

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

УДК 537.632.3; 548:537.611.44

На правах рукописи

Кочнева Марина Юрьевна

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ 3d МЕТАЛЛОВ (Fe И Co)

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

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

Научные руководители : доктор физико-математических наук,
профессор Е. А. Ганьшина

Официальные оппоненты : доктор физико-математических наук,
профессор Ю. Г. Рудой

кандидат физико-математических наук,
доцент Н. Е. Сырьев

Ведущая организация : Российский научный центр “Курчатовский институт”

Защита состоится « 16 » июня 2005 года в 16:30 часов на заседании Диссертационного Совета К 501.001.02 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, Воробьевы Горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЮФА

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан « 16 » мая 2005 года.

Ученый секретарь Совета

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. Отличительная черта низкоразмерных систем в том, что их свойства определяются не только свойствами элементов, входящих в их состав, но, в большей степени, поверхностью раздела и размерами объемов, формирующими подобную структуру. В новых магнитных материалах, созданных благодаря нанотехнологиям наблюдаются необычные физические явления, представляющие как самостоятельный научный интерес, так и важное практическое значение: гигантский магнитный импеданс (ГМИ), гигантское магнитосопротивление (ГМС), гигантский аномальный эффект Холла (АЭХ), аномальные оптические эффекты, сильный магнитооптический отклик. В настоящее время такие магнитные материалы повсеместно синтезируются, активно изучаются их физические свойства, решаются задачи установления природы, механизмов проявления, теоретического описания этих физических явлений. Причины повышенного внимания связаны, прежде всего, с возможностями применения наноразмерных магнитных материалов в технике, например, при создании высокочувствительных датчиков магнитного поля и температуры, устройств для записи и считывания (магнитных головок), а также хранения информации (магнитных и магнитооптических дисков). Объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований является вопрос взаимного влияния микроструктуры и магнитных, оптических и электрических свойств в пленочных наногранулированных материалах (кристаллиты, разделенные немагнитной прослойкой) на основе 3d металлов.

Остается большое число нерешенных проблем в таких образцах, 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, накладываемых частицами, их границами и поверхностью пленок. Изучение особенностей, связанных как с размером кристаллитов (гранул), так и с характером их пространственного распределения в нанокompозитных пленочных сплавах

нуждается в привлечении более широкого круга методик, чем в случае исследования свойств объемных материалов.

Известно, что исследование магнитооптических характеристик позволяет получить уникальную информацию об электронной и магнитной структуре, механизмах рассеяния носителей тока, характере межзонных переходов.

Таким образом, изучение магнитооптических характеристик нанокompозитных материалов на основе 3d металлов и их пленочных и многослойных аналогов является актуальным и определяется как перспективами практического применения исследуемых структур, так и фундаментальным аспектом этих исследований.

Целью данной работы явилось исследование магнитооптических свойств и их изменений вследствие температурной обработки нескольких видов новых нанокompозитных материалов на основе 3d металлов:

1. аморфных лент $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$, обладающих асимметричным эффектом ГМИ;
2. гранулированных сплавов $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$, обладающих ГМС;
3. гранулированных сплавов на основе поликристаллического Co, внедренного как диэлектрическую – Sm_2O_3 , так и в полупроводниковую – TiO_2 матрицу;
4. одномерных магнитофотонных кристаллов на основе висмут замещенного железиттриевого граната $\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_x$ и магнитных микрорезонаторов на основе гранулированного сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$.

Научная новизна и практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Магнитооптические методы исследований позволили выявить существование неоднородного по толщине анизотропного нанокристаллической слоя, формирующегося в результате отжига в слабых магнитных полях на воздухе вблизи поверхности рентгеноаморфных лент на основе Co

2. Комплексное изучение магнитных, оптических и магнитооптических свойств позволило определить, что фазовые и структурные превращения, происходящие в результате термообработки в гранулированных сплавах на основе FePt, зависят от концентрации ферромагнитной составляющей.

3. Для нанокompозитных материалов, отличающихся друг от друга элементным составом, как матрицы, так и металлической составляющей, обнаружено существование строго соответствия между пиком в концентрационной зависимости эффекта Керра, наблюдающимся вблизи порога перколяции в узком спектральном диапазоне, и концентрационным максимумом магнитосопротивления.

4. Впервые изучено поведение магнитооптического отклика в геометрии экваториального эффекта Керра для одномерных магнитофотонных кристаллов и магнитных микрорезонаторов. Обнаружено резонансное усиление эффекта Керра в магнитофотонном кристалле на основе висмутзамещенного железо-иттриевого граната в видимом диапазоне спектра.

Полученные результаты позволяют заключить, что магнитооптические исследования являются одним из эффективных методов комплексной диагностики свойств наноструктур. Результаты данной работы могут быть использованы для развития технологий получения наноструктур необходимой конфигурации с заданными свойствами.

Основные результаты диссертации, которые выносятся на защиту, можно сформулировать следующим образом:

1. Обнаружение неоднородного по толщине анизотропного микрокристаллического слоя, формирующегося в результате термической обработке на воздухе вблизи поверхности рентгеноаморфной ленты, с помощью спектральных, полевых и ориентационных зависимостей эффекта Керра. Установление корреляции между магнитными свойствами обнаруженного приповерхностного кристаллического слоя и асимметричным поведением гигантского магнитного импеданса.

2. Результаты магнитооптических исследований пленочных образцов гранулированных сплавов 3d металлов в основном состоянии и после температурной обработки. Обнаружение немонотонного характера поведения концентрационной зависимости ЭЭК с ярко выраженным максимумом вблизи порога перколяции для нанокompозитов отличающихся друг от друга элементным составом, как ферромагнитной, так и диэлектрической

составляющей. Наличие корреляции между концентрационными зависимостями ЭЭК и ГМС. Установление зависимости фазовых переходов, происходящих в сплавах $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ при отжиге, от концентрации ферромагнитной компоненты.

3. Эффект сильного резонансного увеличения ЭЭК в узком спектральном диапазоне, соответствующем коротковолновому краю фотонной запрещенной зоны, для многослойной структуры, состоящей из повторяющихся слоев висмут замещенного железиттриевого граната и оксида кремния.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: 15-th Soft Magnetic Materials conference (SMM) Bilbao, Spain (2001); ISPM/ISAMPT 2001 conference (Taiwan); 46-th Magnetism and Magnetic Materials conference (MMM) Washington (2001); международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (HMMM) XVIII/XIX, Москва (2002/2004); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Москва (2002); симпозиум «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO), Сочи (2002, 2003); международная конференции "Функциональные материалы" (ICFM), Крым, Украина (2003); International Symposium on Advanced Magnetic Materials (ISAM2) Yokohama, Japan (2003); TUT International Workshop on novel Electromagnetic Functions of Nano-scaled Materials, Toyohashi, Japan (2003); International Magnetism Conference (MMM-Intermag) California (USA)/Nagoya (Japan) (2004/2005); Euro-Asian symposium "Trends in Magnetism" (Eastmag) Красноярск, Россия (2004).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях и 13 тезисах докладов, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Полный объем работы - 139 страниц машинописного текста, включая 52 рисунка, 4 таблицы и библиографию из 125 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования 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 диссертации представляет собой обзор теоретических и экспериментальных 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”.

В параграфе 1.4 приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований магнитооптических свойств магнитных нанокompозитов.

Сделан вывод, что основной задачей в изучении нанокompозитных систем является исследование модификаций электронной, магнитной и кристаллической структуры в связи с изменением размеров структурных образований вещества. Поставлена задача – изучить изменения магнитооптических свойств (исследование которых, как известно, может дать информацию о магнитной и электронной структуре вещества, его фазовом

состоянии) для нескольких видов нанокompозитных материалов в зависимости от концентрации в них ферромагнитной фазы и в результате термообработки.

В параграфе 1.5 обсуждаются аморфные ферромагнитные сплавы (способы изготовления, методы изучения их микроструктуры и магнитной структуры).

В параграфе 1.6 приведены работы, посвященные изучению эффекта гигантского магнитного импеданса, наблюдающегося в аморфных ферромагнитных сплавах.

Показано, что магнитооптические методы можно применить как эффективный инструмент исследования магнитной и электронной структуры приповерхностного слоя веществ, обладающих ГМИ. В связи с чем поставлена задача – изучить магнитооптические характеристики аморфных лент на основе Co, обладающих асимметричным ГМИ эффектом.

Во второй главе описана методика эксперимента и установка, позволяющая проводить измерения экваториального эффекта Керра в области энергий падающего света 0,5 – 4,5 эВ в присутствии переменного магнитного поля достигающего значений ~ 3 кЭ. Проведен анализ ошибок эксперимента.

В третьей главе представлены результаты исследований магнитооптических свойств аморфных сплавов $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$, отожженных при $T=380^\circ\text{C}$ в слабых магнитных полях. Благодаря такой термообработке в аморфных лентах удалось получить асимметричный профиль ГМИ эффекта, обладающего чувствительностью к магнитному полю ~1000%/Э [1-4].

Во введении обсуждается актуальность и практическая ценность аморфных сплавов с ГМИ, а также проблемы, возникающие при исследовании подобных материалов.

В параграфе 3.2 даны технические параметры методов изготовления и термической обработки аморфных лент, их состав. Приведены характеристики серий исследованных образцов, содержащиеся в таблице 1.

В параграфе 3.3 приведены результаты исследований спектров ЭЭК рентгеноаморфных лент на основе Co. Установлено, что форма кривых ЭЭК и величина магнитооптического отклика сильно зависят от условий отжига

изучаемых образцов: температуры и времени отжига, внешнего магнитного поля, среды отжига.

Показано, что изменение вида спектральных зависимостей эффекта Керра с увеличением времени отжига (появление особенностей в области энергий падающего света $h\nu \sim 1,8$ эВ и $h\nu \sim 4,5$ эВ (рис.1(A))) свидетельствуют об изменении микроструктуры, точнее, о последовательном формировании и развитии микрокристаллического слоя вблизи поверхности аморфных лент. Обнаружено, что только отжиг на воздухе приводит к возникновению приповерхностного кристаллического слоя, поскольку каких-либо изменений формы кривых ЭЭК для образцов, отожженных в вакууме с увеличением времени термообработки, не наблюдалось (рис.1(B)).

В параграфе 3.4 приведены результаты исследований магнитных свойств приповерхностного микрокристаллического слоя в рентгено-аморфных лентах.

Изучена анизотропия полевых зависимостей ЭЭК в переменном магнитном поле, направленном как вдоль оси ленты (параллельно направлению поля при отжиге), так и перпендикулярно ей. Различие в магнитных свойствах, измеренных в двух направлениях, обнаружено уже в необработанном образце. Показано, что основной вклад в магнитную анизотропию необработанной аморфной ленты дает анизотропия формы. Установлено, что характер поведения полевых зависимостей ЭЭК отожженного образца определяется не только его формой, но в большей степени свойствами образовавшегося в нем приповерхностного слоя, состоящего из мелких кристаллов или кристаллитов. Этот вид анизотропии исчезает в полях насыщения, составляющих $\sim 300\text{--}400$ Э.

С целью более детального изучения свойств приповерхностного кристаллического слоя исследованы полевые зависимости ЭЭК одной и той же аморфной ленты на разных длинах волн падающего света. Глубина проникновения падающего света в магнетик зависит от длины волны ($Z_0 = \lambda_0 / 4\pi k$), поэтому, исследуя полевые зависимости ЭЭК на разных длинах волн, можно получать информацию о магнитных свойствах слоев вещества разной толщины [5,6]. Обнаружено, с увеличением длины волны величина поля насыщения понижается, а наклон кривой намагничивания растет (рис. 2(A)). Такое поведение зависимостей ЭЭК от магнитного поля

свидетельствует, что магнитная структура приповерхностного слоя неоднородна по толщине, и указывает, чем ближе слой расположен к поверхности, тем более магнитожестким он является. Появление асимметричного профиля ГМИ при изменении частоты переменного электрического тока связывается с обнаруженной неоднородностью по толщине микроструктуры, а соответственно и магнитной структуры, приповерхностного слоя аморфной ленты.

Кроме этого измерены полевые зависимости ЭЭК для нескольких отожженных образцов на одной и той же длине волны падающего света (рис. 2(В)). Обнаружено, что с увеличением времени отжига кристаллическая фаза одного и того же поверхностного слоя становится более магнитожесткой. Эти результаты позволили проанализировать измерения

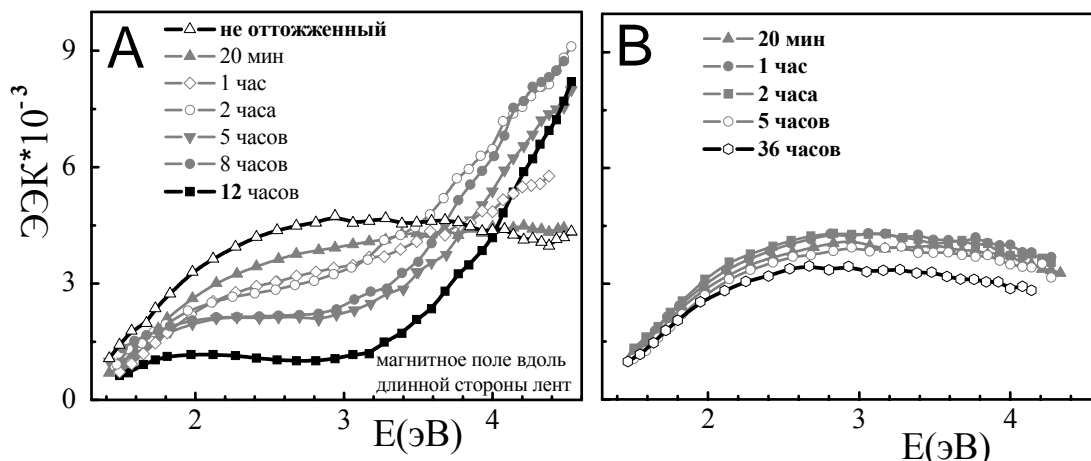


Рис. 1. Спектральные зависимости ЭЭК аморфных лент $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$, отожженных в течение разного времени при $H=2$ Э, $T=380$ °С:

А – на воздухе, **В** – в вакууме.

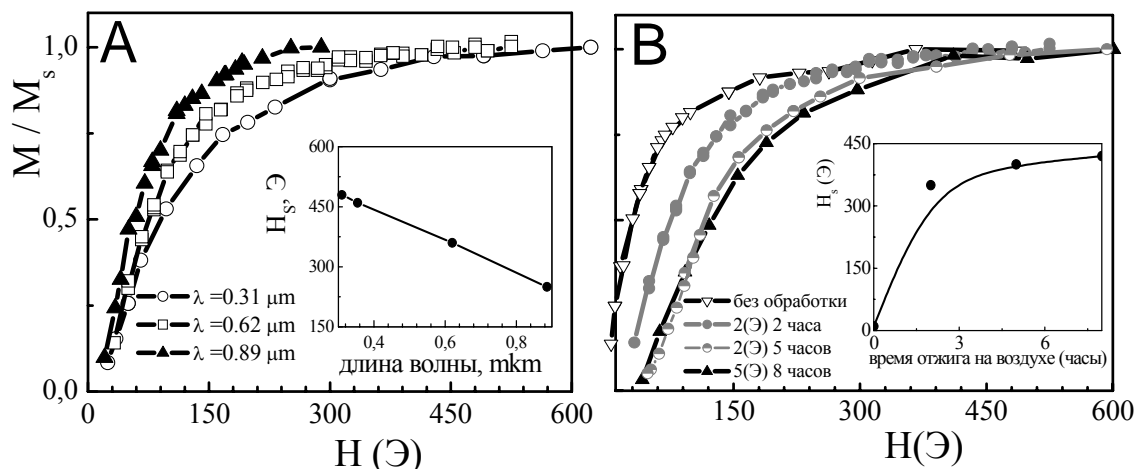


Рис. 2. Полевые зависимости относительной намагниченности: **А** – образца, отожженного 2 часа в $H=2$ Э для разных длин волн падающего света, **В** – не отожженного образца и лент с временем отжига 2, 5 и 8 часов для $\lambda=0,62\mu\text{m}$

магнитоимпеданса на одной и той же частоте электрического тока (то есть в слое одной толщины).

В результате магнитооптических исследований было установлено, что появление характерного асимметричного профиля ГМИ при определенных условиях связано с образованием в отожженной на воздухе аморфной ленте высококоэрцитивного неоднородного по толщине приповерхностного микрокристаллического слоя.

В параграфе 3.5 обсуждается анизотропия магнитооптических свойств, наблюдающаяся в сильных магнитных полях (свыше 2 кЭ), для серии отожженных на воздухе образцов. При измерениях спектральных зависимостей ЭЭК переменное магнитное поле прикладывалось как вдоль оси ленты, так и в перпендикулярном направлении. Анизотропия МО свойств проявляется для образцов, которые отжигались в магнитном поле свыше 2 часов и исчезает, если время отжига превышает 8 часов. Этот вид анизотропии, наблюдаемый в полях больших поля насыщения (300–400 Э), связан с анизотропией оптических и магнитооптических свойств микрокристаллического приповерхностного слоя, точнее с анизотропией формы внутренних неоднородностей – кристаллов или кристаллитов, размеры и количество которых изменяются с увеличением времени отжига.

В параграфе 3.6 приведены результаты температурных исследований эффекта Керра в аморфных лентах. Показано, что при следующей после отжига температурной обработке происходит необратимая перестройка структуры аморфного сплава, что связано с перераспределением и ростом микро кристаллитов вблизи его поверхности.

В параграфе 3.7 показано, что выводы, сделанные при изучении спектральных, полевых и ориентационных зависимостей ЭЭК аморфного сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{V}_{14}\text{Si}_{15}$ находят подтверждение другими более трудоемкими и дорогостоящими методами исследований (Оже–спектроскопия, рентгеноструктурные исследования, изучение свойств послойно ставленных образцов).

В заключении сформулированы основные результаты этой главы.

В четвертой главе представлены результаты исследования магнитных, оптических и магнитооптических свойств гранулированных пленок $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ в неупорядоченном состоянии и после температурной обработки.

Во введении обсуждается актуальность и практическая ценность сплавов на основе FePt, являющихся в настоящее время наиболее перспективными материалами для ультраплотной записи информации из-за образующейся в них в процессе отжига тетрагональной $L1_0$ структуры [7].

В параграфе 4.2 описаны особенности технологии изготовления и термической обработки исследуемых нанокompозитных материалов. В таблице 2 даны концентрации диэлектрической компоненты образцов и соответствующие им значения магнитосопротивления.

В параграфе 4.3 показано, что изменение соотношения магнитной и диэлектрической фаз сильно влияет на амплитуду и форму спектров ЭЭК гранулированного сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$. Спектральные зависимости образцов, в которых преобладает металлическая составляющая, имеют особенности, характерные для сплава FePt (рис. 3(A)). С увеличением концентрации SiO_2 форма кривых ЭЭК значительно меняется. Подобные изменения величины и формы эффекта, вызванные вариациями состава образцов, являлись обычными и для гранулированных композитов, изученных ранее [8,9]. Наиболее сильные изменения хода спектральных зависимостей ЭЭК обнаружены для образцов $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$, концентрация диэлектрической компоненты в которых наиболее близка к порогу перколяции ($X_{\text{пер}} \sim 57,2\%$). Обнаружено, что зависимости эффекта Керра от концентрации диэлектрической компоненты (SiO_2) в составе нанокompозита не монотонны и демонстрируют резкий “излом” в районе $X \sim 57,2\%$, наиболее сильно выраженный в ИК области спектра (рис. 3(B)). Концентрационное положение максимума эффекта Керра (в узком диапазоне длин волн ИК области спектра) строго соответствует порогу перколяции, определенному при измерениях ГМС. Усиление МО отклика в ближней ИК области спектра вблизи порога перколяции обусловлено тем, что именно в этой области концентраций происходят наиболее сильные изменения микроструктуры нанокompозита, влекущие за собой изменения его оптических свойств, а также переход системы из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние.

Кроме того, обнаружено, что замена железа, входящего в состав ферромагнитной компоненты изучаемых нанокompозитных сплавов, кобальтом (при том же самом материале диэлектрика) приводит к уменьшению

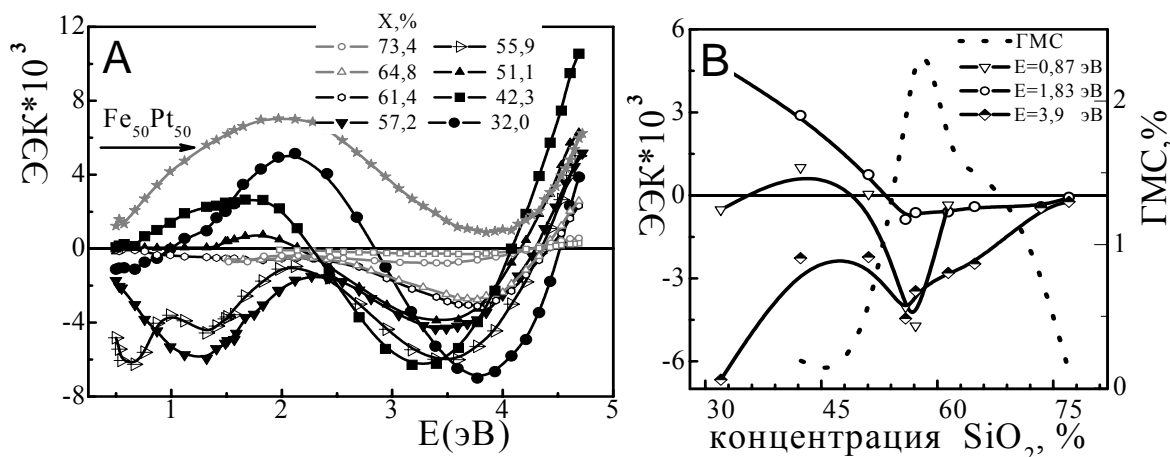


Рис. 3 Магнитооптические исследования неотожженных композитов $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$: **A** – спектральные зависимости ЭЖК; **B** – концентрационные зависимости ЭЖК (для разных длин волн падающего света) и ГМС.

величины ЭЖК на порядок. Это происходит в результате ослабления межзонного перехода, обусловленного особенностями электронной структуры этих металлов.

В параграфе 4.4 представлены результаты расчета дисперсионных зависимостей диагональных (ϵ_1 и ϵ_2) и недиагональных (ϵ'_1 и ϵ'_2) компонент тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ на основе экспериментально измеренных оптических постоянных n , k и ЭЖК при двух углах падения света в энергетическом диапазоне 0,5 – 4,5 эВ. Показано, что в отличие от спектральных зависимостей ЭЖК изменение концентрации SiO_2 не приводит к увеличению амплитуды спектров диагональных и недиагональных компонент ТДП. Во всем диапазоне длин волн падающего света с увеличением концентрации диэлектрической компоненты величина ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ'_1 , ϵ'_2 падает. Такое поведения дисперсионных зависимостей недиагональный компонент ТДП свидетельствует: значительное увеличение магнитооптического отклика вблизи порога перколяции в ИК области спектра не связано с увеличением магнитооптической активности изучаемых нанокompозитных материалов.

В параграфе 4.5 проведено сравнение спектральных зависимостей ЭЖК, смоделированных в рамках приближения “эффективной среды”, и экспериментальных результатов. Магнитооптические спектры были рассчитаны как функция оптических и МО параметров компонент сплава, коэффициента объемного заполнения магнитных частиц f и L фактора формы [10], а также фактора немагничивания среды – $a_H = M(H)/M_s$, где $M(H)$ и M_s – магнитные моменты в поле H и H_s соответственно. Показано, что расчет в

рамках приближения “эффективной среды” позволяет описать экспериментальные кривые ЭЭК для гранулированного сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ в широком диапазоне концентраций. В отличие от МО данных для нанокompозитов «аморфный металл – диэлектрик», при моделировании которых требовались более сложные методы описания магнитооптических свойств (симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта) [9].

В параграфе 4.6 представлены результаты исследований изменений магнитооптических, оптических и магнитных свойств нанокompозитов в связи с процессами упорядочения, происходящими в них в результате термической обработки при 700°C . Обнаружено, что отжиг по-разному влияет на поведение спектров ЭЭК пленок с концентрацией диэлектрической компоненты больше и меньше порога перколяции. Значительное увеличение МО эффекта (на порядок) наблюдается для пленок с большой концентрацией диэлектрической компоненты (рис. 4). В противоположность этому амплитуда эффекта Керра для пленок с $X=55,9$ и $57,2\%$ существенно уменьшается после отжига. Сравнение спектральных зависимостей мнимой части диагональных компонент ТДП ε_2 для неупорядоченных и отожженных пленок также показывает, что термообработка в большей степени влияет на оптические свойства нанокompозитов с $X \sim X_{\text{пер}}$ (особенно в ИК области спектра, где велик вклад свободных электронов) и практически не изменяет оптических параметров пленок с большой диэлектрической составляющей. Изучение поведения кривых намагничивания (а также полевых зависимостей ЭЭК) для неупорядоченных и отожженных образцов показало, что после отжига некоторые гранулированные пленки становятся более мягкими ($X < 68\%$) другие же наоборот – более магнито жесткими ($X \sim 57\%$) (рис. 5). В результате было установлено, что изменение магнитных, оптических и магнитооптических свойств отожженных нанокompозитов $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ является следствием структурного перехода в упорядоченную высококоэрцитивную структуру, происходящего только в тех материалах, металлические гранулы которых обладают достаточно большими размерами. В сплавах с малыми металлическими частицами структурный переход не происходит, однако распределение гранул по размерам в результате отжига

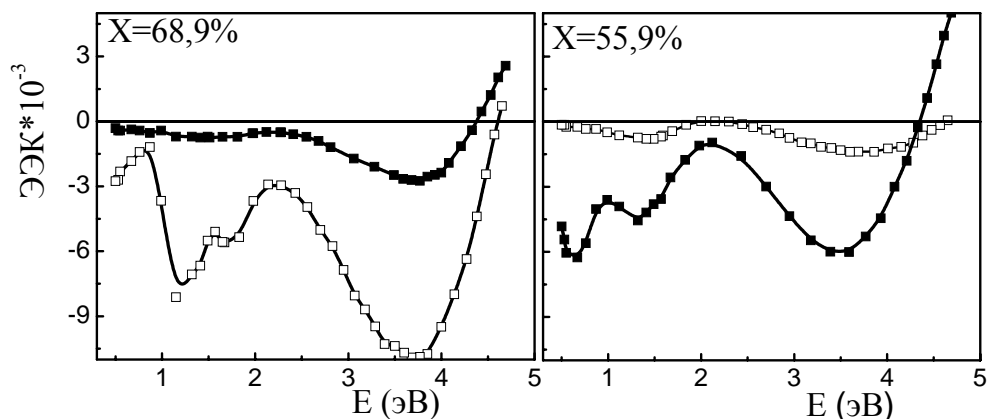


Рис. 4 Спектры ЭЖК для неупорядоченных (полные символы) и отожженных при 700°C (пустые символы) гранулированных пленок $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$, X – концентрация диэлектрической компоненты.

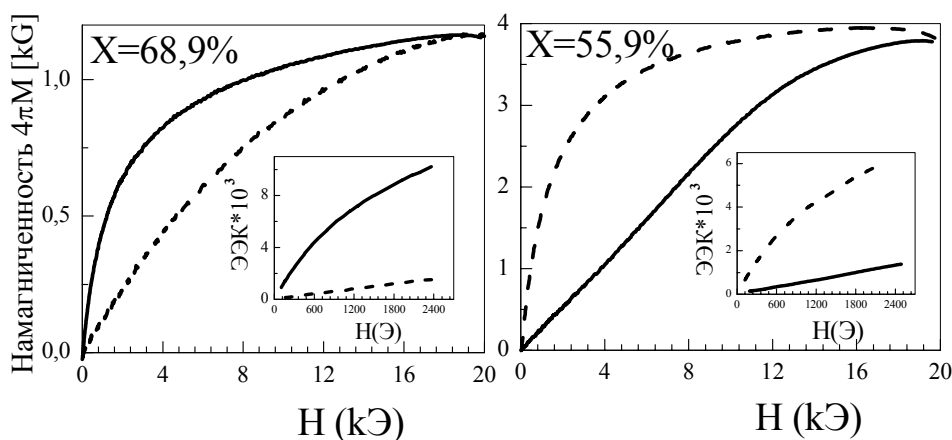


Рис. 5 Кривые намагничивания и полевые зависимости ЭЖК (вставки) для неупорядоченных (пунктир) и отожженных при 700°C (непрерывная линия) гранулированных пленок $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$, X – концентрация диэлектрической компоненты.

становится более однородным, вследствие вариации размера частиц (данные исследований с помощью просвечивающего электронного микроскопа).

В параграфе 4.7 кратко изложены основные результаты данной главы.

В пятой главе обсуждаются магнитооптические и магнито-транспортные свойства нанокompозитов на основе поликристаллического кобальта внедренного в две различные матрицы: диэлектрическую (Sm_2O_3) и полупроводниковую (TiO_2).

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.

В параграфе 5.2 описаны особенности технологии изготовления и термической обработки исследуемых нанокompозитных материалов. В

таблице 3 даны концентрации диэлектрической компоненты образцов и соответствующие им значения магнитосопротивления.

В параграфе 5.3 приведены спектральные и концентрационные зависимости эффекта Керра для гранулированных пленок $\text{Co}_x(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$.

Обнаружено, что форма кривых ЭЭК изучаемых композитных материалов на основе Со значительно отличается от спектра ЭЭК однородного поликристаллического кобальта. Более того, амплитуда магнитооптического отклика гранулированных композитов в несколько раз превосходит величину ЭЭК для однородного образца. Сравнение спектральных зависимостей ЭЭК, полученных для систем $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{1-x}$ в основном состоянии, показало, что замена материала матрицы не вызывает кардинальных изменений амплитуды и формы кривых ЭЭК. Обнаружено, что в концентрационных зависимостях ЭЭК изучаемых нанокompозитов на основе Со наблюдаются как общие изменения, так и индивидуальные отличия. К изменениям общего характера относится немонотонное поведение эффекта Керра при изменении концентрации ферромагнитной компоненты в составе нанокompозита с ярко выраженным максимумом вблизи порога перколяции. К индивидуальным отличиям, определяющимся элементарным составом нанокompозитов, относятся величина и положение максимума концентрационной зависимости ЭЭК.

Также как и для сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ (глава 4), для гранулированных пленок $\text{Co}_x(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ обнаружено, что положение максимума в концентрационной зависимости ЭЭК (в узком диапазоне длин волн ИК области спектра) строго соответствует порогу перколяции, определенному при измерениях магнитосопротивления (рис. 6).

Сравнительные исследования магнитотранспортных свойств, проведенные в двух гранулированных сплавах на основе поликристаллического Со, различающихся друг от друга материалом диэлектрической матрицы, также свидетельствуют о том, что элементарный состав матрицы сильно влияет на величину и форму максимума ГМС (рис. 6).

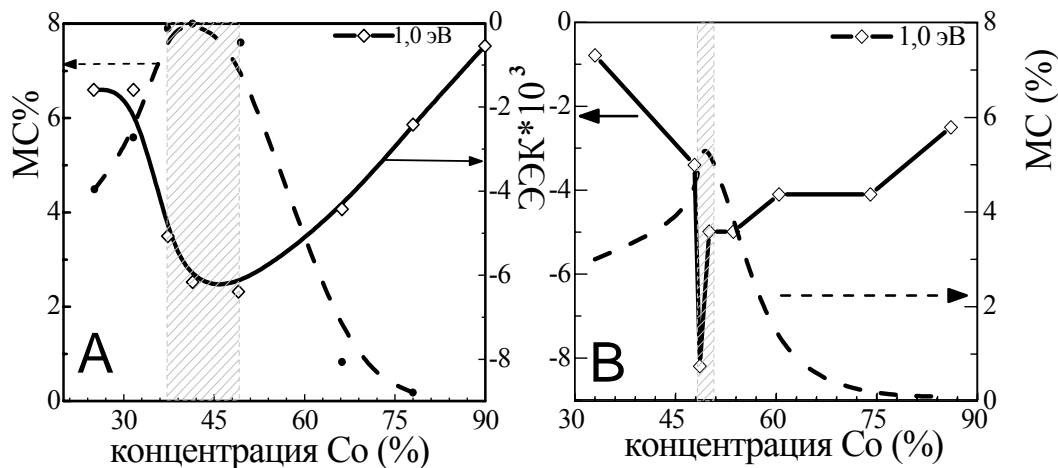


Рис. 6 Концентрационные зависимости ЭЭК для падающего света с энергией ~ 1 эВ и ГМС: **A** – $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ **B** – $\text{Co}_x(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{1-x}$.

Параграф 5.4 посвящен изучению изменений магнитооптических и магнитотранспортных характеристик наноконпозитов $\text{Co}_x(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$, произошедших в результате кратковременной термообработки при 200°C . Установлено, что характер изменений величины и формы ЭЭК (так же как и поведение магнитосопротивления) при термическом воздействии зависит от материала матрицы.

В параграфе 5.5 представлены основные результаты этой главы.

В шестой главе описаны результаты исследований спектральных зависимостей ЭЭК одномерных магнитофотонных кристаллов (МФК) на основе висмут замещенного железиттриевого граната и магнитных микрорезонаторов на основе $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$.

Во введении речь идет о перспективах практического применения этого абсолютно нового класса магнитных материалов, в которых к настоящему моменту уже обнаружено существенное усиление фарадеевского вращения, сопровождающееся, к сожалению, сильным снижением прозрачности [11]. Вследствие чего изучение поведения МО отклика такого магнитофотонного кристалла в случае отражения представляется интересным.

В параграфе 6.2 описан процесс изготовления и термической обработки исследуемых материалов.

В параграфе 6.3 приведены результаты оптических и магнитооптических исследований, на основании которых рассчитан тензор диэлектрической проницаемости однородной пленки граната $\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_x$. Показано, что эти результаты хорошо согласуются с известными эксперимен-

тальными данными [12,13], полученными для Vi -содержащих пленок ферритов–гранатов ранее.

В параграфе 6.4 представлены спектральные зависимости ЭЭК магнитофотонных кристаллов, состоящих из четырех и шести пар чередующихся слоев гранат/оксид кремния. Сильное резонансное увеличение эффекта Керра в видимом диапазоне спектра ($h\nu \sim 2,6$ эВ) зафиксировано только при изучении многослойной структуры, состоящей из четырех пар повторяющихся слоев гранат/оксид кремния в случае, когда угол падения света составляет 70° (рис. 7). Приведены данные спектроскопии отражения p – поляризованного света, демонстрирующие, что усиление МО эффекта в этой структуре проявляется в спектральном диапазоне, соответствующем коротковолновому краю фотонной запрещенной зоны.

Показано, что значительное усиление МО эффекта реализуется при наиболее выгодных условиях для интерференции лучей света, испытавших множественные отражения внутри магнитного слоя. Поскольку изменение угла падения света при измерениях ЭЭК многослойной структуры, состоящей из четырех пар повторяющихся слоев гранат/оксид кремния, ведет к резкому уменьшению (размыванию) резонансного пика в видимом диапазоне энергий световой волны. Отметим также, что увеличение числа пар слоев гранат/оксид кремния до 6 также вызывает сильные изменения формы спектров ЭЭК, в результате чего усиление МО отклика в районе 2,6 эВ исчезает (рис. 7).

Для расчета особенностей распространения света в такой многослойной структуре был использован метод М-матриц с обобщением на эллиптические поляризованные волны [14,15]. При моделировании эффекта Керра учитывались оптические свойства (дисперсионная зависимость тензора диэлектрической проницаемости для однородной пленки граната, полученная экспериментально в § 6.3), толщина чередующихся слоев и условия отражения на их границах. С помощью этого метода удалось смоделировать общий ход экспериментальных кривых ЭЭК для изучаемого фотонного кристалла, но получить наиболее важный результат – резонансное усиление эффекта Керра в узком спектральном диапазоне – не получилось.

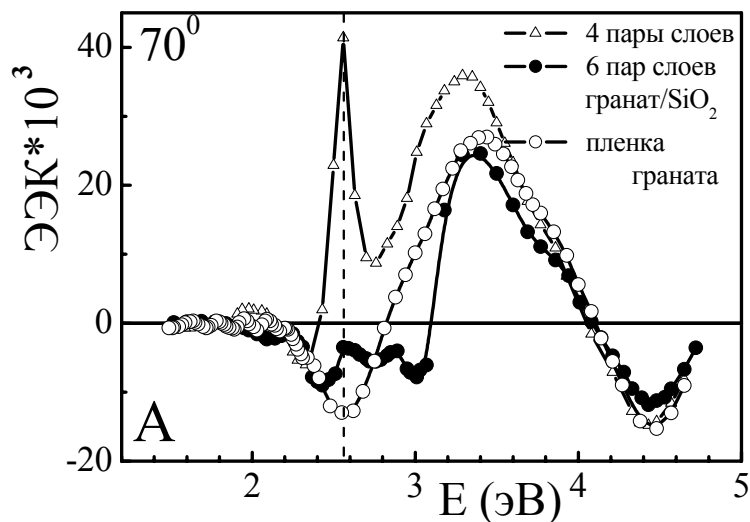


Рис. 7 Спектры ЭЭК для однородной пленки граната $\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_x$ и МФК, состоящих из 4 и 6 пар чередующихся слоев гранат/оксид кремния.

На расхождение теоретических и экспериментальных данных повлияли параметры, которые не были учтены при расчетах. Например, разное число отжигов слоёв феррит-граната или неоднородные деформации, возникающие внутри них при термообработке в направлении перпендикулярном поверхности [16].

В параграфе 6.5 обсуждаются результаты измерений магнито-оптических спектров для микрорезонаторов с магнитной прослойкой из нанокompозитного материала $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$. Обнаружено, что исследуемые образцы обладают невысокими значениями эффекта Керра ($\sim 10^{-4}$) во всем диапазоне длин волн падающего света, что объясняется высоким поглощением в нанокompозитном слое магнитного микрорезонатора. Показано, что увеличение температуры отжига с 400 до 700°C приводит к увеличению амплитуды ЭЭК исследуемого магнитного микрорезонатора, что связано с увеличением гранул композитного сплава (магнитной прослойки микрорезонатора) и более равномерным распределением их по размерам.

В параграфе 6.6 представлены основные результаты данной главы. В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Проведено исследование спектральных, полевых, температурных и ориентационных зависимостей ЭЭК ренгеноаморфных лент на основе Co.
- Установлено, что в ходе отжига на воздухе вблизи поверхности аморфной ленты постепенно формируется и развивается неоднородный по толщине высококоэрцитивный микрокристаллический слой, с

существованием которого связывается увеличение ГМИ эффекта и его асимметричное поведение в полях менее 10 Э.

- Проведено комплексное исследование магнитных, оптических и магнитооптических свойств нанокompозитных материалов $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$, $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{1-x}$ в основном состоянии и после температурной обработки.

- Обнаружено значительное усиление МО отклика в узком спектральном диапазоне для образцов, концентрация металлической компоненты в которых близка к порогу перколяции.

- Максимум концентрационной зависимости ЭЭК строго соответствует порогу перколяции, определенному при измерениях магнито-сопротивления для нанокompозитов, отличающихся друг от друга элементным составом как ферромагнитной, так и диэлектрической составляющей.

- Концентрационное положение максимума эффекта Керра определяется тем, что именно вблизи порога перколяции происходят наиболее сильные изменения микроструктуры нанокompозита, влекущие за собой изменения его оптических свойств, а также переход системы из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние.

- На примере сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ показано, что теоретическое моделирование спектральных зависимостей ЭЭК в приближении “эффективной среды” позволяет получить описание экспериментальных кривых в широком диапазоне концентраций.

- Установлено, что характер структурных изменений, происходящих в связи с процессами упорядочения при термической обработке в сплавах $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$, определяется размерами металлических гранул.

- Впервые проведены исследования экваториального эффекта Керра для одномерных магнитофотонных кристаллов, состоящих из чередующихся слоев граната $\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_x$ и оксида кремния SiO_2 , и магнитных микрорезонаторов с прослойкой из гранулированного сплава $(\text{FePt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$.

- Зафиксировано сильное резонансное увеличение эффекта Керра в узком спектральном диапазоне, соответствующем коротковолновому краю фотонной запрещенной зоны, для многослойной структуры, состоящей из четырех пар повторяющихся слоев гранат/оксид кремния.

→ Показано, что значительное усиление МО эффекта реализуется при наиболее выгодных условиях для интерференции лучей света, испытавших множественные отражения внутри магнитного слоя.

Основное содержание диссертации полностью отражено в следующих публикациях:

1. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O. Magnetostatic and magneto-optical properties of Co-based amorphous ribbons. *J. Magn. Magn. Mat.* 2002, **239**, 1-3, 484-486.

2. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O. Depth profiles of magnetic anisotropy in annealed Co-based amorphous ribbons. *J. Appl. Phys.* 2002, **91**, 10, 8438-8440.

3. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O. Weak magnetic field annealing effect on magneto-optical and magnetostatic properties of Co-based amorphous ribbons. *J. Magn. Magn. Mat.* 2003, **254-255**, 428-430.

4. Kim C.G., Rheem Y.W., Kim C.O., Yoon S.S., Gan'shina E.A., Kochneva M.Yu. and Zaichenko D.A. High-temperature dependence of asymmetric giant magnetoimpedance and magnetostatic properties in Co-based amorphous ribbon. *J. Magn. Magn. Mat.* 2003, **258-259**, 170-173.

5. Gan'shina E., Aimuta K., Granovsky A., Kochneva M., Sherbak P., Vashuk M., Nishimura K. and Inoue M. Optical and magneto-optical properties of magnetic nanocomposites FePt-SiO₂. *J. Appl. Phys.* 2004, **95**, 11, 6882-6884.

6. Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Подгорный Д.А., Щербак П.Н., Демидович Г.Б., Козлов С.Н. Структура и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов пористый кремний – кобальт, ФТТ 2005, **47**, 7, 1333-1337.

7. Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Вашук М.В., Щербак П.Н., Aimuta K., Inoue M. Оптические и магнитооптические свойства магнитных нанокompозитов FePt-SiO₂, ФТТ 2005, **47**, 9.

8. Gan'shina E., Kochneva M., Vashuk M., Vinogradov A., Granovsky A., Guschin V., Scherbak P., Kim Ch.-O., Kim Ch.G. Magneto-optical properties of magnetic nanocomposites *Phys. Met. Metall.* 2005, 101, 1.

9. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O. Weak magnetic field annealing effect on magneto-optical and magnetostatic properties of Co-based amorphous ribbons. 15-th JMM conference 2001(Bilbao), E-12.

10. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O. Magnetostatic and magneto-optical properties of Co-based amorphous ribbons. ISPM/ISAMPT 2001 conference (Taiwan), AB-3, 80.

11. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O. Depth profiles of magnetic anisotropy in annealed Co-based amorphous ribbons. 46 th MMM conference 2001 (Washington), GE-12.

12. Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Kim C.G., Kim C.O. Магнитооптические свойства аморфных лент на основе Co с асимметричным ГМИ. Труды XVIII- школы-семинара НМММ-18 2002 (Москва), 184-186.
13. Kim C.G., Rheem Y.W., Kim C.O, Yoon S.S., Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Зайченко Д.Н. High-temperature dependence of asymmetric giant magnetoimpedance and magneto-optical properties in Co-based amorphous ribbons. Тезисы MISM 2002 (Москва), 129.
14. Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Kim C.G., Kim C.O. Анизотропия магнитных свойств в приповерхностном слое отожженных аморфных лент на основе Co. Сборник трудов ODPO-2002 (Сочи), 1, 80-81.
15. Виноградов А.Н., Ганьшина Е.А., Гушин В.С., Демидович Г.Б., Козлов С.Н., Кочнева М.Ю., Перов Н.С. Магнитооптические и магнитные свойства нанокompозитов ферромагнитный металл-пористый кремний. Сборник трудов Международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов», 2003 (Сочи), 68.
16. Gan'shina E., Kochneva M., Vashuk M., Aimuta K, Nishimura K, Inoue M. Influence of order on magneto-optical properties of nanocomposite FePt-SiO₂ ICFM 2003 (Crimea, Ukraine)
17. Aimuta K., Gan'shina E., Granovsky A., Kochneva M., Tsherbak P., Vashuk M., Nishimura K., Uchida H., Inoue M. Optical and magneto-optical properties of magnetic FePt-SiO₂ nanocomposites ISAM2 2003 (Yokohama, Japan) We-Q-2.
18. E. Gan'shina, K. Aimuta, A. Granovsky, M. Kochneva, P. Sherbak, M. Vashuk, K. Nishimura, and M. Inoue Optical and magneto-optical properties of magnetic nanocomposites FePt-SiO₂. 9-th MMM-Intermag conference 2004 (California)
19. Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Федянин А.А., Kobayashi D., Inoue M. Экваториальный эффект Керра в магнитном фотонном кристалле на основе железо-иттриевого граната. Труды XIX- школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 2004 (Москва) ВЦ-26, 641-642.
20. Ганьшина Е.А., Кочнева М.Ю., Подгорный Д.А., Щербак П.Н., Демидович Г.Б., Козлов С.Н. Структура и магнитооптические свойства гранулированных нанокompозитов пористый кремний – кобальт. Труды XIX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 2004 (Москва), 613-614.
21. Gan'shina E., Kochneva M., Vashuk M., Vinogradov A., Granovsky A., Guschin V., Scherbak P., Kim Ch.-O., Kim Ch.G. Magneto-optical properties of magnetic nanocomposites. Book of abstract of the International Conference Eastmag 2004, 337.

Цитируемая литература

1. Kim C.G., Jang K.J., Kim H.C., and Yoon S.S. Asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon. *J. Appl. Phys.* 1999, **85**, 8, 5447-5449.
2. K.J. Jang, C.G. Kim, S.S. Yoon, K.H. Shin, *IEEE Trans. Magn.* 1999, **35**, 3889.
3. Jang K.J., Kim C.G., Kim H.C., Yu S.C., Shin K.H., Annealing temperature dependence of permeability spectra and asymmetrical giant magnetoimpedance in Co-based amorphous ribbon *J. Appl. Phys.* 2000, **87**, 9, 5260-5262.
4. Jang K.J., Kim C.G., Yoon S.S., Yu S.C., Effect of annealing field on asymmetric giant magnetoimpedance profile in Co-based amorphous ribbon, *J. Magn. Magn. Mater.* 2000, **215-216**, 488-491.
5. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985, 367.
6. Костюрин А.А. Кринчик Г.С, Магнитооптика, М: Знание, 1980, 50.
7. Lambeth D.N., Velu E.M.T., Bellesis G.N., Lee L.L., Laughlin D.E., Media for 10 Gb/in.² hard disk storage: Issues and status (invited) *J. Appl. Phys.* 1996, **79**, 8, 4496-4501.
8. Akinaga H., Mizuguchi M., Manago T., Gan'shina E., Granovsky A., Rodin I., Vinogradov A., Yurasov A., Enhanced magneto-optical response of magnetic nanoclusters embedded in semiconductor. *J. Magn. Magn. Mat.* 2002, **242-245**, 470-472.
9. Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н. и др., Эволюция оптических и магнитооптических свойств нанокмозитов аморфный металл – диэлектрик, *ЖЭТФ* 2004, **125**, 5, 1172-1182.
10. Bruggeman D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen I. Dielektrizitatskonstanten und leitfahigkeiten der mischkorper aus isotropen substanzen. *Ann. Der Phys. (Leipzig)* 1935, **24**, 636-679.
11. Kato H., Matsushita T., Takayama A., Egawa M., Nishimura K., Inoue M., Effect of optical losses on optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals for use in optical isolator devices *Optics Communications* 2003, **219**, 271-276.
12. Кринчик Г.С., Крылова В.А., Берденникова Е.В., Петров Р.А., *ЖЭТФ* 1973, 65, 715.
13. Москвин А.С., Зенков А.В., Висмут индуцированное усиление магнито-оптики ферритов-гранатов. Теоретический анализ, *ФТТ* 2002, **44**, 10, 1811-1818.
14. Звездин А.К., Котов В.А Магнитооптика тонких плёнок. М.: Наука 1988.
15. Виноградов А.П., Ерохин С.Г., Грановский А.Б., Иноуэ М. Полярный эффект Керра в многослойных системах (магнитофотонных кристаллах). *Радиотехника и электроника* 2004, **49**, 6, 726-729.
16. Федянин А.А., Ешида Т., Нишимура К., Маровский Г., Иноуэ М., Акципетров О.А., Генерация магнитоиндуцированной гармоника в магнитофотонных микрорезонаторах на основе феррит-гранатов, *Письма в ЖЭТФ* 2002, **76**, 8, 609-613.