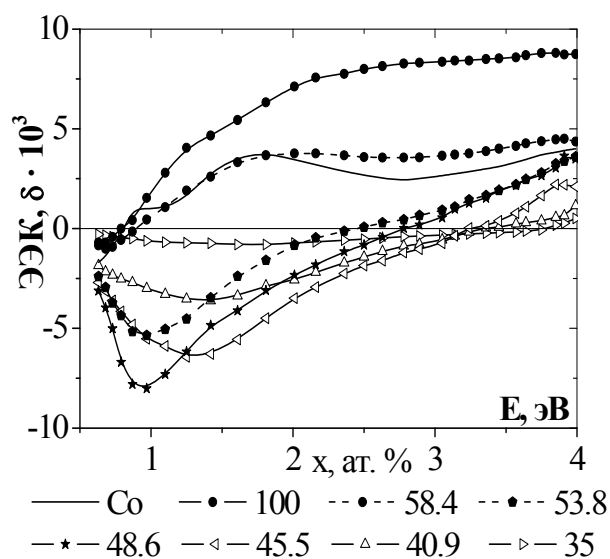


Рис. 1. Спектральные зависимости ЭЭК нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

аморфных металлических сплавов, составляющих основу нанокompозита и от спектров поликристаллического кобальта (см. рис. 1). Обнаружено, что особенно сильные изменения спектров $\delta(h\nu)$ наблюдаются в области энергий $0.6 < h\nu < 1.5$ эВ. В то время как при уменьшении энергии световых квантов значения ЭЭК Co и аморфных сплавов уменьшаются до нуля,

эффект в нанокompозитах меняет знак в области 1.5 – 3 эВ и достигает экстремальных значений в диапазоне 0.6 – 1.2 эВ.

Установлено, что концентрационные зависимости ЭЭК имеют немонотонный характер в ближней ИК области спектра (см. рис. 2). При этом максимум эффекта наблюдается при $x \cong x_{\text{пер}}$ и его величина зависит от элементного состава металлической компоненты. Максимальное значение ЭЭК было найдено для композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$.

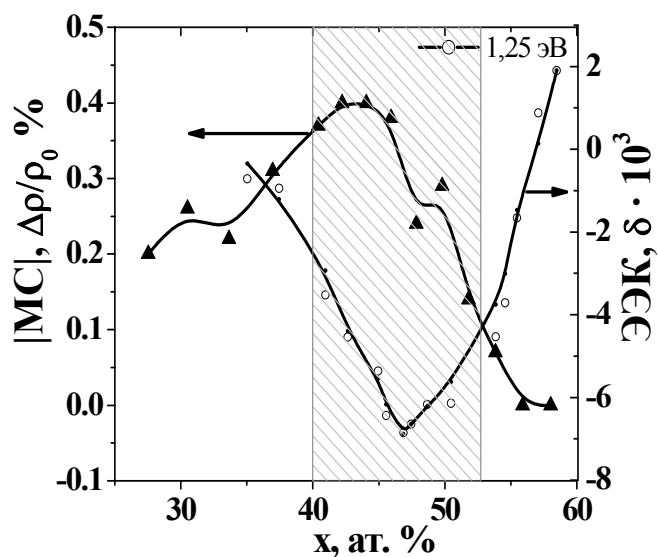


Рис. 2. Концентрационные зависимости ЭЭК и ГМС нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

Исследование полевых зависимостей ЭЭК, полученных при фиксированной энергии квантов падающего света, позволило определить тип магнитного упорядочения в нанокompозитах с различным содержанием ферромагнитной компоненты. Было найдено, что полевые зависимости ЭЭК выявляют наличие трех областей концентрации, соответствующих различным процессам намагничивания. Первая группа образцов с концентрацией металлической фазы x до 45 ат.% находится в доперколяционной области. Кривые $\delta(H)$ имеют вид, характерный для суперпарамагнетиков. В частности, наблюдается линейная зависимость δ от H вплоть до 1.5 кЭ. У образцов второй группы с концентрациями, соответствующими области $45 < x < 55$ ат.%, характер зависимости $\delta(H)$ меняется, причем образцы с максимальной концентрацией в полях ≈ 1.5 кЭ практически намагничены до насыщения. Для нанокompозитов с $x > 55$ ат.%, т.е. находящихся за порогом перколяции, наблюдается ферромагнитный характер намагничивания. Для них процесс намагничивания в основном заканчивается в поле до 0.2 кЭ.

В параграфе 3.5 приведены результаты изучения магнитных свойств нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ методом ФМР. Измерены значения резонансного поля $H_{\text{рез}}$ и ширины линии поглощения ΔH в зависимости от ориентации H относительно плоскости пленки. Показано, что по зависимости величины ΔH от x при перпендикулярной ориентации H относительно плоскости пленки можно уверенно определять концентрацию магнитной фазы, соответствующей порогу перколяции. При изменении x от 45 до 46 % величина ΔH_{\perp} уменьшалась скачком почти вдвое, а значение ΔH_{\parallel} в этой области x изменялось незначительно.

Установлено, что данные по изучению изменений перестройки магнитной структуры в нанокompозитах, полученные ФМР и МО методами хорошо коррелируют между собой.

В параграфе 3.6 обсуждается механизм связи магнитооптических и магниторезистивных свойств нанокompозитов с магнитострикцией насыщения металлической фазы нанокompозита.

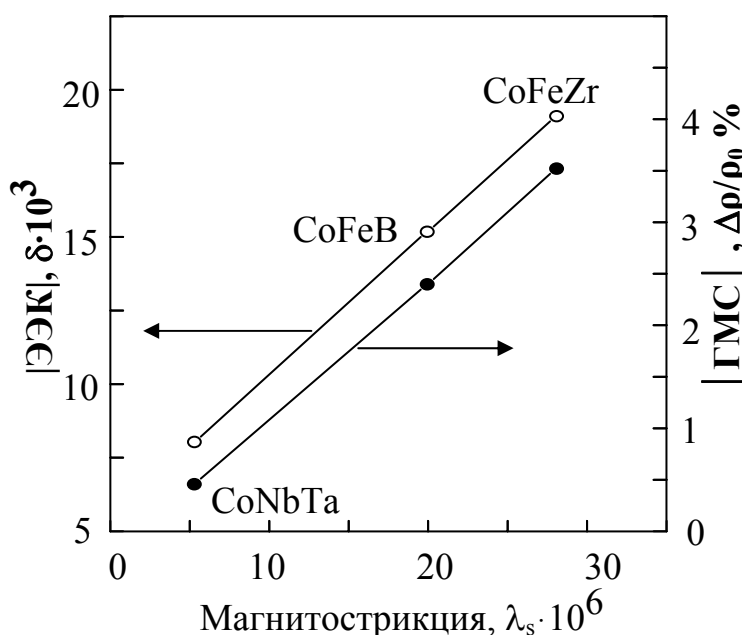


Рис. 3. Корреляция между ГМС, ЭЭК и магнитострикцией металлической фазы нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{57}(\text{SiO}_2)_{43}$, $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$ и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{61}(\text{SiO}_2)_{39}$.

При сравнении результатов магнитных и магнитооптических исследований для аморфных гранулированных нанокompозитов с различным составом магнитных гранул обнаружено наличие связи между максимальными значениями гигантского магнитосопротивления, экваториального эффекта Керра и магнитострикцией материала, из которого сформированы гранулы (рис.3). С ростом магнитострикции в ряду магнитных гранул CoNbTa – CoFeB – CoFeZr линейно увеличивались и значения ГМС, и ЭЭК.

Наблюдаемые корреляции обусловлены, по нашему мнению, одним и тем же механизмом и могут быть связаны с возрастанием вклада d-электронов и величины спин-орбитального взаимодействия в цепи нанокompозитов с гранулами CoNbTa → CoFeB → CoFeZr.

Плотность состояний на уровне Ферми для этих композитов была определена из изучения температурных зависимостей сопротивления при низких температурах [5]. Проведенное исследование показывает, что плотность локализованных состояний зависит от материала гранул и величина $g(E_F)$ растет при переходе от CoNbTa к CoFeB и далее к CoFeZr.

Увеличение плотности состояния поляризованных d-электронов вблизи уровня Ферми, как следствие, должно приводить к возрастанию их вкладов и в спин-зависящее туннелирование, и в рассеяние света, и в межзонные оптические переходы и приводить к росту магнитосопротивления, магнитострикции и магнитооптических эффектов в последовательности нанокompозитов с гранулами CoNbTa → CoFeB → CoFeZr.

Величины магнитооптических эффектов и магнитострикции прямо пропорциональны величине спин-орбитального взаимодействия. Рост спин-орбитального взаимодействия в последовательности нанокompозитов с гранулами CoNbTa → CoFeB → CoFeZr также должен приводить к возрастанию вклада в спин-зависимое туннелирование и росту магнитосопротивления.

В параграфе 3.7 приведены экспериментальные данные исследования спектральных, полевых и концентрационных зависимостей ЭЭК для нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$.

Сравнение спектров ЭЭК нанокompозитов с гранулами CoFeZr , внедренных в матрицы оксида кремния и оксида алюминия показывает, что величина магнитооптического эффекта в области низких частот в образцах с матрицей Al_2O_3 , практически вдвое ниже, а перколяционный переход в этой системе происходит при $x = 47.8$ ат.%. Полевые зависимости для обеих систем имели подобный вид.

В параграфе 3.8 приведены экспериментальные данные по исследованию влияния элементного состава матрицы на магнитооптические свойства для ряда нанокompозитов на основе Co , обладающих гигантским туннельным магнитосопротивлением.

При сравнении магнитооптических свойств трех нанокompозитов на основе Co в матрицах оксидов алюминия, титана и кремния, обладающих примерно одинаковыми значениями магнитосопротивления можно отметить, что величина ЭЭК нанокompозита $\text{Co}_{50.2}\text{Ti}_{9.1}\text{O}_{40.7}$ почти во всем спектральном диапазоне значительно меньше, чем в других нанокompозитах, и смена знака ЭЭК происходит при энергии 2 эВ, т.е. более низкой, чем в других нанокompозитах. На образцах $\text{Co}_{52.3}\text{Si}_{12.2}\text{O}_{35.5}$ и $\text{Co}_{55.2}\text{Al}_{19}\text{O}_{25.8}$ поведение $\delta(h\nu)$ идентично, но максимальная величина магнитооптического эффекта наблюдается при разных частотах.

В параграфе 3.9 кратко изложены основные результаты данной главы.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния атмосферы в распылительной камере и состояния подложки на магнитооптические свойства нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$.

Во введении показано, что в настоящее время одной из важнейших задач с точки зрения практического применения нанокompозитов является поиск материалов, обладающих оптимальным сочетанием магнито-

оптических и магнитотранспортных характеристик. Изучение электрических и магниторезистивных характеристик гранулированных нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, в которых в качестве матрицы использован аморфный сегнетоэлектрик LiNbO_3 , выявило ряд особенностей, отличающих их от композитов с диэлектрической матрицей SiO_2 или Al_2O_3 . В системах с сегнетоэлектрической матрицей отсутствовал четкий перколяционный порог и представляло интерес посмотреть, как эти особенности будут проявляться в магнитооптических свойствах.

В параграфе 4.2 описаны особенности технологии изготовления исследуемых нанокompозитных материалов. В таблице 3 приведены технологические параметры получения (температуры подложки и давления кислорода в распылительной камере) для исследованных образцов.

В параграфе 4.3 представлены спектральные и концентрационные зависимости ЭЭК для нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ при $P_{\text{O}_2} = 0$ для охлаждаемой подложки (серия 1).

Обнаружено, что величина ЭЭК в нанокompозитах $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ в несколько раз превосходит величину эффекта, наблюдаемого для поликристаллического Co . Изменение формы спектров ЭЭК и значительное увеличение эффекта для гранулированных пленок наблюдалось не только в ближнем ИК диапазоне спектра, как для нанокompозитов $\text{Co}(\text{Al}_2\text{O}_3)$, $(\text{CoFeZr})\text{SiO}_2$, но и в области 3.0 – 4.2 эВ. Максимальные значения ЭЭК для нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, в ближней ИК области были в 2-3 раза меньше, чем для нанокompозитов с диэлектрическими матрицами типа SiO_2 или Al_2O_3 ,

Концентрационная зависимость ЭЭК имела немонотонный характер. Количество максимумов на концентрационной кривой и их положение зависело от длины волны падающего света.

В параграфе 4.4 представлены результаты исследования влияния атмосферы в распылительной камере на магнитооптические свойства нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$.

Обнаружено, что присутствие кислорода в распылительной камере значительно влияет как на вид спектра, так и на его величину. Наиболее ярко зависимость от давления кислорода проявлялась в ближней ИК области (рис. 4а и 4б). При увеличении давления кислорода возрастала величина ЭЭК в ближней ИК области. Максимальный рост магнитооптического отклика наблюдался для серии 4 ($P_{\text{O}_2} = 2.3 \cdot 10^{-5}$ Торр) (рис. 5а). Концентрационные зависимости ЭЭК для всех исследованных систем имели немонотонный характер (рис. 5б) и с увеличением давления

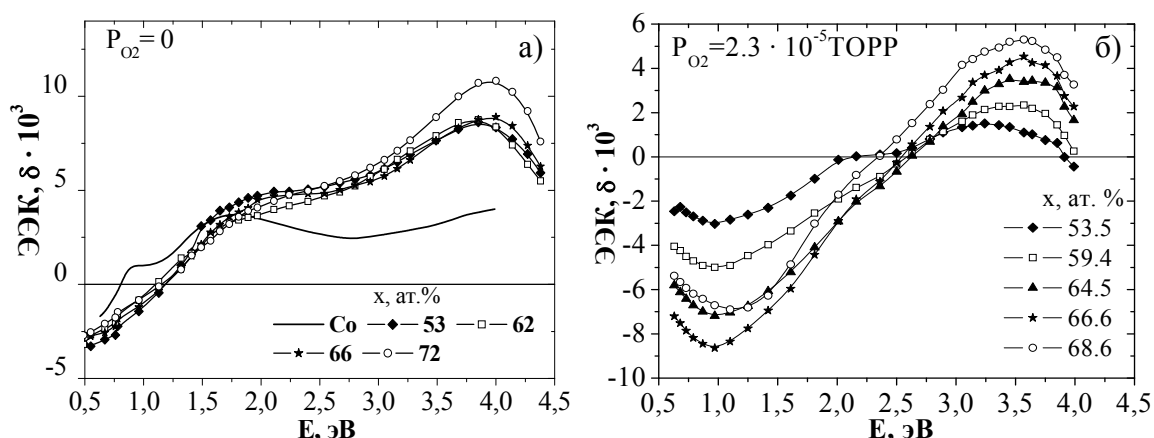


Рис. 4 Спектральные зависимости ЭЭК нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ при а) $P=0$, б) $P=2.3 \cdot 10^{-5}$ Торр.

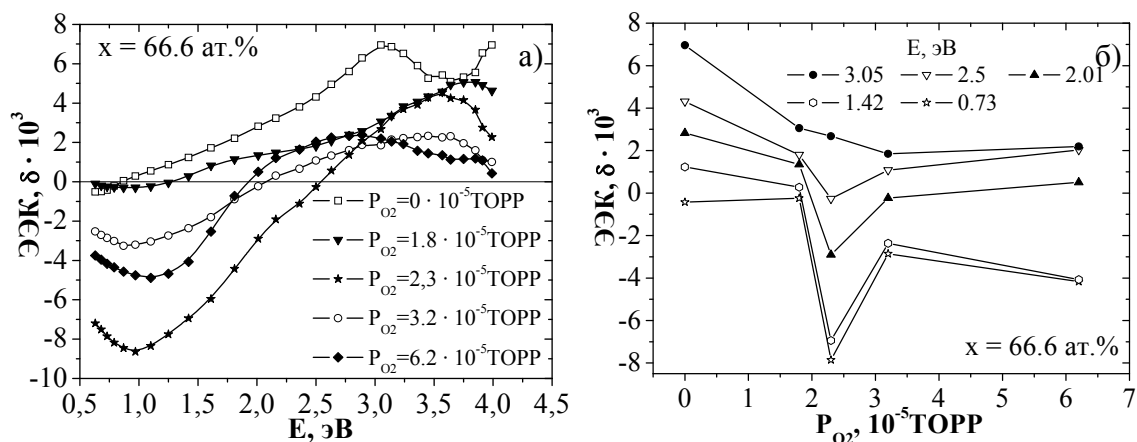


Рис. 5 а) Спектральные и б) концентрационные зависимости ЭЭК нанокompозитов $(\text{Co})_{66.6}(\text{LiNbO}_3)_{33.4}$ при различных давлениях кислорода.

кислорода сдвигались в область больших концентраций. Изучение полевых зависимостей ЭЭК показало, что увеличение давления кислорода при получении нанокompозитов приводит к изменению вида кривых $\delta(H)$ и существенному росту полей насыщения для образцов с большой концентрацией ферромагнитной компоненты.

В параграфе 4.5 описаны результаты изучения магнитных свойств и ФМР для нанокompозитов $(Co)_x(LiNbO_3)_{100-x}$.

Изучение статических петель гистерезиса показало, что насыщение образцов всех серий даже при больших концентрациях магнитной фазы происходит в полях, значительно превосходящих аналогичные значения для образцов с диэлектрической матрицей. С увеличением парциального давления кислорода растет величина гистерезиса, при этом значение коэрцитивной силы растет от 300Э при $P_{O_2}=0$ до 1.6кЭ при $P_{O_2}=2.3 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Измерения резонансных полей ФМР при перпендикулярной ориентации поля H показали, что при увеличении парциального давления кислорода в образцах с одинаковой концентрацией ферромагнитной фазы (при $x > 60$ ат. %) значения $H_{рез}$ уменьшаются.

Установлено, что значения ширины линий ΔH и их концентрационные зависимости меняются с увеличением парциального давления кислорода.

Полученные результаты свидетельствуют, что спектры ФМР очень чувствительны к изменению технологии получения пленок.

В параграфе 4.6 Обсуждаются полученные результаты и сформулированы основные выводы этой главы.

Наличие кислорода в процессе изготовления нанокompозитов влияет на характер и величину ЭЭК. Все наблюдаемые особенности можно связать с появлением дополнительных оболочек окислов вокруг гранул кобальта. Предположим, что для одной и той же серии, количество кислорода постоянно для всей области концентрации металлической фазы. При увеличении концентрации Co в нанокompозитах, с ростом размера

гранул Co и уменьшением гранул матрицы влияние окислительных процессов увеличивается. В итоге вокруг металлических гранул возможно появление оксидных оболочек – например CoO. Оксидные оболочки, как и дополнительные диэлектрические барьеры, уменьшают взаимодействие между металлическими частицами, поэтому максимальные значения ЭЭК (которые для нанокомпозитов наблюдаются в области перколяции) должны смещаться в область больших концентраций, что и наблюдалось в эксперименте. Наиболее сильно это влияние должно проявляться именно в ближней ИК области спектра.

Так как CoO является антиферромагнетиком то появлению на поверхности гранул оксидных оболочек, будет приводить к росту полей насыщения и коэрцитивной силы с увеличением давления кислорода. Образование пленки окислов на поверхности гранул, должно приводить к уменьшению намагниченности и к уменьшению $H_{рез}$ в ФМР спектрах, что также наблюдается в эксперименте.

В пятой главе представлены экспериментальные данные по исследованию магнитооптических свойств в многослойных системах $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})/(a-Si)]_{40}$, и $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_{35}(Al_2O_3)_{65}/\alpha-Si:H]_{30}$ с аморфной структурой.

В параграфе 5.1 Кратко обосновывается актуальность исследования многослойных систем нанокомпозитный ферромагнетик-полупроводник.

В параграфе 5.2 описана технология получения образцов и приведены данные о толщинах слоев исследованных наномультислойных пленок.

В параграфе 5.3 представлены экспериментальные данные по исследованию магнитооптических свойств в многослойных системах $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})/(a-Si)]_{40}$

Установлено, что величина и вид МО спектров зависит от толщины магнитных и полупроводниковых слоев. Для многослойных наноструктур с наименьшими толщинами полупроводниковых и ФМ слоев $d_{a-Si} \sim 0.5$ –

0.84 нм и $d_{\text{фм}} < 2.0$ нм обнаружено усиление МО эффекта, и характер спектра соответствует спектру нанокompозитов с большим отрицательным эффектом в ближней ИК области спектра. Изучение полевых зависимостей ЭЭК показало, что эти пленки являются хорошими ферромагнетиками и насыщаются в полях $H < 100 \text{ Э}$. Максимальные значения ЭЭК наблюдались при наименьшей толщине полупроводниковых слоев. Значительное изменение величины ЭЭК во всех областях спектра отмечались при толщине $d_{\text{a-Si}}$ от 0.5 до 1.3 нм. Рост толщины полупроводниковых слоев приводил к росту полей насыщения, но многослойные наноструктуры оставались ферромагнитными до толщин Si < 3 нм. Для многослойных наноструктур с $d_{\text{a-Si}} > 3 \text{ нм}$ и $d_{\text{фм}} < 2 \text{ нм}$ изменялся характер спектральной зависимости, сильно уменьшалась величина эффекта и образцы не намагничивались в полях до 1.5 кЭ.

В параграфе 5.4 представлены результаты изучения магнитооптических свойств многослойных наноструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\alpha\text{-Si:H}]_{30}$

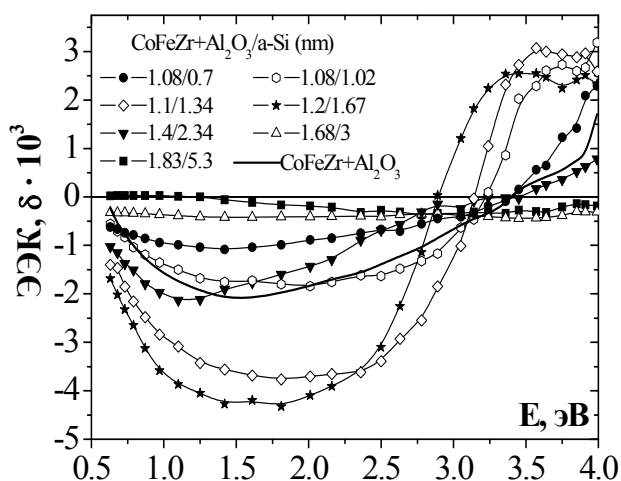


Рис. 6. Спектральные зависимости ЭЭК многослойных наноструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\alpha\text{-Si:H}]_{30}$.

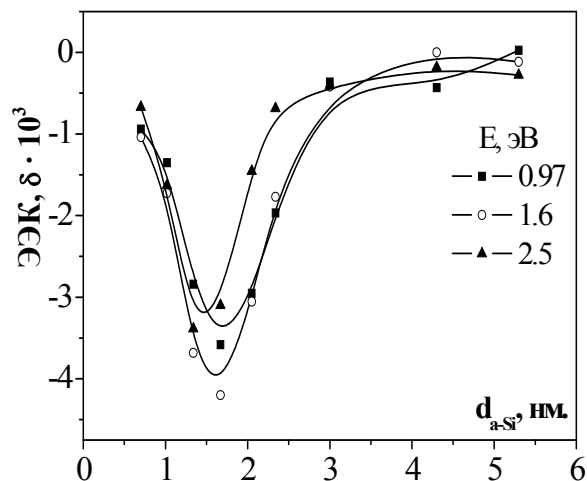


Рис. 7. Зависимости ЭЭК от толщины полупроводниковых слоев a-Si мультислойных наноструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\alpha\text{-Si:H}]_{30}$.

Обнаружено, что так же, как и в случае образцов с металлическими слоями $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ вид и величина МО спектров сильно изменяются в

зависимости от толщины полупроводниковых слоев $d_{\text{a-Si}}$ (рис 6). Общий вид спектров ЭЭК для многослойных пленок был подобен спектру для гранулированного сплава $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}$. Для всех многослойных пленок наблюдалась линейная зависимость ЭЭК от величины магнитного поля в полях до 1.5 кЭ. Величина ЭЭК сильно возрастала, при увеличении $d_{\text{a-Si}}$ до 1.3-1.7 нм. Дальнейший рост толщины полупроводниковой прослойки приводил к уменьшению МО эффекта (рис 7).

Исследование магнитостатических петель гистерезиса при приложении магнитного поля в плоскости и перпендикулярно плоскости пленки показало, что с изменением толщины полупроводниковой прослойки меняются намагниченность и коэрцитивная сила, которые достигают своего максимума при $d_{\text{a-Si}}$ порядка 1.7 нм. При этом для многослойных наноструктур с толщинами Si 1.3 нм наблюдалась перпендикулярная магнитная анизотропия. Значения полей насыщения в плоскости пленки составляли 5-6 кЭ.

Полученные результаты магнитных и магнитооптических исследований коррелируют с данными по изучению транспортных и высокочастотных магнитных свойств этих систем [6], и обусловлены структурными особенностями роста полупроводниковой прослойки $\alpha\text{-Si:H}$ на композиционном слое. Как показано в [6] в области толщин $\alpha\text{-Si:H}$ $1.5 < d_{\text{a-Si}} < 2$ нм наблюдается резкое падение (на три порядка) значения электросопротивления ρ .

Дальнейшее увеличение толщины полупроводниковой прослойки не приводит к значительным изменениям удельного электрического сопротивления многослойной структуры. Используя принцип минимизации поверхностной энергии структуры в процессе роста, можно предположить, что зародыши пленки полупроводника на поверхности композита будут концентрироваться на металлических гранулах, так как величина поверхностной энергии (γ) сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ составляет 2.8 J/m^2 , а γ для Al_2O_3 и Si 1.4 и 1.2 J/m^2 соответственно. Образование

полупроводника α -Si:H на грануле металла будет происходить послойно. Первый атомный слой полупроводника с большой вероятностью может образовывать соединение с металлом в виде силицида, а затем расти на поверхности в виде островковой структуры. Образующаяся островковая структура слоя α -Si:H будет оказывать незначительное влияние на величину удельного электрического сопротивления до толщины, при которой образуется сетка бесконечных каналов гранула-полупроводник-гранула. Из зависимости $\rho(d)$ следует, что толщина, при которой начинается образование бесконечных каналов проводимости $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ - α -Si:H - $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, составляет значение 1.5 нм, а при значениях больших, чем 2 нм происходит завершение формирования сплошной пленки полупроводника.

Таким образом, изменение свойств многослойных наноструктур в области толщин 1.3-2 нм можно связать с образованием моногранульной прослойки Si на ФМ гранулах CoFeZr . Из концентрационных зависимостей $\rho(d_{\text{a-Si}})$ следует, что перколяция в многослойной системе композит – полупроводник происходит в области толщин $d_{\text{a-Si}}$ порядка 1.5 нм. При этом перколяция начинается в направлении перпендикулярном плоскости пленки (между слоями композита), что и приводит к перпендикулярной магнитной анизотропии при толщинах $d_{\text{Si}} = 1.3$ нм.

Наблюдаемое усиление МО отклика в данной системе также связано с перколяционным переходом, что неоднократно наблюдалось и для других нанокompозитов [7]. Но в данном случае перколяция идет не в композиционном слое через диэлектрические гранулы Al_2O_3 , а между слоями через прослойки Si.

Рост намагниченности и коэрцитивной силы с увеличением толщины прослойки Si доказывает, что образование межгранульной полупроводниковой прослойки α -Si:H в многослойной системе приводит к возникновению сильного эффективного обменного взаимодействия между изолированными гранулами ФМ сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, и переходу от

суперпарамагнитного поведения к ферромагнитному. Происходит ли усиление обменного взаимодействия за счет туннелирования электронов кремния, или за счет образования силицидов, на границе ферромагнетика и Si, сказать сложно, и требуется дальнейшее изучение этого вопроса.

В параграфе 5.5 кратко сформулированы выводы этой главы.

В заключении кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Проведено исследование спектральных, полевых и концентрационных зависимостей ЭЭК нанокompозитов аморфный металл–диэлектрик на основе Co.
2. Показано, что для составов из области перколяции ЭЭК в ближнем ИК диапазоне длин волн усиливается на порядок по сравнению с эффектом в металлической фазе. Усиление магнитооптического эффекта связано с трансформациями микроструктуры и топологии гранулированных нанокompозитов.
3. Проведены исследования ФМР для нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$. Показано, что данные по изучению изменений перестройки магнитной структуры в нанокompозитах, полученные ФМР и МО методами хорошо коррелируют между собой.
4. Обнаружено, что магнитооптический отклик возрастает в ряду нанокompозитов с гранулами $\text{CoNbTa} \rightarrow \text{CoFeV} \rightarrow \text{CoFeZr}$. Установлена корреляция между максимальными значениями экваториального эффекта Керра, туннельного магнитосопротивления нанокompозитов и магнитострикции насыщения материала металлических гранул, связанная с возрастанием вклада поляризованных d-электронов в плотность состояний вблизи уровня Ферми и ростом спин-орбитального взаимодействия в ряду нанокompозитов с гранулами $\text{CoNbTa} \rightarrow \text{CoFeV} \rightarrow \text{CoFeZr}$.

5. Впервые изучено влияние давления кислорода в распылительной камере на магнитооптические и магнитные свойства нанокompозитов ФМ металл – сегнетоэлектрик.
6. Обнаружено, что при увеличении давления кислорода в распылительной камере растут поля насыщения и коэрцитивная сила в нанокompозитах $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, а область перколяционного перехода сдвигается к большим концентрациям ФМ компоненты.
7. Установлено, что существует оптимальное значение давления кислорода, при котором достигаются максимальные значения МО отклика и расширяется концентрационная область существования нанокompозитов с большим значением магнитосопротивления.
8. Проведены исследования зависимости магнитооптических и магнитных свойств многослойной наноструктуры $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{aSiH})_{40}$ от толщины металлических и полупроводниковых слоев. Показано, что характер изменений величины и формы спектральных зависимостей ЭЭК немонотонно зависит от толщины полупроводниковых слоев.
9. Впервые исследована зависимость магнитооптических и магнитных свойств от толщины полупроводниковых слоев для многослойной структуры нанокompозит - аморфный гидрогенизированный Si – $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\text{aSiH}]_{30}$.
10. Установлено, что в области толщин Si 1.3 – 1.7 нм наблюдается максимум ЭЭК, намагниченности и коэрцитивной силы. Показано, что наблюдаемое усиление МО эффекта имеет перколяционную природу и связано с возникновением эффективного обменного взаимодействия между ферромагнитными гранулами CoFeZr через межгранульные прослойки кремния.

Публикации по теме диссертации:

1. Buravtsova V. E., Guschin V. S., Kalinin Yu. E., Kirov S. A., Lebedeva E. V., Phonghirun S., Sitnikov A. V., Syr'ev N. E. and Trofimenko I. T. Magneto-optical properties and FMR in granular nanocomposites $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ // CEJP 2(4) 2004, 566-578.
2. Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Гущин В.С., Калинин Ю.Е., Пхонгхирун С., Ситников А.В., Стогней О.В., Сырьев Н.Е. Гигантское магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов металл-диэлектрик // Известия Академии наук, Серия физическая 2003, 67, 7, 918-920.
3. Гущин В.С., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Пхонгхирун С., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Cheol Gi Kim Влияние перколяционных процессов на ферромагнитный резонанс и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов // Известия Академии наук, Серия физическая 2004, 68, 5, 717-719.
4. Вызулин В. А., Буравцова В. Е., Гущин В. С., Ганьшина Е. А., Калинин Ю. Е., Лебедева Е. В., Ситников А. В., Сырьев Н. Е., Пхонгхирун С. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов ферромагнетик-сегнетоэлектрик CoLiNbO_3 // Известия Академии наук, Серия физическая 2006, 70, 7, 949-952.
5. Багмут Т.В., Вызулин С.А., Ганьшина Е.А., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Недух С.В., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Пхонгхирун С. Особенности магнитооптических и магнитных спектров в нанокompозитах $(\text{CO})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ // Нанотехника 2006, 1(5), 13-17.
6. Vashuk M.V., Gan'shina E.A., Phonghirun S., Tulsy I.I., Scherbak P.N., Kalinin Yu.E. Optical and magneto-optical properties of $\{\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}/\text{a-Si}\}_n$ multilayers // Journal of non-crystalline solids 2007, 353, 8-10.
7. Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Гущин В.С., Киров С.А., Калинин Ю. Е., Пхонгхирун С., Ситников А.В. Стогней О.В., Сырьев Н.Е. Магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов металл-диэлектрик // НМММ, Сборник трудов XVIII международной школы-семинара 2002, 187-189.
8. Буравцова В.Е., Гущин В.С., Киров С.А., Лебедева Е.В., Пхонгхирун С., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Перов Н.С. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ // НМММ, Сборник трудов XIX международной школы-семинара 2004, 411-413.

9. Пхонгхирун С., Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Иванова О.С., Калинин Ю.Е., Киров С.А., Ситников А.В. Эволюция магнитооптических свойств нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ при изменении давления кислорода в процессе изготовления // НМММ, Сборник трудов XIX международной школы-семинара 2006, 279-281.
10. Багмут Т.В., Вызулин С.А., Ганьшина Е.А., Лебедева Е.В., Недух С.В., Перов Н.С., Сырьев Н.Е., Пхонгхирун С. Влияние технологии изготовления нанокompозитов $(\text{Co})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ на их магнитные свойства // НМММ, Сборник трудов XX международной школы-семинара 2006, 318-320.
11. Буравцова В.Е., Гущин В.С., Киров С.А., Лебедева Е.В., Пхонгхирун С., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Перов Н.С. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ // The XXI international conference on «Relaxation phenomena in solids (RPS-21)», Voronezh' 2004, 202.
12. Buravtsova V.E., Guschin V.S., Dmitriev A.A., Kalinin Yu.E., Lebedeva E.V., Phonghirun S., Sitnikov A.V., Syr'ev N.E. Influence of the percolation on properties of nanocomposites $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ // Book of Abstracts, MISM 2005, 81-82.
13. Буравцова В.Е., Вызулин С.А., Гущин В.С., Лебедева Е.В., Пхонгхирун С., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов на основе гранул $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$ и $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в диэлектрических матрицах // Сборник трудов Международной конференции излучения и рассеяния электромагнитных волн ИРЭМВ-05, Таганрог, изд.ПРПУ, 2005, 228-229.
14. Вызулин С.А., Искандеров Х.Н., Лебедева Е.В., Пхонгхирун С., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т. Магнитные свойства многослойных пленок $\text{CoFeZr}+a\text{-Si}$ // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах, Труды III Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов. Краснодар, Просвещение-Юг, 2006, 111-112.
15. S.A.Vyzulin, E.A.Gan'shina, E.V.Lebedeva, S. Phonghirun, N.E. Syr'ev. Magneto-optical properties and ferromagnetic resonance in multilayer $\text{CoFeZr}+a\text{-Si}$ films // II International conference "Electronics and applied physics", Kyiv, Ukraine, 2006, 26 – 27.

16. Буравцова В.Е., Гущин В.С., Пхонгхирун С., Ситников А.В., Стогней О.В., Сырьев Н.Е. Гигантское магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов металл–диэлектрик // Сборник трудов Международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO 2002", Сочи, часть I, 43–45.
17. Гущин В.С., Калинин Ю.Е., Киров С.А., Лебедева В.Е., Пхонгхирун С., Ситников А.В., Сырьев Н.Е. Влияние перколяционных процессов на ФМР и МО свойства гранулированных нанокompозитов // Сборник трудов Международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO 2003", Сочи, 88-90.
18. Быков И.В., Гущин В.С., Козлов А.А., Лихтер А.М., Онума С., Пхонгхирун С. Влияние матрицы на магнитооптические и магнитотранспортные свойства гранулированных нанокompозитов // Сборник трудов 7-го Междисциплинарного, международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO 2004", Сочи, 79-81.
19. Буравцова В.Е., Вызулин С.А., Гущин В.С., Лебедева В.Е., Пхонгхирун С., Сырьев Н.Е. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов на основе гранул $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$ и $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в диэлектрических матрицах // Сборник трудов 7-го Междисциплинарного, международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO 2004", Сочи, 83-86.
20. Ганьшина Е.А., Перов Н.С., Пхонгхирун С., Мигунов В.Е., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Усиление магнитооптического отклика в многослойной системе нанокompозит – гидrogenизированный аморфный кремний // Сборник трудов 10-го Междисциплинарного, международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO 2007", Ростов-на-Дону, 149-151.
21. Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Иванова О.С., Калинин Ю.Е., Пхонгхирун С., Ситников А.В. Исследование влияния толщины полупроводниковой прослойки на магнитооптические свойства наногетероструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x/(\text{a-Si})_y]_{40}$ // Сборник трудов 10-го Междисциплинарного, международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO 2007", Ростов-на-Дону, 235-237.

Список цитируемой литературы

1. Mitani S., Fujimori H., Takanashi K., Yakusiji K., Ha J.G., Takahashi S., Maekawa S., Ohnuma S., Kobayashi N., Masumoto T., Ohnuma M., Hono K. Tunnel-MR and spin electronics in metal-nonmetal granular systems // JMMM. 1999. V.198-199. P.179.
2. Slonczewski J.C. Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by tunneling barrier // Physical Review B, 1989, V.39, N.10, P.6995-7002.
3. Быков И.В., Ганьшина Е.А., Грановский А.Б., Гуцин В.С. Магниторефрактивный эффект в гранулированных пленках с туннельным магнитосопротивлением // ФТТ, 2000, 42, 3, 487-491.
4. Ganshina E., Granovsky A., Dieny B., Kumaritova R., Yurasov A. Magneto-optical spectra of discontinuous multilayers Co/SiO₂ with tunnel magnetoresistance // Physica B 299, 2001, 260-264.
5. Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Электрическая проводимость в нанокompозитах аморфных металлических сплавов в диэлектрической матрице // НМММ, Сб. трудов XIX международной школы семинара, 2004, 354-356.
6. Белоусов В.А., Калинин Ю.Е., Королев К.Г. и др. // Вестник ВГТУ, 2007 (в печати).
7. Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н. и др. Эволюция оптических и магнитооптических свойств в нанокompозитах аморфный металл – диэлектрик // ЖЭТФ, 2004, 125, 5, 1172-1183.