

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи

Буравцова Виктория Евгеньевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ
МЕТОДАМИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре общей физики 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 радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Защита состоится «__» декабря 2011 года в _____ часов на заседании диссертационного совета К 501.001.02 Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова по адресу: 119899, ГСП , Москва, Воробьевы Горы, д.1, стр. 35, конференц-зал Центра коллективного пользования физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан «__» ноября 2011 года.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета Д-501.001.70

доктор физико-математических наук,
профессор

Г.С.Плотников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время исследование физических свойств наноразмерных структур является одним из основных направлений физики конденсированного состояния. Устойчивый интерес к наноструктурам обусловлен возможностью модификации и принципиального изменения свойств известных материалов при переходе в нанокристаллическое состояние. Созданные благодаря нанотехнологиям новые наноразмерные магнитные материалы проявляют ряд уникальных свойств: гигантское магнитосопротивление (ГМС), гигантский магнитный импеданс (ГМИ) [1], аномальный эффект Холла (АЭХ) [2], сильный магнитооптический (МО) отклик [3] и аномальные оптические эффекты [4]. Все эти явления открывают огромные перспективы, как для фундаментальных исследований, так и для многообещающих возможностей их применения.

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

В связи с этим актуальными оказываются экспериментальные методы, позволяющие получить представление о внутренней структуре таких материалов и особенностях магнитного взаимодействия в них. Оптические и магнитооптические методы являются наиболее простыми, эффективными и информативными при исследовании наноструктур. Магнитооптические методы обладают рядом достоинств, главное из которых состоит в том, что в отличие от оптических, они чувствительны к спину электрона, что позволяет выделить, к какой

спиновой подзоне относится данный оптический переход. Магнитооптические методы чувствительны к наличию магнитных неоднородностей, к изменению формы и размера частиц, к их объемному распределению и к появлению новых магнитных фаз.

Таким образом, детальные исследования магнитооптических свойств наногетероструктур в зависимости от состава и технологии получения необходимы для понимания общих закономерностей формирования физических свойств наноструктур, что приведет к реализации практических задач, и в первую очередь для конструирования материалов с заданными магнитными и МО параметрами, для разнообразных применений материалов в современных элементах памяти и интегральной оптики, в качестве управляемых элементов оптических трактов и магнитооптических устройств, в лазерной технике и т.д.

Цель работы состояла в исследовании особенностей формирования магнитных и магнитооптических свойств трех групп низкоразмерных материалов — нанокомпозитов ферромагнитный аморфный сплав – диэлектрик; многослойных магниторезистивных структур ферромагнетик–полупроводник, а также сложных магнитополупроводниковых структур на основе гранулированного композита и полупроводника.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. исследование изменения магнитных и магнитооптических свойств многослойных пленок на основе $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}$ и SiC в зависимости от толщины и порядка следования слоев;
2. анализ влияния толщины слоев и их соотношения на магнитные и магнитооптические свойства многослойных пленок аморфный ферромагнетик $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ с прослойками полупроводника — гидрогенизированного аморфного кремния;
3. изучение влияния состава и технологических условий получения нанокомпозитов аморфный ферромагнетик-диэлектрик на их магнитные и магнитооптические свойства;

4. исследование эволюции магнитных и магнитооптических свойств магнитополупроводниковых структур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}/(\alpha\text{-Si:H})]_n$ в зависимости от концентрации Z ферромагнитной (ФМ) фазы в слоях композита и толщины образующих слоев.

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованностью используемых в работе экспериментальных методов изучения магнитных и магнитооптических свойств наноструктур, детальным анализом физических явлений и процессов, определяющих эти свойства, а также корреляций результатов, полученных на различных образцах. В значительной степени достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласованием между экспериментально полученными данными по магнитооптическим свойствам структур и данными, почерпнутыми из литературных источников, по структурным, магнитным и электротранспортным свойствам.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

- Обнаружено, что кривые намагничивания и полярные диаграммы многослойных наногетероструктур $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}/\text{SiC}/\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}$ в области малых магнитных полей сложным образом зависят как от толщины слоев ферромагнетика и полупроводника, так и от величины намагничивающего поля. Установлено, что наблюдаемые особенности связаны с интерфейсными явлениями на границе раздела ферромагнетик–полупроводник.
- Показано, что МО отклик многослойной пленки $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_X(\alpha\text{-Si})_Y]_n$ нелинейно зависит от толщины кремния. Для гибридных магнитных структур, в которых и слой ферромагнетика, и слой полупроводника являются дискретными, наблюдается усиление МО отклика. Эволюция магнитооптических свойств исследованных структур объясняется влиянием диффузного интерфейсного слоя на их микроструктуру.
- Впервые исследована зависимость магнитооптических свойств массивных нанокомпозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}$ и композитов аналогичного химического состава, полученных послойным напылением, в зависи-

мости от толщины напыляемого слоя. Установлено, что микроструктура послойно напыленных композитов существенно отличается от микроструктуры объемных нанокompозитов, а порог перколяции смещается в область меньших значений содержания ФМ фазы.

- Впервые проведено исследование магнитооптических свойств многослойных структур нанокompозит–полупроводник $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}/(\alpha\text{-Si:H})]_n$ в широкой области толщин слоев и концентраций Z магнитной фазы. Установлена корреляция зависимостей магнитных, магнитооптических и транспортных свойств наноструктур от толщины Si. Показано, что в структурах нанокompозит–полупроводник введение тонкой прослойки Si (~ 2 нм) приводит к усилению эффективного магнитного взаимодействия между ФМ гранулами.
- Впервые обнаружены аномалии зависимости магнитооптического отклика от приложенного магнитного поля для многослойных структур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}/(\alpha\text{-Si:H})]_n$, связанные с образованием на интерфейсе ФМгранула–полупроводник нового композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})(\text{Si}+\text{силициды})$.

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

Положения, выносимые на защиту

- Аномальное поведение полевых и ориентационных зависимостей экваториального эффекта Керра и магнитных свойств многослойных пленок на основе пермаллоя и карбида кремния, указывающие на сложный вид их магнитных структур и необходимость учета влияния немагнитной полупроводниковой прослойки на характер взаимодействия ферромагнитных слоев.
- Нелинейная зависимость величины экваториального эффекта Керра (ЭЭК) многослойных структур $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}/\text{Si}$ от толщины слоев полупроводника и

усиление МО отклика в гибридных структурах связаны с влиянием диффузного интерфейса ферромагнетик–полупроводник.

- Микроструктура послойно напыленных композитов существенно отличается от микроструктуры объемных нанокompозитов, размер и форма гранул в нанокompозите зависят от толщины напыляемого слоя.
- В многослойных структурах нанокompозит–полупроводник $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}/(\alpha\text{-Si:H})]_n$ МО отклик определяется конкуренцией вкладов от слоя композита и нового композита, образующегося на интерфейсе: металлическая гранула – полупроводник, концентрация магнитной фазы в котором зависит как от вида и размера гранул в композитном слое, так и скорости образования силицидов.

Личный вклад автора. Автором лично получена основная часть экспериментальных результатов: исследованы магнитооптические спектры, полевые, ориентационные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК) представленных образцов. Магнитные характеристики симметричных $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}/\text{SiC}/\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}$ и ассиметричных $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}/\text{Ti}/\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}/\text{SiC}$ наногетероструктур исследовались индукционным методом в Институте Проблем Управления им. В. А. Трапезникова РАН д.т.н. Касаткиным С.И. Данные по микроструктуре и удельному электрическому сопротивлению гранулированных и многослойных пленок на основе ферромагнитных сплавов $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$, $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$, диэлектриков SiO_2 , Al_2O_3 , и полупроводника Si были получены в Воронежском Государственном Университете в лаборатории д.ф.-м.н. Калинина Ю.Е. Исследование намагниченности и петель гистерезиса многослойных структур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}/(\alpha\text{-Si:H})]_n$ с композитом до порога перколяции проводилось на физическом факультете МГУ им. М.В.Ломоносова в лаборатории д.ф.-м.н. Перова Н.С.; с композитом в районе порога перколяции — авторами [5]. Обсуждение и анализ полученных экспериментальных результатов проводились авторами соответствующих работ совместно.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: XVIII, XIX, XX и XXI Международных школах-семинарах «Новые магнитные материалы микро-

электроники» (Москва, 2002, 2004, 2006 и 2009 гг.); «Московском Международном симпозиуме по магнетизму MISM»; (Moscow, MSU, 2005, 2008, 2011 г.); «Проблемы магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах» (Астрахань, 2003 г.); «EASTMAG-2004, Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» (Красноярск 2004 г. и Екатеринбург 2010 г.); Междисциплинарном, международном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов ODPO » (Сочи, 2002, 2004, 2007, 2008 гг); II Байкальской международной конференции «Магнитные материалы» (Иркутск, 2003); International Conference on Relaxation Phenomena in solids (RPS-21, Воронеж, 2004); 4-ой межрегиональной молодежной школе «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2005 г.); международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ – 2005г.» (Таганрог 2005 г.); Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ, Новосибирск, 2006, 2007 гг); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам (Ломоносов 2008, 2010 и 2011, секция физика).

Публикации по теме диссертации. Содержание работы полностью отражено в 35 печатных работах: 6 статей в рецензируемых журналах, 3 из которых – в журналах из списка ВАК, а также в тезисах и материалах 29 докладов на международных конференциях

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 165 страниц, включает 54 рисунка, 2 гистограммы, 8 таблиц и 165 библиографических ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и дана краткая характеристика разделов диссертации.

Первая глава посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ по изучению магнитных, магнитооптических и электрических свойств гранулированных сплавов и многослойных пленок.

Вторая глава посвящена феноменологическому описанию магнитооптических эффектов, приведена классификация магнитооптических эффектов. Обсуждаются основные модели, использующиеся при описании магнитооптических свойств низкоразмерных структур: многослойных пленок и нанокomпозитов ферромагнитный металл-диэлектрик.

В третьей 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 до 2,5 кЭ. Приводится блок-схема установки и алгоритм программного обеспечения.

Четвертая глава посвящена методам приготовления исследуемых структур. Пленки нанокomпозитов аморфный ферромагнитный сплав ($\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ и $\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2$) в диэлектрической матрице были получены методом ионно-лучевого распыления составных мишеней на неподвижные подложки. При одновременном распылении металлического сплава и диэлектрика из составной мишени с переменным расстоянием между пластинами кварца в едином технологическом цикле формировалась гранулированная структура с широким и непрерывным набором концентраций металлической фазы. Значения концентраций металлической фазы Z находились в интервале от 30 до 65 атомных процентов. По данным электронно-микроскопических исследований полученные композиты представляли собой аморфные металлические гранулы размером от 2 до 7 нм (в зависимости от химического состава и соотношения фаз), распределенные в аморфной диэлектрической матрице. Меньший размер гранул соответствует меньшим концентрациям металлической фазы, больший размер характерен для образцов с концентрацией Z выше 60 ат. %. Полученные в процессе роста гранулы не абсолютно изолированы в диэлектрической матрице (даже в случае высокой концентрации SiO_2), а образуют небольшие конгломераты и цепочки, которые, в свою очередь, формируют лабиринтную структуру.

Все многослойные пленки изготавливались послойным напылением, где толщина слоев определялась по скорости осаждения вещества. Большинство исследованных в настоящей работе серий образцов многослойных структур были

напылены с использованием V-образного экрана, так что на подложке формировалась структура с непрерывным изменением толщины слоев [6].

Пятая глава носит оригинальный характер и посвящена исследованию магнитооптических свойств многослойных наноструктур пермаллой–карбид кремния.

В параграфе 5.1 описаны магнитные свойства и параметры исследованных образцов.

В параграфах 5.2-5.3 представлены результаты исследования спектральных, полевых и ориентационных зависимостей ЭЭК многослойных пленок $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}/\text{SiC}/\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}$. Установлено, что во всем исследуемом частотном диапазоне с ростом толщины слоя ферромагнетика (при фиксированных толщинах полупроводника) значения ЭЭК изменяются практически линейно, а при изменении толщины полупроводника (при фиксированных толщинах ферромагнетика) обнаружены нелинейные изменения ЭЭК.

Исследование полевых и ориентационных зависимостей ЭЭК многослойных пленок показало наличие ряда аномалий, состоящих в задержках роста эффекта при увеличении напряженности внешнего магнитного поля H и развороте ОЛН от направления $\alpha = 60^\circ$ к 120° в области малых полей H . На рисунках 1–2 представлены ориентационные и полевые зависимости ЭЭК для двух образцов с толщиной ФМ слоя $X = 3$ и 2 нм и толщиной полупроводникового слоя $Y = 3$ и $0,9$ нм соответственно. Для этих образцов аномалии проявляются наиболее ярко. Полученные результаты приводят к заключению, что в образцах с большими толщинами полупроводниковой прослойки слои ферромагнетика не являются обменно-связанными и каждый слой намагничивается внешним магнитным полем независимо. При уменьшении толщины прослойки SiC слои FeNi взаимодействуют через полупроводник, и эта связь увеличивается с утоньшением слоя.

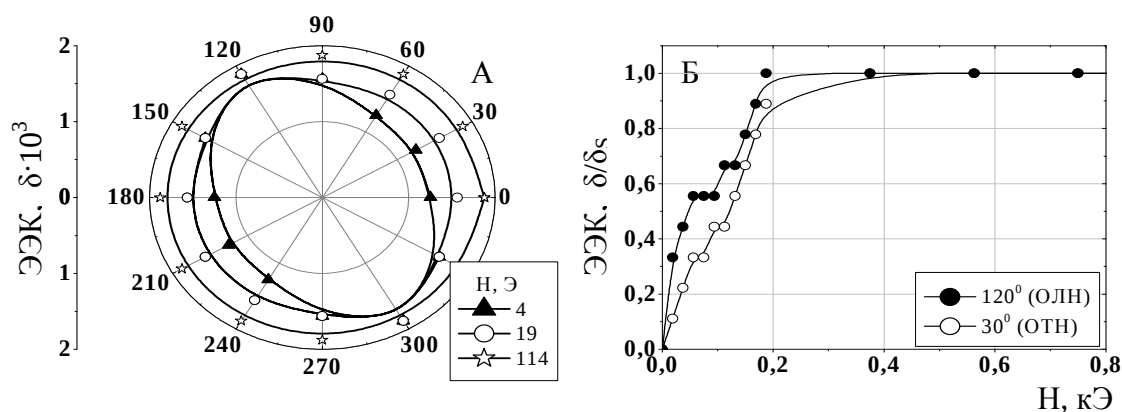


Рис.1. А – Полярные диаграммы ЭЭК наноструктуры ($X = 3$ нм, $Y = 3$ нм). Б – Полевая зависимость. $h\nu = 2,16$ эВ.

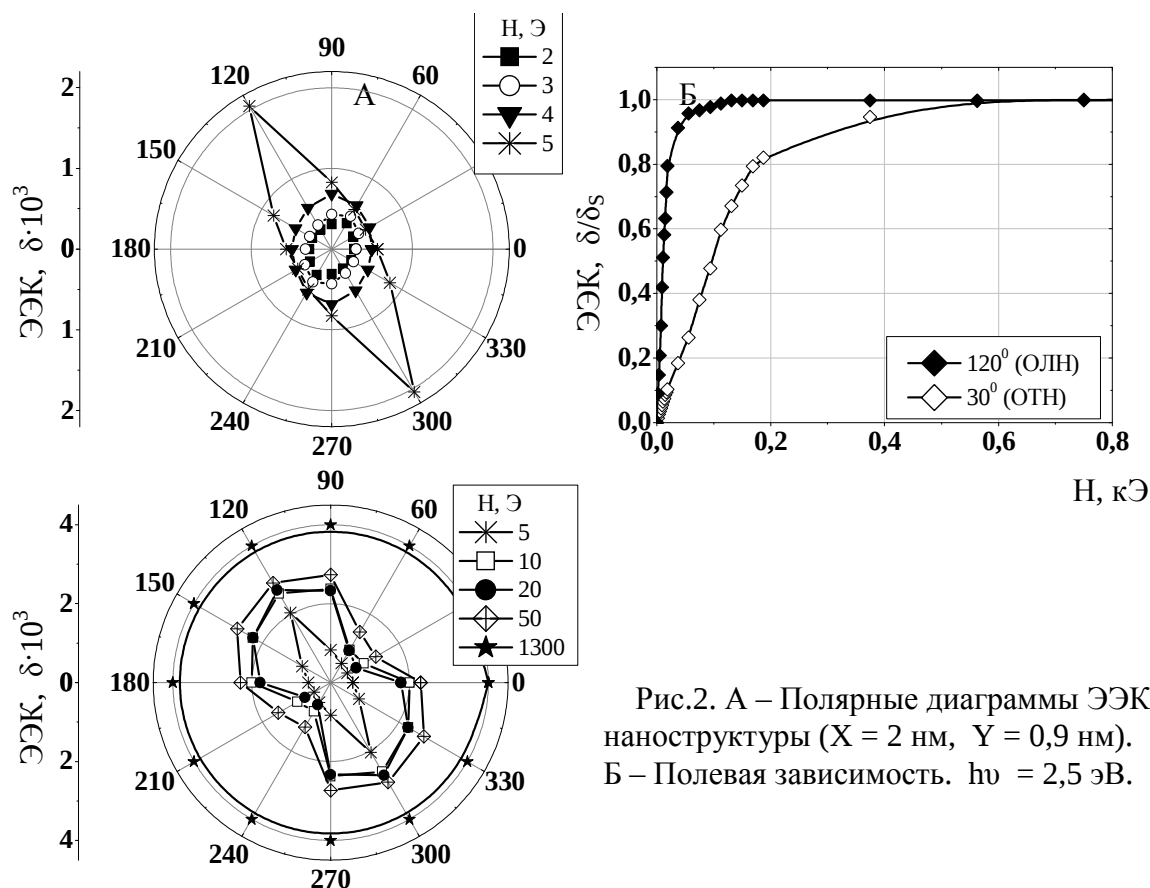


Рис.2. А – Полярные диаграммы ЭЭК наноструктуры ($X = 2$ нм, $Y = 0,9$ нм). Б – Полевая зависимость. $h\nu = 2,5$ эВ.

В параграфе 5.4 представлены результаты исследования МО свойств асимметричных наноструктур $\text{FeNi}(2\text{нм})/\text{Ti}(d)/\text{FeNi}(2\text{нм})$ со слоями полупроводника $\text{SiC}(2,1\text{ нм})$ сверху или снизу многослойной пленки. Толщины слоев титана изменялись и составляли $d_{\text{Ti}} = 1,5; 2,5; 3,5; 5$ нм, что позволило варьировать величину магнитного взаимодействия между ферромагнитными слоями.

Форма спектров ЭЭК у асимметричных структур подобна, однако эффект различается по величине — магнитооптический отклик образца, где слой полу-

проводника находился сверху пленки, почти в 1,5 раза больше во всем диапазоне длин волн, чем для образца, где SiC располагался внизу многослойки.

Для ассиметричных структур FeNi/Ti/FeNi/SiC наблюдались и различия в ориентационных и полевых зависимостях ЭЭК. В образцах с порядком следования слоев ПП/Ф/Ti/Ф обнаруживается одноосная анизотропия. ОЛН не меняет своего направления при увеличении напряженности магнитного поля H . В случае образца с обратным порядком следования слоев Ф/Ti/Ф/ПП наблюдается сложная эволюция полярных диаграмм $\delta(\alpha)$ и кривых намагничивания, измеряемых для разных направлений. Характер анизотропии не поддается простому описанию.

Обнаруженное поведение ориентационных зависимостей ЭЭК $\delta(\alpha)$ и соответствующих этим диаграммам спектров $\delta(H)$, а также данные магнитно-индукционных измерений могут быть объяснены, если предположить, что существует эффективное магнитное взаимодействие между ферромагнитными и полупроводниковыми слоями. Это взаимодействие может возникнуть, если в области контакта пермаллоя и карбида кремния происходит взаимная диффузия атомов и образуется интерфейс (1 – 2 атомных слоя) с магнитным упорядочением атомов. Образование такого переходного слоя – суперинтерфейса – должно приводить к установлению дополнительного магнитного взаимодействия между ним и ферромагнетиком, что должно оказывать заметное влияние на магнитные параметры структур, процессы перемагничивания и на их МО свойства.

В параграфе 5.5 кратко изложены основные результаты этой главы.

Шестая глава посвящена исследованию магнитооптических свойств многослойных наноструктур ферромагнетик – аморфный гидрогенизированный кремний $[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})(X)/(a-Si:H)(Y)]$ с числом бислоев 40.

В параграфе 6.1 описаны параметры исследованных образцов и приведены данные об их электротранспортных свойствах.

В параграфе 6.2 приведены результаты исследований МО отклика системы в зависимости от толщины образующих слоев. Установлено, что характер частотной зависимости и величина ЭЭК сильно зависят от толщины как слоев

полупроводника, так и слоев ферромагнетика. Показано влияние слоев ферромагнетика на магнитное состояние полупроводника и образование на интерфейсах выращенных структур тонких переходных слоев, обогащенных атомами обоих слоев, а также возникновение новой фазы в образцах — силицидов металлов. На рис. 3 приведены спектры ЭЭК и зависимость ЭЭК от толщины полупроводниковой прослойки для структур с толщиной ФМ слоя менее 2 нм. Для этих структур наблюдается спектр, характерный для нанокомпозитов. Для гибридных магнитных пленок, в которых и слой ферромагнетика, и слой полупроводника являются дискретными, наблюдается усиление магнитооптического отклика.

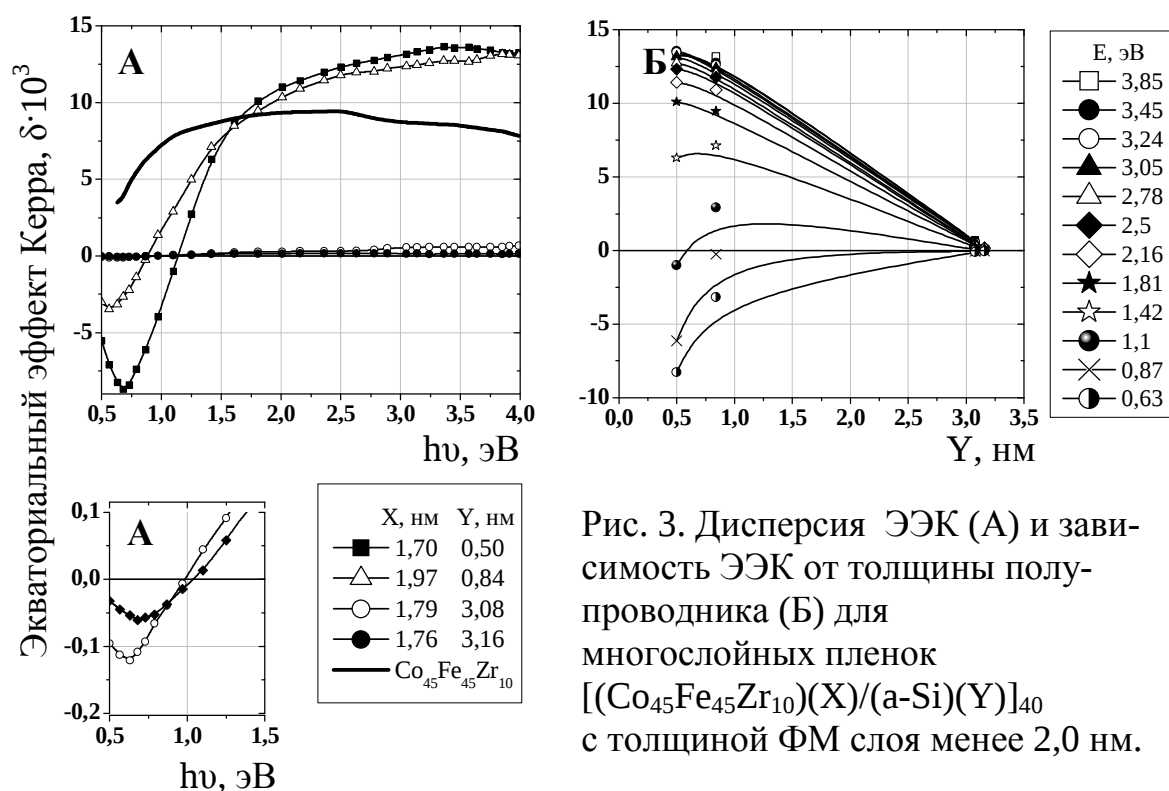


Рис. 3. Дисперсия ЭЭК (А) и зависимость ЭЭК от толщины полупроводника (Б) для многослойных пленок $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})(\text{X})/(\text{a-Si})(\text{Y})]_{40}$ с толщиной ФМ слоя менее 2,0 нм.

Для структур с толщиной ферромагнитного слоя от 2 до 2,2 нм спектры ЭЭК лежат в области положительных значений эффекта для соотношения $X/Y > 0,7$. При $X/Y = 0,7$ наблюдается отрицательный знак ЭЭК в ИК области спектра, что указывает на нарушение непрерывности слоя ферромагнетика. Это можно связать с проникновением кремния в некоторых областях пленки на всю толщину ферромагнитного слоя при достаточном количестве полупроводника. Дискретные слои ферромагнетика отсутствовали при толщинах ферромагнети-

ка более 2,2 нм и при $X/Y < 0,7$. Таким образом, можно определить, что характерная толщина силицидного слоя порядка 2 нм.

В параграфе 6.3 кратко изложены основные результаты этой главы.

В седьмой главе представлены результаты исследования магнитооптических свойств гранулированных наноструктур ферромагнитный металл – диэлектрик в зависимости от химического состава ферромагнитных гранул ($\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ и $\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2$) и технологии их изготовления.

В параграфе 7.1 описаны параметры исследованных образцов и данные электронно-микроскопических исследований массивных нанокompозитов. Приведены данные исследования микроструктуры нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{SiO}_2)_{100-Z}$ с различной концентрацией Z.

Исследования микроструктуры и удельного электросопротивления указывают на то, что во всех исследуемых системах образовывался наногранулированный композит металл-диэлектрик. Металлическая фаза композитов имеет аморфную структуру [7], следовательно, основная часть аморфизаторов (B, Zr, Ta, Nb) сохраняется в сплавах.

В параграфе 7.2 приведены результаты исследования спектральных, полевых и концентрационных зависимостей ЭЭК объемных нанокompозитов $(\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2)_Z(\text{SiO}_2)_{100-Z}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_Z(\text{SiO}_2)_{100-Z}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{SiO}_2)_{100-Z}$.

Обнаружено, что форма спектров ЭЭК изучаемых композитных материалов значительно отличается от формы спектров ЭЭК аморфных ферромагнитных сплавов свидетелей: появляется отрицательный по знаку эффект и при увеличении концентрации ФМ фазы максимум отрицательного эффекта сдвигается в ИК область длин волн. Спектры ЭЭК нанокompозитов всех систем имеют одинаковые (подобные) частотные зависимости, отличаясь в деталях, а именно, по величине эффекта, а также по положению максимумов и нулевых значений эффекта [7-13]. Исследование концентрационных зависимостей ЭЭК в ИК области спектра показало, что зависимость $\delta(Z)$ носит немонотонный характер с ярко выраженным максимумом в области перколяции. Полевые зависимости

ЭЭК при этом эволюционируют от суперпарамагнитного к ферромагнитному виду.

Исследование магнитосопротивления (МС) и магнитострикции для тех же образцов выявило корреляцию между максимальными значениями гигантского магнитосопротивления, экваториального эффекта Керра и магнитострикции металлической фазы, из которой сформированы гранулы [13]. При линейном увеличении значений магнитострикции насыщения ферромагнитных включений с переходом от $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$ к $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ и далее к $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ линейно увеличиваются и МС, и ЭЭК, что обусловлено одним и тем же механизмом и может быть связано с возрастанием вклада d-электронов и величины спин-орбитального взаимодействия в цепи нанокмполитов с гранулами $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$, $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ и $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$. Наличие корреляции между максимумом в концентрационной зависимости эффекта Керра, наблюдающимся вблизи порога перколяции в ближней ИК области, и концентрационным максимумом магнитосопротивления позволяет МО методами достаточно точно определять порог перколяции в нанокмполитах по максимальным значениям эффекта в ИК области спектра, и по появлению нелинейной зависимости ЭЭК от магнитного поля для кривых $\delta(H)$.

Объединяя результаты исследования объемных композитов с различным химическим составом гранул в матрице оксида кремния, можно сказать, что наиболее перспективным для использования является композит на основе $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, т.к. имеет наибольший МО отклик в области порога перколяции и намагничивается при меньших значениях приложенного поля по сравнению с другими композитами.

В параграфе 7.3 представлены результаты исследования спектральных, полевых и концентрационных зависимостей ЭЭК послойно напыленных нанокмполитов. На рис. 4 представлены спектры и полевые зависимости ЭЭК для образцов с концентрацией ФМ фазы до порога перколяции и с толщинами образующих слоев $\sim 1\text{--}2$ нм, $2\text{--}4$ нм и массивного свидетеля $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}$ с толщиной слоя ~ 400 нм. Обнаружено, что характер

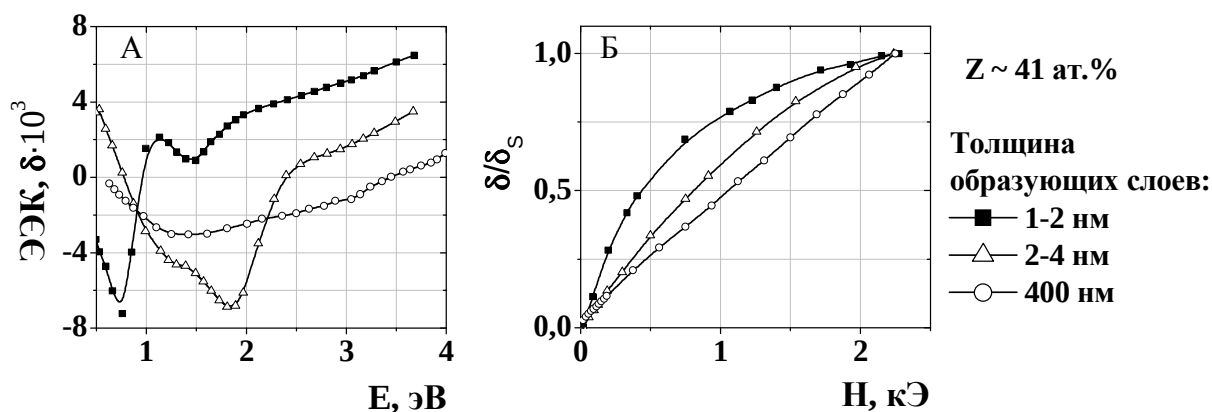


Рис. 4. А – спектры ЭЭК и Б – полевые зависимости (нормированные значения на значение ЭЭК в максимально достижимом поле) для послойно напыленных структур с толщинами образующих слоев 1 – 4 нм и массивного свидетеля $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}$ (400 нм).

зависимости $\delta(h\nu)$ для послойно напыленных нанокompозитов и массивного нанокompозита различны в области концентраций до и в районе порога перколяции в объемном композите. При увеличении концентрации Z до 64 ат.% спектры ЭЭК композитов, напыленных послойно, становятся подобны зависимости $\delta(h\nu)$ для массивного нанокompозита с $Z \sim 60$ ат.%. Обнаружено, что послойно напыленные композиты являются более магнитомягкими, чем объемный композит $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}$.

Из магнитооптических данных установлено, что перколяционный переход в послойно напыленных композитах сдвигается в область меньших концентраций ФМ фазы Z при уменьшении толщины напыляемого слоя.

Для некоторых послойно напыленных композитов с толщинами слоев ~ 1 -2 нм обнаружены аномальные полевые зависимости ЭЭК (рис. 5), свидетельствующие о том, что структуры, полученные методом последовательного напыления слоев, являются магнито-неоднородными. То есть, в процессе изготовления образуются не только гранулы меньших размеров, чем в объемном композите, но и достаточно большие кластеры, состоящие из металлических гранул CoFeZr , которые дают свой вклад в МО отклик всей системы. Показано, что аномальная кривая $\delta(H)$ является суммой вкладов от двух различных в магнитном отношении фаз: ферромагнитной и суперпарамагнитной, при этом суперпарамагнитные гранулы дают ЭЭК одного знака, а ферромагнитные про-

тывоположного. Таким образом, в малом поле возникает резкое насыщение для ферромагнитной фазы, а при увеличении напряженности магнитного поля начинает намагничиваться суперпарамагнитная фаза, для которой ЭЭК имеет другой знак, что и приводит к уменьшению суммарного магнитооптического отклика с ростом поля. Учитывая, что во всем исследованном диапазоне энергий ЭЭК для сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ имеет положительный знак, а для нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_Z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-Z}$ в области до порога перколяции — отрицательный, можно предположить, что ФМ вклад в малых полях связан с перемагничиванием больших кластеров $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, а суперпарамагнитный (в больших полях) с намагничиванием всего нанокompозита.

Полученные экспериментальные результаты для послойно напыленных нанокompозитов, свидетельствуют о том, что размер и форма гранул в нанокompозитном слое зависят от толщины напыляемого слоя; а микроструктура слоев существенно отличается от микроструктуры объемного нанокompозита.

В параграфе 7.4 кратко изложены основные результаты этой главы.

Восьмая глава посвящена изучению магнитооптических свойств многослойных наноструктур на основе нанокompозита и полупроводника. Приведенные в этой главе результаты исследования многослойных структур были получены с целью выяснения влияния толщины как композитного, так и полупроводникового слоев, а также концентрации ФМ фазы в композите на образование интерфейса и его влияния на магнитные и МО свойства многослойных структур. Для решения поставленных задач были изучены три группы образцов: 1. Многослойные структуры с различными толщинами нанокompозита и с различным

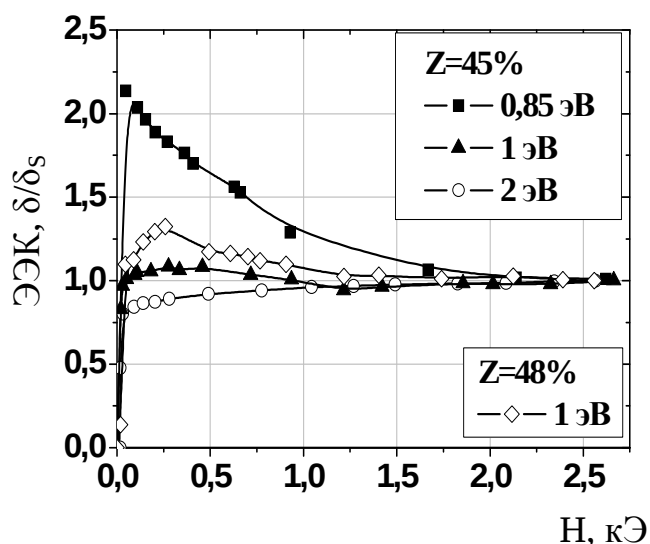


Рис.5 Аномальные полевые зависимости ЭЭК для образцов с толщинами слоев $\sim 1\text{-}2$ нм (приведенные значения).

содержанием ФМ фазы в нем. 2. Многослойные пленки на основе нанокompозита с содержанием ФМ фазы до порога перколяции. 3. Многослойные пленки на основе нанокompозита с содержанием ФМ фазы в районе порога перколяции.

В параграфе 8.1 описаны параметры исследованных образцов

В параграфе 8.2 представлены результаты исследования МО свойств многослойных пленок $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-z}(\text{X})/\alpha\text{-Si:H}(\text{Y})]_n$ с различной толщиной образующих слоев и различным содержанием ферромагнитной фазы в слоях композита с целью выяснить, при каких критических толщинах число контактов гранула-полупроводник минимально. Установлено, что характер частотной зависимости и величина ЭЭК сильно зависят от толщины слоев полупроводника, толщины и концентрации ФМ фазы слоев гранулированного ферромагнетика. МО методом показано, что при уменьшении толщины композитного слоя число контактов $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10} - \text{Si}$ увеличивается. Увеличение числа гранул ферромагнетика, контактирующего с кремнием приводит с одной стороны к росту кластеров гранула-кремний-гранула, увеличивающих ЭЭК, с другой, к уменьшению ЭЭК за счет уменьшения концентрации ФМ фазы во всем образце, в том числе из-за образования новых химических соединений — немагнитных силицидов металлов на границе ферромагнитная гранула-кремний.

В параграфе 8.3 представлены результаты изучения многослойных пленок $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-z}/\text{Si}$ с концентрацией ФМ фазы Z в композите ниже порога перколяции, с различными толщинами как композитных, так и полупроводниковых слоев. Исследование полевых зависимостей ЭЭК в ближней ИК-области показало, что их поведение имеет аномальный вид и существенно отличается от кривых $\delta(H)$, полученных в видимой области. Для некоторых образцов наблюдалась смена знака эффекта при увеличении напряженности внешнего магнитного поля H и эффект в локальном максимуме мог превышать в 3 раза эффект в насыщении (рис 6). Смена знака эффекта отсутствовала на полевых зависимостях для тех же образцов, полученных при $h\nu = 2$ эВ. Аномальное поведение кривых намагничивания и разница в виде $\delta(H)$ для различных длин волн исчезали при увеличении толщины слоев Si.

Для образцов с толщиной прослоек композита менее 2 нм, наблюдается спектр ЭЭК, подобный спектру нанокompозитов, напыленных послойно, описанных в 7 главе. Введение кремния (0,18–0,41 нм) приводит к сильному изменению вида зависимости $\delta(h\nu)$, заключающееся в сдвиге локального максимума эффекта в область меньших энергий световых квантов, с одновременным уменьшением амплитуды отрицательного по знаку эффекта. Для образцов с $X = 2 - 4,37$ нм эффект был положителен во всем диапазоне длин волн и имел сходство со спектрами, полученными для структур $[\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}(\text{X})/\text{Si}(\text{Y})]_n$ с толщинами слоев порядка 3 – 4 нм [14]. Изменение толщины прослойки кремния приводит к нелинейному изменению величины ЭЭК, причем для близких по толщине слоев композита образцов эффект может отличаться в несколько раз. При увеличении толщины прослоек композита более 4,63 спектры ЭЭК многослойных структур были подобны спектрам композита $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в диэлектрической матрице с концентрацией ФМ фазы Z за порогом перколяции [7,9].

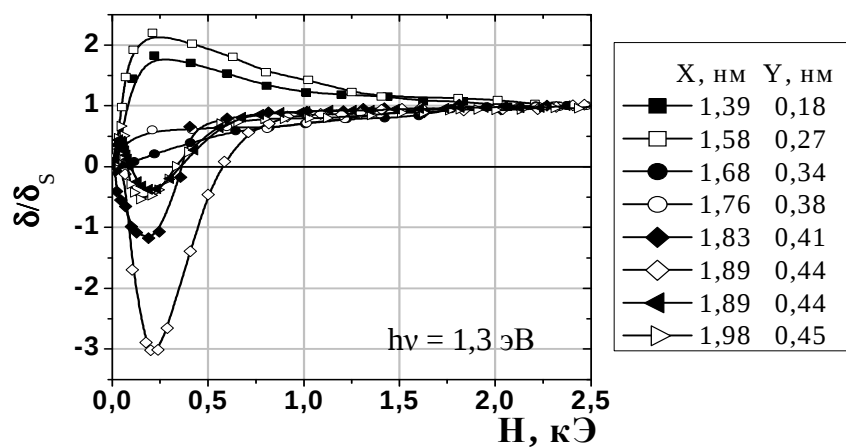


Рис. 6. Полевые зависимости ЭЭК многослойных структур $(\text{CoFeZr})_z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-z}/\text{Si}$ (нормированные значения эффекта).

Для более детального исследования влияния интерфейса на границе композит-полупроводник на МО свойства пленок были исследованы спектральные зависимости ЭЭК в малых полях, при этом величина магнитного поля выбиралась в точке наибольшего проявления аномалии на кривой $\delta(H)$. Обнаружено, что спектры в малых полях сильно отличаются от спектров, полученных при $H = 2,5$ кЭ и подобны спектрам ЭЭК композита $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в диэлектрической матрице [7,9], а вид спектров в малых полях изменяется в зависимости от соотношения толщин X/Y . Разностные спектры ЭЭК образцов (из спектра, полу-

ченного при 2,5 кЭ вычитали спектр, полученный в малом поле) подобны спектрам многослойных структур $[\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}(\text{X})/\text{Si}(\text{Y})]_n$ с толщинами слоев более 3 нм [14] (рис.7, 8).

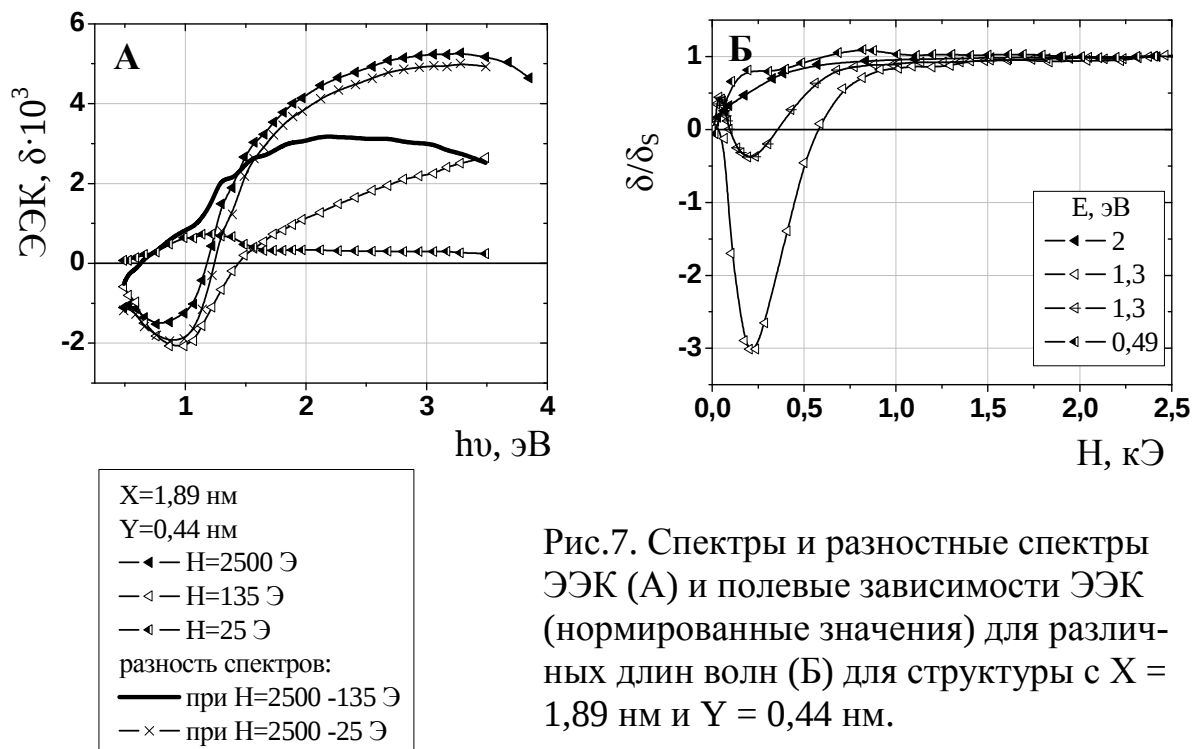


Рис.7. Спектры и разностные спектры ЭЭК (А) и полевые зависимости ЭЭК (нормированные значения) для различных длин волн (Б) для структуры с $X = 1,89 \text{ нм}$ и $Y = 0,44 \text{ нм}$.

Области толщин X и Y при которых происходит anomальное изменение магнитных и магнитооптических свойств хорошо коррелируют с резкими изменениями в электрических свойствах каждой серии и обусловлены структурными особенностями роста полупроводниковой прослойки на композиционном слое. То есть и падение сопротивления на 2-3 порядка и аномалии в поведении магнитных и магнитооптических свойств имеют перколяционную природу.

Из зависимостей $\rho(Y)$ следует, что изменение транспортных свойств МС в области малых толщин кремния можно связать с образованием и ростом межгранульной прослойки Si на ФМ гранулах CoFeZr. То есть на интерфейсе ФМ гранула - полупроводник будет происходить образование нового композита (CoFeZr)-Si или (CoFeZr)- силициды+Si, концентрация магнитной фазы в котором зависит, как от вида и размера гранул в композитном слое, так и от отношения X/Y и скорости образования силицидов. Увеличение толщины слоя кремния

в области толщин до перколяции будет приводить к объединению соседних гранул через островки кремния и/или силициды как внутри композитного слоя, так и между соседними магнитными слоями и, следовательно, к увеличению концентрации магнитной фазы в сложном композите $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})\text{--Al}_2\text{O}_3\text{+Si+силициды}$. Этим можно объяснить рост намагниченности и ЭЭК при добавлении кремния в мультислойные системы.

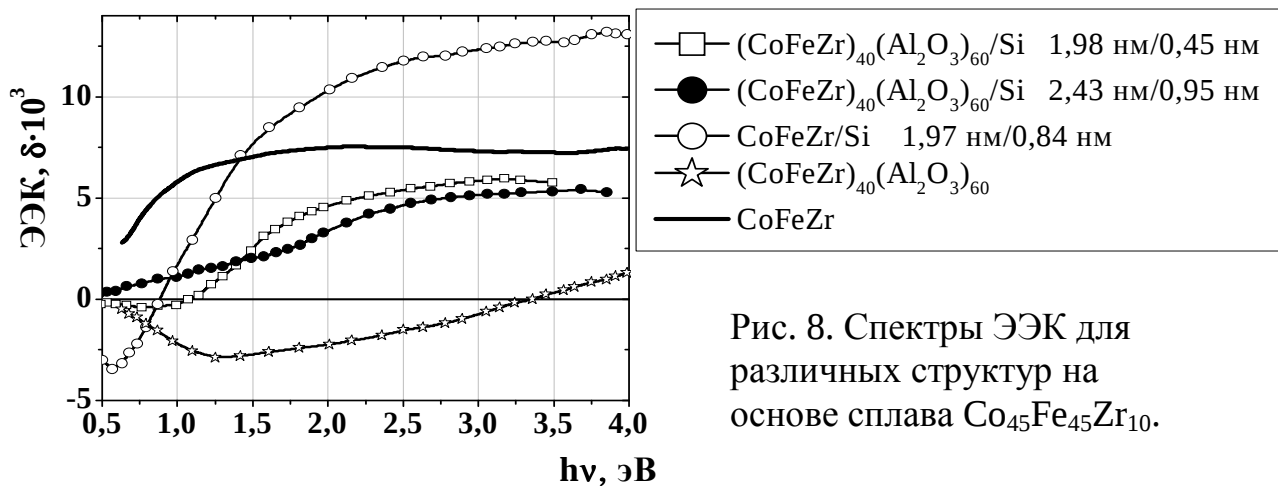


Рис. 8. Спектры ЭЭК для различных структур на основе сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$.

Аномальное поведение в ближней ИК-области связано с конкуренцией вкладов от двух композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})\text{--Al}_2\text{O}_3\text{+Si+силициды}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})\text{--Si+силициды}$, которые в этой области спектра имеют разные знаки (рис. 8).

В параграфе 8.4 представлены результаты исследования многослойных структур со слоями нанокompозита в районе порога перколяции. Обнаружена сильная зависимость МО свойств от толщин как нанокompозита, так и полупроводника. Характер спектров ЭЭК образцов с толщинами прослоек кремния более 2 нм существенно отличается от спектров структур с $Y < 2$ нм. Величина эффекта для этих образцов много меньше, чем для структур, с тонкими слоями полупроводника.

Для некоторых образцов с толщинами Y в диапазоне 2,62–3,31 нм обнаружена аномальная зависимость ЭЭК от приложенного магнитного поля — в полях напряженностью 100 – 400 Э происходит смена знака эффекта. Области толщин X и Y при которых происходит аномальное изменение магнитных и

магнитооптических свойств хорошо коррелируют с резкими изменениями в магнитных и электрических свойствах каждой серии.

В рамках высказанных ранее предположений об образовании на интерфейсе гранула – полупроводник появления нового композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})(\text{Si} + \text{силициды})$, свойства которого зависят от параметров напыляемых прослоек композита и кремния, объясняются магнитные и магнитооптические свойства многослойных пленок с концентрацией ФМ фазы в композите в области порога протекания.

Показано, что использование гранулированного ферромагнетика в качестве прослойки в многослойных пленках не приводит к изоляции гранул ферромагнетика от контактов с полупроводником, независимо от толщин как композита, так и полупроводника. Получившийся интерфейс, существенно влияющий на МО свойства многослойных структур довольно сложно описать из-за множества факторов, влияющих на его образование и структуру.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Наиболее существенными научными результатами работы являются следующие:

- Получены новые экспериментальные данные об аномальном поведении, полевых и ориентационных зависимостях экваториального эффекта Керра и магнитных свойств многослойных пленок на основе пермаллоя и карбида кремния, указывающие на сложный вид их магнитных структур и необходимость учета влияния немагнитной полупроводниковой прослойки на характер взаимодействия ферромагнитных слоев.
- Обнаружены нелинейная зависимость МО свойств многослойных пленок на основе сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ и аморфного гидрогенизированного кремния от толщины слоев и усиление магнитооптического отклика в гибридных структурах, связанные с влиянием интерфейса ферромагнетик–полупроводник.
- Показано влияние технологии изготовления на МО свойства нанокompозитов ферромагнетик–диэлектрик. Установлено, что микроструктура послой-

но напыленных нанокompозитов существенно отличается от микроструктуры объемных нанокompозитов, а порог перколяции смещается в область меньших значений содержания ФМ фазы.

- Впервые проведено исследование магнитооптических свойств многослойных структур нанокompозит–полупроводник $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-z}/\text{Si}$ в широкой области толщин слоев и концентраций Z магнитной фазы. Обнаружено, что в структурах нанокompозит–полупроводник введение тонких слоев Si (до 2 нм) приводит к усилению эффективного магнитного взаимодействия между гранулами $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$.
- Установлено, что на интерфейсе магнитная гранула–кремний происходит образование нового композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})(\text{Si}+\text{силициды})$, концентрация магнитной фазы в котором зависит, как от вида и размера гранул в композитном слое, так и от скорости образования силицидов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. В.Е.Буравцова, Е.А.Ганьшина, В.С.Гущин, Ю.Е.Калинин, С.Пхонгхирун, А.В.Ситников, О.В.Стогней, Н.Е.Сырьев. Гигантское магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов металл-диэлектрик// Известия Академии Наук, серия физическая, Т67, №7, с.918-920, 2003.
2. V.E. Buravtsova, E.A. Gan'shina, V.S. Guschin, S.I. Kasatkin, A.M. Muravjev, F.A. Pudonin. Investigations of magnetic and magnetooptic properties of nanoheterostructures with NiFe and SiC layers //Microelectronic Engineering. 2003. V.69. N.2–4. P. 279–282.
3. В.Е.Буравцова, Е.А.Ганьшина, В.С.Гущин, С.И.Касаткин, А.М.Муравьев, Н.В.Плотникова, Ф.А.Пудонин. Магнитные и магнитооптические свойства многослойных наноструктур ферромагнетик–полупроводник// Физика твердого тела, 2004, Т 46, вып.5, с.864 – 874.
4. Victoria E. Buravtsova, Vladimir S. Guschin, Yuri E. Kalinin, Sergey A. Kirov, Eugenia V. Lebedeva, Songsak Phonghirun, Alexander V. Sitnikov, Nikolay E. Syr'ev and Igor` T. Trofimenko. Magneto optical properties and FMR in granular nanocomposites $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ // CEJP V2, №4, 2004, pp. 566-578.
5. В.Е. Буравцова, Е.А. Ганьшина, А.А. Дмитриев, О.С. Иванова, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. Магнитооптические свойства аморфных многослойных пленок.// Известия Академии Наук, серия физическая, Т73, №9, с. 1374–1376 (2009).
6. V. Buravtsova, E. Gan'shina, E. Lebedeva, N. Syr'ev, I. Trofimenko, S. Vyzulin, I. Shipkova, S. Phonghirun, Yu. Kalinin and A. Sitnikov. The features of TKE and FMR in nanocomposite-semiconductor multilayers.// Solid State Phenomena Vols. 168-169 (2011) pp 533-536
7. В.Е.Буравцова, С.Пхонгхирун, А.В.Ситников, О.В.Стогней, Н.Е.Сырьев. Гигантское магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов металл-диэлектрик. Межд. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». Сочи. 9-12 сент. 2002. Сборник трудов, часть I, с.43-45.

8. В.Е.Буравцова, Е.А.Ганьшина, В.С.Гущин, Ю.Е.Калинин, С.Пхонгхирун, А.В.Ситников, О.В.Стогней, Н.Е.Сырьев, Гигантское магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных композитов металл–диэлектрик. Труды XVIII- школы-семинара НМММ-18 (2002) Москва., стр.187-189.
9. В.Е.Буравцова, В.С.Гущин, С.И.Касаткин, А.М.Муравьев, Ф.А.Пудонин. Магнитные и магнитооптические свойства наногетероструктур на основе FeNi и SiC. Труды XVIII-школы семинара НМММ-18 (2002) Москва, стр. 240–242.
10. V.A.Buravtsova, E.A.Gan'shina, V.S.Guschin, Yu.E.Kalinin, A.V.Sitnikov, O.V.Stognei, N.E.Syr'ev. Influence of magnetostriction on magnetooptical properties and giant magnetoresistance of nanocomposites.. Moscow International Symposium on Magnetism, 2002, Program, p.27
11. V.E.Buravtsova, E.A.Gan'shina, V.S.Guschin, S.I.Kasatkin, A.M.Muravjev, F.A.Pudonin. Magnetic and magneto-optic properties of FeNi-SiC-FeNi nanoheterostructures. Moscow International Symposium on Magnetism, 2002, Program, p.72.
12. В.Е.Буравцова, С.А.Вызулин, В.В.Запорожец, Ф.А.Пудонин, Н.Е.Сырьев. Ферромагнитный резонанс в наноструктурах ферромагнетик-полупроводник. Тезисы НМММ, Астрахань, 2003, 132.
13. Л.А.Ажаева, В.Е.Буравцова, Е.А.Ганьшина, В.С.Гущин, С.И.Касаткин, А.М.Муравьев, Н.В.Плотникова, Ф.А.Пудонин, С.Пхонгхирун, В.Д.Ходжаев. Магнитные и магнитооптические свойства спин-вентильных и спин-туннельных наноструктур. Тезисы НМММ, Астрахань, 2003, 104.
14. S.Antipov, V.Buravtsova, E.Gan'shina, G.Gorjunov, V.Guschin, A.Krashennnikov, 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, Brugge Belgium, 4.6 August (2003).
15. В.Е.Буравцова, С.А.Вызулин, В.В.Запорожец, С.А.Киров, Н.Е.Сырьев, Ф.А.Пудонин. Ферромагнитный резонанс в наноструктурах ферромагнетик-полупроводник. Сборник трудов II Байкальской международной конференции «Магнитные материалы». Иркутск, 2003, 46-48.
16. В.Е.Буравцова, С.А.Вызулин, С.А.Киров, Н.Е.Сырьев, Ф.А.Пудонин. Свойства наноструктур FeNi-SiC-FeNi на сверхвысоких частотах. Труды XIX-школы семинара НМММ-19 (2004) Москва, стр. 667–668.
17. В.Е.Буравцова, В.С.Гущин, С.А.Киров, Е.В. Лебедева, С.Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев, И.Т.Трофименко, Н.С.Перов. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ Труды XIX-школы семинара НМММ-19 (2004) Москва, стр. 411–413.
18. С.Д. Антипов, В.Е. Буравцова, Е.А. Ганьшина, Г.Е. Горюнов, В.С. Гущин, С.И. Касаткин, А.П. Крашенинников, Ф.А. Пудонин, П.Н. Стеценко. Магнитные и магнитооптические свойства спин-туннельных магнитодиэлектрических наногетероструктур. Труды XIX-школы семинара НМММ-19 (2004) Москва, стр. 601–603.
19. V.E. Buravtsova, E.A. Gan'shina, V.S. Guschin, S.I. Kasatkin, F.A. Pudonin. The peculiarities of magnetic and magnetooptic properties of ferromagnetic-semiconductor multilayers. Book of abstracts «Eastmag - 2004» Krasnoyarsk, Russia, 2004. С. 302.
20. V.E.Buravtsova, V.S.Guschin, Yu.E.Kalinin, E.V.Lebedeva and N.E. Syr'ev. Influence of the percolation on properties of nanocomposites $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SO}_2)_{100-x}$, Book of abstracts «Eastmag - 2004» Krasnoyarsk, Russia, 2004. Р. 361.
21. В.Е. Буравцова, С.А. Вызулин, В.С. Гущин, Е.В. Лебедева, С. Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев. 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. Межд. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». Сочи. 13-16 сент. 2004. Сборник трудов, с.83-87.

22. В.Е.Буравцова, В.С.Гущин, С.А.Киров, Е.В. Лебедева, С.Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев, И.Т.Трофименко, Н.С.Перов. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ Book of abstracts «The XXI International Conference on Relaxation Phenomena in solids (RPS-21)» Voronezh, Russia, October 5-8, 2004, С. 202.
23. V. Buravtsova, V. Guschin, A. Dmitriev, Y. Kalinin, E. Lebedeva, S. Phonghirun, A. Sitnikov, N. Syr'ev. Influence of percolation on properties of nanocomposites $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$. Тезисы MISM (2005) Москва, стр. 81
24. В.Е. Буравцова, С.А. Вызулин, В.С. Гущин, Е.В. Лебедева, С. Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев, И.Т.Трофименко. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов на основе гранул $\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2$ и $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в диэлектрических матрицах. Сб. трудов межд. науч. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ – 2005г.» Таганрог. Изд-во ТРТУ. 2005. с. 228-232
25. В.Е.Буравцова, А.А.Дмитриев, О.С.Иванова, С.Пхонгхирун, Н.Е.Сырьев. Магнитооптические свойства нанокompозитов ферромагнетик-полупроводник. двенадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-12, Новосибирск): Материалы конференции, тезисы докладов / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск. 2006. С.403-404.
26. В.Е. Буравцова, Е.А. Ганьшина, О.С. Иванова, Ю.Е. Калинин, С. Пхонгхирун, А.В. Ситников. Исследование влияния толщины полупроводниковой прослойки на магнитооптические свойства наногетероструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x/(\alpha\text{-Si})_y]_{40}$. Межд. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». Сочи. 12-17 сент. 2007. Сборник трудов, с.235-237.
27. В.Е. Буравцова, А.А. Дмитриев, О.С. Иванова, С. Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев. Исследование влияния толщины полупроводниковой прослойки на магнитооптические свойства наногетероструктур $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x/(\alpha\text{-Si})_y]_{40}$. Тринадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-13, Новосибирск): Материалы конференции и тезисы докладов. Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск. 2007. С.362-363.
28. В.Е.Буравцова, О.С.Иванова. Магнитооптические свойства аморфных композиционных пленок. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам (Ломоносов-2008, секция физика). Сборник тезисов. 2008. с. 276-278.
29. В.Е. Буравцова, Е.А. Ганьшина, А.А. Дмитриев, О.С. Иванова, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. Магнитооптические свойства аморфных многослойных пленок. Межд. симпоз. «Упорядочение в минералах и сплавах». Сочи. 10-15 сент. 2008. Сборник трудов, с.106-109.
30. V.E.Buravtsova, E.A.Gan'shina, O.S.Ivanova, Yu.E.Kalinin, S.A.Kirov, A.V.Sitnikov. Magneto-optical properties of amorphous composite films. Book of abstracts MISM (2008) Moscow, P. 314
31. В.Е. Буравцова, Е.А. Ганьшина, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. Магнитооптические свойства многослойных наноструктур ферромагнетик-полупроводник. Труды XXI международной конференции НМММ-21 (2009) Москва, стр. 214-216.
32. В.Е.Буравцова, D.A.Volkonskiy Магнитооптические свойства наномультислойных структур гранулированный нанокompозит-полупроводник. Конференция «Ломоносов-2010», Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова, 12 – 15 апреля (2010), http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2010/23-15.rar 4_54_970_18341.pdf
33. V.Buravtsova, E.Gan'shina, E.Lebedeva, N.Syr'ev, I.Trofimenko, S.Vysulin, I.Shipkova, S.Phonghirun, Yu.Kalinin, and A.Sitnikov. The features of TKE and FMR in nanocomposites-semiconductor multilayers. IV Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Nanospintronics (EASTMAG-2010), Ekaterinburg, Russia, June 28 – July 2 (2010) p.237.

34. V.Buravtsova, E.Gan'shina, A.Novikov, Yu.Kalinin, A.Sitnikov Magneto-optical properties of multilayer nanostructures with composite magnetic layers. Book of abstracts MISM (2011) Moscow, P. 209
35. В.Е. Буравцова Роль интерфейса в формировании магнитооптического отклика многослойных пленок нанокompозит-полупроводник. Конференция «Ломоносов-2011», Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова, 11 — 15 апреля (2011) http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2011/1300/1300.pdf

Цитируемая литература

1. S.Mitani, H.Fujimori, K.Takanashi, K.Yakusiji, J.G. Ha, S.Takanashi, S.Maekawa, S.Ohnuma, N.Kobayashi, T.Masumoto, M.Ohnuma, K.Hono, Tunnel-MR and spin electronics in metal-nonmetal granular systems//JMM.1999.V.198-199.P.179
2. J.C. Slonczewski Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by tunneling barrier//Physical Review B/ 1989.V.39.N10.P/6995-7002
3. И.В. Быков, Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, В.С. Гущин, Магниторефрактивный эффект в гранулированных пленках с туннельным магнитосопротивлением. // ФТТ, 42 (2000) 487.
4. E.Ganshina, A.Granovsky, B.Dieny, R.Kumaritova, A.Yurasov Magneto-optical spectra of discontinuous multilayers Co/SiO₂ with tunnel magnetoresistance// Physica B 229,2001,P260-264
5. С.А.Вызулин, А.В.Горобинский, Ю.Е.Калинин, Е.В.Лебедева, А.В.Ситников, Н.Е.Сырьев, И.Т.Трофименко, Ю.И.Чекрыгина, И.Г.Шипкова. ФМР, магнитные и резистивные свойства мультислойных наноструктур (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_{1-x}/Si// Известия РАН, серия физическая. (2010), Т. 74, №10, с. 1441-1443
6. Александр Викторович Ситников. Электрические и магнитные свойства наногетерогенных систем металл–диэлектрик. Докторская диссертация. ВГТУ. Воронеж 2009.
7. Victoria E. Buravtsova, Vladimir S. Guschin, Yuri E. Kalinin, Sergey A. Kirov, Eugenia V. Lebedeva, Songsak Phonghirun, Alexander V. Sitnikov, Nikolay E. Syr'ev and Igor` T. Trofimenko. Magneto-optical properties and FMR in granular nanocomposites (Co₈₄Nb₁₄Ta₂)_x(SiO₂)_{100-x}./CEJP V2, №4, 2004, pp. 566-578.
8. В.Е. Буравцова, С.А. Вызулин, В.С. Гущин, Е.В. Лебедева, С. Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев. Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов на основе гранул Co₈₆Nb₁₂Ta₂ и Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀ в диэлектрических матрицах. Межд. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». Сочи. 13-16 сент. 2004. Сборник трудов, с.83-87.
9. В.Е.Буравцова, В.С.Гущин, С.А.Киров, Е.В. Лебедева, С.Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев, И.Т.Трофименко, Н.С.Перов.Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов (Co₈₄Nb₁₄Ta₂)_x(SiO₂)_{100-x}. Book of abstracts «The XXI International Conference on Relaxation Phenomena in solids (RPS-21)» Voronezh, Russia, October 5-8, 2004, С. 202.
10. В.Е. Буравцова, С.А. Вызулин, В.С. Гущин, Е.В. Лебедева, С. Пхонгхирун, Н.Е. Сырьев, И.Т.Трофименко.Магнитные и магнитооптические свойства нанокompозитов на основе гранул Co₈₄Nb₁₄Ta₂ и Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀ в диэлектрических матрицах. Сб. трудов межд. науч. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ – 2005г.» Таганрог. Изд-во ТРТУ. 2005. с. 228-232.
11. В.Е.Буравцова, А.А.Дмитриев, О.С.Иванова, С.Пхонгхирун, Н.Е.Сырьев. Магнитооптические свойства нанокompозитов ферромагнетик-полупроводник. Двенадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-12, Новосибирск): Материалы конференции, тезисы докладов / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск. 2006. С.403-404.
12. Сонгсак Пхонгхирун. Магнитооптические свойства нанокompозитов ферромагнитный металл-диэлектрик и наномультислойных пленок ферромагнетик-полупроводник. Кандидатская диссертация. Физический факультет. Москва 2007.

13. В.Е.Буравцова, Е.А.Ганьшина, В.С.Гущин, Ю.Е.Калинин, С.Пхонгхирун, А.В.Ситников, О.В.Стогней, Н.Е.Сырьев. Гигантское магнитосопротивление и магнитооптические свойства гранулированных нанокомпозитов металл-диэлектрик// Известия Академии Наук, серия физическая, Т67, №7, с.918-920, 2003.
14. М.В. Вашук, Е.А.Ганьшина, И.И. Тульский, П.Н.Щербак, Ю.Е.Калинин, А.В.Ситников. Оптическая и магнитооптическая спектроскопия мультислойных наноструктур $\{\text{CoFeZr}(x)\text{-aSi}(y)\}_n$ и $\{\text{CoFeZr}(x)\text{-SiO}_2(y)\}_n$ //Журнал функциональных материалов, 2007, т.1, №9, с.322-328.