

На правах рукописи

**ФРОЛОВ**  
**Георгий Иванович**

**МАГНИТОСТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПЛЕНОЧНЫХ  
КОНДЕНСАТАХ НА ОСНОВЕ 3d-МЕТАЛЛОВ И  
СПЛАВОВ РЕДКАЯ ЗЕМЛЯ – ПЕРЕХОДНОЙ МЕТАЛЛ:  
ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ**

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Красноярск – 2004

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
и Научно-исследовательском физико-технологическом институте  
Красноярского государственного технического университета  
Минобразования РФ

Научный консультант:

**доктор физико-математических наук, профессор** Исхаков Р.С.

Официальные оппоненты:

**доктор физико-математических наук, профессор** Никитин С.А.  
Московский государственный университет, г. Москва  
**доктор физико-математических наук, профессор** Ермаков А.Е.  
Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург  
**доктор физико-математических наук, профессор** Ким П.Д.  
Институт физики СО РАН, г. Красноярск

Ведущая организация:

Уральский государственный университет, г. Екатеринбург

Защита состоится «    » «    » 2004 года в    часов в актовом зале  
на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 при Институте физики  
им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу:  
660036, г. Красноярск, Академгородок, Институт физики СО РАН,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН.

Автореферат разослан «    »    2004 г.

Ученый секретарь

**доктор физико-математических наук** Аплеснин С.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Изучение свойств конденсатов при вариации их структуры дает ценную информацию для развития реальной модели конденсированных веществ и создает предпосылки получения новых материалов с заданными свойствами. Особое место в исследовании неоднородных твердых тел занимают структуры с масштабом неоднородностей, сравнимым с характерными длинами, определяющими физические свойства однородных твердых тел: длиной волны носителей тока, толщиной доменной стенки и радиусом обменного взаимодействия в магнетиках, корреляционной длиной в твердых растворах и т. д. Несмотря на различную природу этих характерных длин, их величина зачастую лежит в интервале от десятков до сотен межатомных расстояний, т.е. в нанометровом диапазоне.

Особенности свойств тонких магнитных пленок (ТМП) определяются, с одной стороны, размерным фактором, связанным с малой протяженностью объектов вдоль одной из координат, а с другой стороны, структурно-химической неоднородностью образцов. Исследования физических свойств магнитопленочных материалов с наноструктурными неоднородностями являются комплексной проблемой, в которой можно выделить три основных аспекта:

1. создание материалов с заданной микроструктурой;
2. установление и интерпретация корреляции структура – свойства;
3. получение магнитопленочных материалов со свойствами, востребованными современной практикой.

В диссертации затронуты все из перечисленных аспектов проблемы на примере аморфных пленочных сплавов редкая земля – переходной металл (РЗМ - ПМ) и нанокристаллических пленок 3d-металлов.

В 70 – 80 г.г. прошлого столетия в общем объеме физических исследований и технических разработок в области магнитных материалов аморфные пленки сплавов РЗМ – ПМ занимали достойное место, что определялось широкими перспективами их использования в устройствах

магнитной памяти. Однако, конденсаты этих сплавов были весьма непростыми объектами исследований, в том числе и из-за трудностей установления связей между их структурой и магнитными свойствами. Необычная форма петель гистерезиса вблизи точки магнитной компенсации, которой характеризовались эти сплавы, природа перпендикулярной магнитной анизотропии и причины временной нестабильности магнитных свойств конденсатов - все эти вопросы требовали своего разрешения.

В то же время недостаточно изученными были и эффекты взаимодействия лазерного излучения с этими материалами. В стороне оставалось решение задачи об исследовании возможностей записи на пленках РЗМ – ПМ информации аналогового типа. Как первый, так и второй круг вопросов стали предметом наших исследований.

В начале 90-х годов объектом повышенного интереса магнитологов стали нанокристаллические материалы. Особенности свойств этих материалов определялись как индивидуальными свойствами наночастиц, которые входят в данные конденсаты, так и эффектами магнитного взаимодействия между ними. В то время исследования проводились на образцах с размером наноблоков  $\geq 10$  нм, так как технология их получения была достаточно простой: использовался переход в нанокристаллическое состояние при отжиге аморфных сплавов. На повестку дня был поставлен вопрос о создании технологии нанокристаллических магнитных пленок с размером частиц  $< 10$  нм, что открывало возможности реализации в этих материалах более широкого набора новых свойств.

Актуальность работы по созданию и исследованию нанокристаллических материалов обусловлена необходимостью развития представлений о свойствах твердых тел на сверхмалых масштабах. Определение новых способов управления этими свойствами открывает широкие возможности применения нанокристаллических магнитных пленок в электронике, информатике, СВЧ – технике и других областях.

**Целью работы** является разработка физико-технологических основ создания магнитопленочных материалов с заданными свойствами.

Установление и интерпретация связи между различными видами структурной неупорядоченности и магнитными свойствами пленочных конденсатов.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов состоит в том, что:

- Разработана вакуумная технология нанесения магнитопленочных конденсатов, создающая основу для получения структурно- и магнитонеровесных образцов с необходимой степенью топологической и химической неупорядоченностью.
- Проведено качественное и количественное описание влияния неоднородностей химического и фазового состава на магнитные и электрические свойства неравновесных пленочных конденсатов.
- Предложена модель формирования перпендикулярной магнитной анизотропии в аморфных ферромагнитных пленках, основным источником которой являются высокоанизотропные кристаллоподобные кластеры, формирующиеся в области подложки.
- Теоретически и экспериментально исследованы особенности термомагнитной записи информации в аморфных ферромагнитных пленках при воздействии коротких импульсов лазерного излучения ( $\tau < 10$  нс).
- Разработаны физические принципы и созданы магнитопленочные материалы для записи аналоговой информации.
- Проведено комплексное исследование магнитных и электрических свойств нанокристаллических пленок 3d – металлов с размером наночастиц  $< 10$  нм. Изучены особенности перестройки структуры и модификация физических свойств этих материалов в результате термической релаксации.
- Проведено экспериментальное исследование влияния эффектов магнитного взаимодействия между суперпарамагнитными частицами на физические свойства пленочных нанокомпозитов.

**Практическая ценность** полученных в диссертации результатов определяется тем, что:

- Предложен новый механизм термомагнитной записи информации в аморфных пленках РЗМ-ПМ, энергетическая чувствительность которого на порядок выше порога чувствительности обычного метода записи в точке Кюри.
- На базе разработанного термомагнитного метода записи аналоговой информации создан прибор для визуального наблюдения и фотометрирования структуры оптических излучений и визуализации магнитных полей рассеяния магнитных головок, лент, дисков.
- Показана возможность создания высокорезистивных магнитомягких материалов для устройств СВЧ-электроники на базе нанокристаллических пленок 3d - металлов.
- Предложено использовать наногранулированные материалы с упорядоченным расположением магнитных наночастиц для создания магнитопленочного носителя со сверхплотной записью информации  $>10^{10}$  бит/см<sup>2</sup>.

На основе проведенных исследований были выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по заданию ГКНТ при СМ СССР и ряда министерств. Были разработаны и переданы в производство магнитопленочные датчики слабых магнитных полей, технология получения макетов магнитооптических дисков, магнитооптический визуализатор полей рассеяния на магнитных носителях и магнитных головках.

**На защиту выносятся:**

1. Технология получения аморфных пленок РЗМ – ПМ в условиях сверхвысокого вакуума с контролем магнитных параметров «in situ» и новая технология импульсно-плазменного напыления нанокристаллических пленочных конденсатов переходных металлов с размером структурных наноблоков  $< 5$  нм.
2. Результаты исследования особенностей структуры и магнитной структуры ферромагнитных пленок РЗМ – ПМ, ответственных за

необычное поведение магнитных свойств конденсатов. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов перемагничивания этих пленок.

3. Установление влияния типа подложки, технологических условий напыления и термоотжига на величину перпендикулярной магнитной анизотропии (ПМА) в пленках РЗМ-ПМ. Идентификация особенности структуры, ответственной за формирование ПМА.
4. Исследование влияния длительности лазерного излучения на энергетическую чувствительность термомагнитной записи (ТМЗ) в пленках РЗМ-ПМ. Теоретическое и экспериментальное обоснование участия магнитострикционных эффектов в процессе ТМЗ.
5. Изучение возможности термомагнитной записи информации аналогового типа на пленках РЗМ-ПМ.
6. Установление корреляции структура – магнитные свойства в нанокристаллических пленках 3d- металлов в исходном состоянии и ее модификация в результате отжига. Идентификация размера и структуры наночастиц и их влияние на магнитные и электрические свойства конденсата.
7. Особенности модификации магнитных свойств нанокристаллических пленок 3d- металлов при переходе из суперпарамагнитного в магнитоупорядоченное состояние за счет эффектов магнитного взаимодействия между наночастицами.
8. Создание структурного порядка в системе наночастиц – путь к получению магнитных материалов с новыми свойствами.
9. Устройства оптической обработки информации на базе аморфных пленок РЗМ-ПМ.

**Личный вклад автора.** При выполнении работы в коллективе автором сделан определяющий вклад в постановку задачи исследования, анализ и интерпретация результатов, написание статей. На основе результатов, представленных в гл. 1, 4, 5, под руководством автора были защищены три кандидатские диссертации и одна представлена к защите.

**Апробация полученных результатов.** Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Международном коллоквиуме «Magnetic Films and Surfaces» (Регенсбург, 1975; Дюссельдорф, 1994); на международных конференциях «International Symp. on Magnetism» (Warsaw, 1994; Москва, 1999); на международной конференции «Magn.multilayers and low dimens. magn.» (Ekaterinburg, Russia, 1994); на международной конференции NANO-2 (Herald of Russian Acad. Tech. Sci. 1994); на Всесоюзных конференциях по физике магнитных явлений (Донецк, 1977; Харьков, 1979; Пермь, 1981); на Всероссийских конференциях – школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва – МГУ, 1994; 1996; 1998; 2000; 2002; 2004); на Втором всероссийском семинаре «Моделирование неравновесных систем-99» (Красноярск, 1999); на Первом междисциплинарном семинаре «Фракталы и прикладная синергетика» (Москва – РФФИ, 1999); на XVI Российской конференции по электронной микроскопии (Черноголовка, 1996); на Республиканских конференциях «Автоматизация и механизация процессов производства и управления» (Каунас – КПИ, 1979, 1980); на Всесоюзной школе-семинаре «Новые магнитные материалы для микроэлектроники» (Орджоникидзе, 1976); на Региональных конференциях с международным участием «Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры» (Красноярск, 1996; Красноярск, 1999); на Зональных семинарах по физике магнитных пленок (Иркутск, 1975, 1980, 1982); на Краевых конференциях НТО им. А.С. Попова (Красноярск, 1975, 1978, 1981, 1982); на 2-м Краевом совещании-семинаре «Аморфный магнетизм» (Красноярск, 1980); на Международной научно-практической конференции САКС (Красноярск, 2001; 2003); на международной конференции «International Baikal scientific conference (Magnetic materials)» (Иркутск, 2001; 2003); на международном научном семинаре «Инновационные технологии – 2001» (Красноярск, 2001).

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 44 опубликованных работах; технические разработки оформлены в виде 6 авторских свидетельств на изобретения.



**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающей 207 названий, и изложена на 256 страницах машинописного текста, в том числе 108 рисунков и 14 таблиц.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

*Во введении* обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, её научная и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту, отражены структура, объем и содержание диссертационной работы.

*Первая глава* диссертации посвящена установлению влияния особенностей структуры аморфных ферромагнитных пленок РЗМ-ПМ на их магнитные свойства. Ключевым вопросом при интерпретации этой связи является разработка метода напыления пленочных конденсатов с максимальным контролем технологических условий получения. Для решения этой задачи был использован метод термического напыления из 2-х тиглей в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-9}$  Торр) с контролем основных магнитных параметров «in situ». Данные Оже-анализа показывают сильную зависимость содержания кислорода в пленках от величины рабочего вакуума.

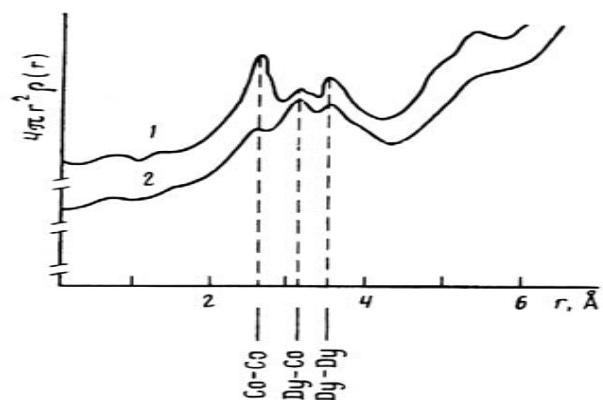


Рис.1. Кривые ФРП для пленок  $Dy_{23}Co_{77}$  (сразу после напыления) для различных ориентаций образца относительно падающего пучка: 1—образец ориентирован перпендикулярно падающему лучу, 2—образец наклонен на  $60^\circ$  к падающему лучу

Методами дифракции электронов было установлено, что образцы в исследуемом диапазоне концентраций имеют аморфную структуру, которая содержит кластеры размером 1-1,5 нм. В данных пленках регистрируется текстура, при которой пары атомов ПМ-ПМ расположены преимущественно вдоль нормали к плоскости пленки (рис.1).

Магнитная структура пленок установлена из исследований температурной ( $T = 4 - 300K$ ) и полевой ( $H = 0 - 60$  кЭ) зависимостей намагниченности. Полученная из этих данных « $H - T$ » фазовая диаграмма проинтерпретирована в рамках феноменологической теории спин-переориентационных переходов для одноосных ферритмагнетиков. Данные ферромагнитного резонанса и лоренцевой электронной микроскопии показали, что на поверхности конденсатов образуется слой с плоскостной анизотропией, в то время как в объеме пленки формируется ПМА.

Исследование процессов перемагничивания тонких аморфных пленок РЗМ — ПМ показало, что необходимо учитывать следующие моменты. С одной

стороны, система, представляющая собой обычный ферромагнетик, имеет критические поля перемагничивания, определяемые собственной « $H-T$ » диаграммой, которая, в свою очередь, определяется такими параметрами системы, как межподрешеточный обмен, анизотропия подрешеток, внутривидовые обмены, намагниченности подрешеток. С другой стороны, сильная окислительная способность РЗМ, влияние подложки на собственные параметры системы, делают систему неоднородной по толщине – в простейшем случае двухслойной. Это усложняет интегральную « $H-T$ » диаграмму и приводит к необходимости учитывать обменное взаимодействие между слоями, которое может существенно влиять на процессы перемагничивания.

По всей вероятности, процессы окисления в аморфных пленках  $DyCo$  модифицируют как величину намагниченности в приповерхностном слое, так и величину анизотропии, при этом фактор качества приповерхностного слоя стремится к единице. В пленках докомпенсационных сплавов (по концентрации  $M_{Co} > M_{Dy}$ ) из-за малости толщины окисленного слоя с  $Q < 1$ , ось легкого намагничивания приповерхностного слоя находится под углом к плоскости пленки. В пленках послекомпенсационных сплавов окисленный слой становится докомпенсационным и, в результате обменного взаимодействия, магнитный момент приповерхностного слоя может быть противоположен магнитному моменту основного слоя.

Механизмы формирования большой величины ( $K \sim 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>) перпендикулярной магнитной анизотропии (ПМА) в аморфных пленках РЗМ-ПМ стали предметом многочисленных исследований. Сильная зависимость величины ПМА от технологических факторов получения и обработки образцов затрудняют однозначную интерпретацию природы ПМА. Нами проведены исследования по влиянию на ПМА в пленках  $Dy-Co$  парциального давления кислорода в процессе напыления, типа используемых подложек и температуры отжига. В таблице 1 приведены данные, показывающие величину эффектов влияния температуры отжига на ПМА в пленках, напыленных на монокристаллы  $NaCl [100]$  и стекло.

Таблица 1. Константа ПМА в пленках на NaCl и стекле в зависимости от температуры отжига

T <sub>ан</sub> , К*	K <sub>L</sub> , Дж/м <sup>3</sup>	
	Подложка - NaCl	Подложка – стекло
Исх.	32·10 <sup>4</sup>	11·10 <sup>4</sup>
370	45·10 <sup>4</sup>	16·10 <sup>4</sup>
470	30·10 <sup>4</sup>	2·10 <sup>4</sup>
570	8·10 <sup>4</sup>	ОЛН в плоскости
670	ОЛН в плоскости	ОЛН в плоскости

\* - Время отжига – 1 час.

В пленках на NaCl величина ПМА в три раза больше, чем в пленке на стекле. Отжиг при T<sub>ан</sub> = 370К приводит к увеличению ПМА как в том, так и другом конденсате. На электронограммах, снятых с этих пленок, появляются точечные рефлексы на фоне гало. Расшифровка этих картин микродифракции показала, что преобладающая ориентация зерен образованных фаз типа DyCo<sub>5</sub> и Dy<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> - [1010]. Такая ориентация соответствует текстуре, связанной с преимущественным расположением пар Co-Co в направлении, перпендикулярном плоскости пленки. Ориентирующее действие подложки NaCl усиливает эту текстуру.

На основании этих экспериментальных данных сделан вывод о превалирующем вкладе в формирование ПМА пленок РЗМ-ПМ текстурированных кристаллоподобных кластеров с высокой локальной анизотропией.

Основным недостатком аморфных пленок сплавов РЗМ-ПМ, как потенциальных магнитных носителей информации, является временная нестабильность их параметров. В основе деграционных эффектов лежат два процесса: во-первых, процессы окисления (как во время получения, так и при их хранении), что связано с высокой химической активностью атомов РЗМ; во-вторых, структурная нестабильность аморфного состояния. Для

получения основополагающей информации о кинетике структурных изменений этих материалов под влиянием внешних воздействий необходимо было создать технологию напыления пленок РЗМ-ПМ с максимальными возможностями контроля, как технологических условий, так и физических параметров конденсатов.

Было исследовано влияние температурного отжига на магнитные и магнитооптические свойства пленок DyCo толщиной 20нм, полученных в условиях сверхвысокого вакуума с контролем их магнитных параметров «in situ». Было установлено, что различный ход кривых  $H_c = f(T_{an})$  для пленок до- и закомпенсационного состава связан с эффектами окисления. Нанесение на подложку подслоя Dy толщиной 2-4нм практически исключает влияние термоотжига на величину  $H_c$ . Однако, при  $T_{an} > 300^\circ\text{C}$  ПМА исчезает, как и в случае пленки без подслоя РЗМ. На основании полученных данных сделан вывод о том, что эффекты кристаллизации в аморфных пленках РЗМ-ПМ наступают при  $T_{an} > 300^\circ\text{C}$ . Нанесение защитных слоев РЗМ как со стороны подложки, так и на верхнюю поверхность пленки более чем на три порядка увеличивает время стабилизации параметров.

Во второй главе диссертации приведены результаты исследований эффектов взаимодействия лазерных излучений с пленками РЗМ-ПМ. Фотоиндуцированные процессы в твердом теле лежат в основе современных методов оптической записи и обработки информации. Запись информации на тонких магнитных пленках (ТМП) термомагнитным способом связана с изменением магнитного состояния локальных участков в результате одновременного воздействия магнитного поля и температуры. Один из способов изучения этого взаимодействия основан на предположении, что лазерный импульс может рассматриваться как тепловой источник. Пусть  $Q(r, t)$  – количество тепла, выделяемое лазерным импульсом в единице объема пленки в единицу времени. Его можно представить в виде

$$Q(r, t) = -dP_0(r, z)/dz S_r(t);$$

где  $P_0(r, z)$  – плотность поглощаемой в пленке мощности излучения;  $S_r(t)$  – функция, определяющая форму лазерного импульса во времени.

Из этого выражения следует, что изменение длительности импульса должно приводить к изменению требуемой мощности излучения, чтобы нагреть локальный участок до нужной температуры. В частности, при уменьшении длительности импульса необходимо увеличивать мощность излучения. Для проверки этого вывода нами были проведены эксперименты и получены следующие результаты:

$$\tau = 10^{-7} \text{ с } (\lambda = 10,6 \text{ мкм}), U_{\min} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2;$$

$$\tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с } (\lambda = 0,35 \text{ мкм}), U_{\min} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2;$$

$$\tau = 3 \cdot 10^{-11} \text{ с } (\lambda = 0,53 \text{ мкм}), U_{\min} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/см}^2.$$

Эти данные противоречат оценке теплового баланса, сделанной выше. Для объяснения указанных результатов был предложен другой механизм записи. Проведенный термодинамический анализ взаимодействия лазерного излучения с ТМП показал, что при  $\tau < 10^{-7}$  с в пленке развиваются значительные напряжения. Это позволяет в магнестрикционных материалах проводить запись информации с использованием нового термоупругомагнитного механизма (ТУМЗ), который обеспечивает более высокую энергетическую чувствительность, чем запись в точке Кюри.

Из термодинамических соотношений следует, что запись информации на пленках можно проводить и при постоянной температуре с помощью определенного статического давления. Расчет показал, что для перемагничивания локального участка пленки сплава TbFe необходимо приложить давление  $\sim 10^3$  кг/см<sup>2</sup>. Примерно такие давления развиваются при письме твердым карандашом. На рис. 2 представлен пример такой записи немагнитным наконечником на пленке TbFe.

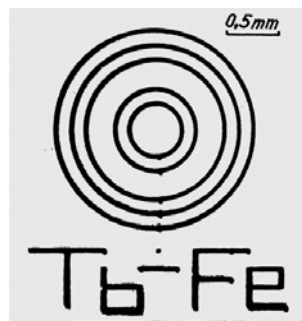


Рис. 2. Пример записи немагнитным наконечником

Дополнительно к этому проведено детальное исследование влияния упругих напряжений и деформации на процесс термомагнитной записи лазерным лучом. Были определены условия, при которых термоупругие напряжения понижают энергетический порог записи.

В данной главе также представлены результаты исследований по термомагнитной записи аналоговой информации на аморфных пленках РЗМ-ПМ. Для ее реализации получены пленки с «наклонной» петлей гистерезиса, в которых коэрцитивная сила уменьшается с ростом температуры и совпадает по величине для предельной и частных петель гистерезиса.

Типичный вид петель гистерезиса для пленок RFe при фиксированном значении температуры приведен на рис. 3, а. Для пленок в размагниченном состоянии увеличение внешнего магнитного поля  $H$  ( $H \parallel$  ОЛН) вплоть до  $H \sim H_c$  не приводит к изменению ее намагниченности (отрезок  $OA$ ).

Дальнейшее увеличение поля сопровождается линейным ростом намагниченности ( $AB$ ). При снятии поля достигнутое значение  $M$  не меняется ( $BC$ ). Частные и предельная петли гистерезиса отличаются только «раскрытием» по оси  $M$ .

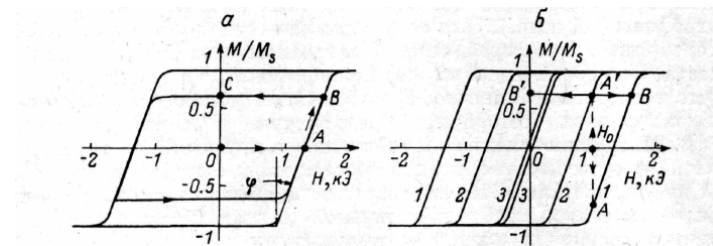


Рис. 3. Петли гистерезиса пленок  $Tb_{0.24}Fe_{0.76}$ . а—предельная и частные петли при  $T=\text{const}$ ; б—предельные петли при температурах  $T_1 \sim T_3 = 20$  (1),  $T_2 = 60$  (2),  $T_3 = 95^\circ \text{C}$  (3).

При увеличении температуры величина раскрытия предельной петли гистерезиса уменьшается, а форма ее сохраняется (кривые 1—3 на рис. 3,б). Отметим также, что если при  $T=T_1$  и  $H=H_0$  пленка находится в

состоянии  $A$  (рис. 3, б), то при увеличении температуры до  $T=T_2$  она переходит в состояние  $A'$ . Уменьшение температуры до  $T=T_1$  не переводит магнитную систему ТМП обратно в состояние  $A$ , состояние  $A'$  сохраняется.

При этом увеличение внешнего магнитного поля не меняет величину относительной намагниченности (отрезок  $A'B$ ) до тех пор, пока мы не дойдем до предельной петли гистерезиса (точка  $B$ ), а при уменьшении поля до нуля магнитная система оказывается в состоянии  $B'$  (рис. 3, б).

Из этих данных следует, что на пленках РЗМ-ПМ можно регистрировать как температурный рельеф (тональные изображения, голограммы и т.д.), так и рельеф магнитного поля (поля рассеяния на магнитных лентах, головках и т.д.).

Рассмотрим ТМЗ аналоговой информации на примере записи тонального изображения. Процесс записи заключается в следующем.

В исходном состоянии при комнатной температуре магнитная пленка РЗМ-ПМ, приведенная в контакт с негативом, находится в однодоменном состоянии с ориентацией намагниченности в  $-z$  направлении (рис. 4). Перпендикулярно плоскости пленки в  $+z$  направлении приложено внешнее магнитное поле  $H_z < H_c$ . При воздействии светового излучения пространственное распределение плотности негатива однозначно определяет распределение локальных температур (температурного рельефа) в плоскости пленки. Этот температурный рельеф приводит к соответствующему изменению магнитного состояния локальных участков пленки.

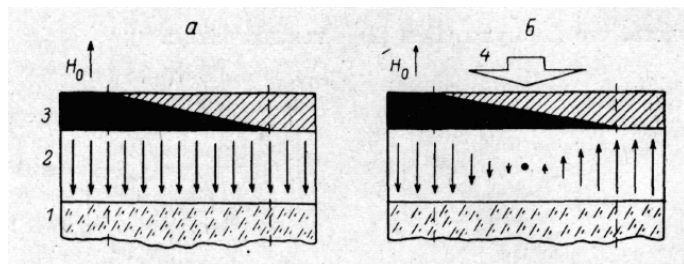


Рис. 4. Схема терромагнитной записи температурного рельефа.



$a$  — состояние ТМП до засветки,  $b$  — после засветки. 1 — стеклянная подложка, 2 — пленка RFe<sub>3</sub>, 3 — негатив, 4 — световое излучение.

Сформированная таким образом в момент засветки доменная структура повторяет, в конечном счете, изображение на негативе. При охлаждении пленки до комнатной температуры доменная структура «замораживается» и сохраняется после снятия поля записи (рис.4б). Визуализация и фотографирование полученного таким образом тонального магнитного изображения осуществлялись с помощью магнитооптического эффекта Фарадея.

Для объяснения механизма записи тональных изображений нами была использована следующая модель. Предполагалось, что ТМП состоит из большого ансамбля слабозаимодействующих областей (магнитных микродоменов) размером  $< 1$  мкм, равномерно распределенных по объему пленки. Эти области, в которых ОЛН перпендикулярна плоскости пленки, характеризуются большой дисперсией коэрцитивной силы и сильной ее зависимостью от температуры (использовался сплав РЗМ-ПМ с  $T_k \sim 300K$ ). Приведены экспериментальные данные, подтверждающие справедливость применения данной модели.

**В третьей главе** диссертации рассмотрены возможности использования аморфных пленок РЗМ-ПМ в устройствах оптической обработки информации. Для исследования параметров пленок РЗМ-ПМ как потенциального материала для устройств реверсивной магнитооптической памяти были созданы специальные установки, позволяющие проводить запись информации в режимах последовательного и параллельного формирования микродоменных структур на большой площади. Проведены исследования по созданию макета магнитооптического диска диаметром 120 мм на стеклянной основе толщиной 1,2 мм. Макеты получены методом термического напыления из 2-х тиглей в вакууме  $10^{-6}$  Торр. Для увеличения однородности распределения конденсата на поверхности подложки использовалось ее вращение относительно испарителей.

Эксперименты по считыванию показали, что на дисках удобнее использовать магнитооптический эффект Керра, т.к. при этом упрощаются требования к сохранению соосности записывающего и приемного каналов. Однако применение этого эффекта почти на порядок уменьшает полезный сигнал. Для увеличения отношения сигнал / шум было предложено использовать многослойную пленочную структуру, в которой рабочий магнитный слой напыляется или непосредственно на слой из немагнитного материала с высоким коэффициентом оптического отражения, или через диэлектрическую прослойку. Подбор материала и толщины дополнительных слоев приводит к значительному увеличению сигнала считывания.

Разработанный нами диск представлял собой 4-х слойную структуру, в которой запись и считывание осуществляется со стороны подложки (рис.5). Пленка РЗМ-ПМ ( $h = 400 - 500 \text{ \AA}$ ) наносится непосредственно на подложку, далее напыляется диэлектрический слой SiO ( $h = \lambda/4$ , где  $\lambda$  – длина волны света) и слой Cu, на который наносился слой SiO ( $h = 5000 \text{ \AA}$ ) для предохранения медного слоя от окисления. На рис. 5б приведен пример записи битовой информации (размер битов  $2 \times 6 \text{ мкм}^2$ ). Полученные макеты магнитооптических дисков использовались для отработки систем записи и считывания информации в цифровых устройствах бытового и специального назначения. Образцы показали следующие эксплуатационные характеристики: энергетическая чувствительность по записи  $2 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/мкм}^2$ , отношение сигнал/шум  $\sim 50$  дБ при считывании со скоростью  $1,5 \cdot 10^6$  бит/с ( $\lambda = 0,78 \text{ мкм}$ ).

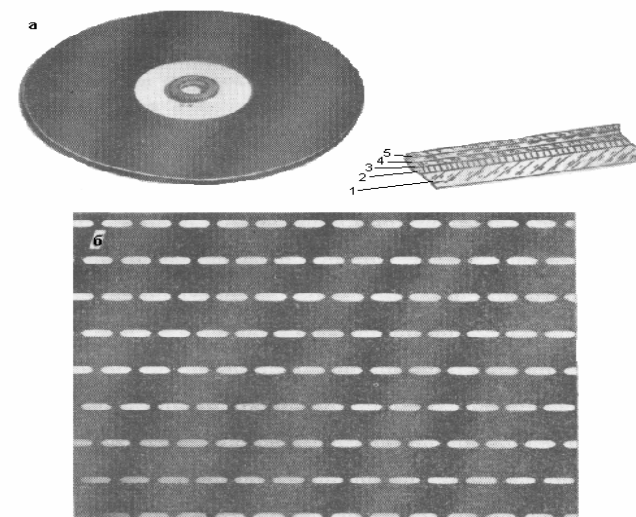


Рис.5 Макет магнитооптического диска (а) и пример записи битовой информации (б).

1 – подложка, 2 – слой РЗМ-ПМ, 3 – слой SiO, 4 – слой Си, 5 – слой SiO

На базе пленок, позволяющих регистрировать информацию аналогового вида, создан магнитооптический визуализатор излучений ВИ-1 (рис.6).

#### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИ-1М.

Диапазон регистрируемых длин волн	0,2 – 25 мкм
Энергетическая чувствительность	$10^{-3}$ Дж /см <sup>2</sup>
Минимальная длительность одиночного импульса регистрируемого излучения	$10^{-11}$ с
Динамический диапазон регистрируемых энергий	>100
Линейное разрешение	> $10^3$ лин/ мм
Количество циклов запись – стирание	> $10^6$



Рис.6 . Визуализатор оптических излучений

Прибор позволяет осуществлять наблюдение и фотографирование получаемых изображений в позитивном, негативном, а также в режиме оконтуривания изоэнергетических зон, что значительно упрощает обработку данных изображений. Исследования по записи тональных изображений на пленках РЗМ-ПМ показали, что их можно использовать в устройствах магнитной фотографии.



Рис. 7 . Вид записанного на пленке тонального изображения при положении анализатора от  $+3,5^\circ$  до  $-3,5^\circ$ .

На рис.7 представлен вид записанного на пленке DyFe полутонового изображения, при этом его визуализацию можно проводить в любой промежуточной фазе (от негатива до позитива),

изменяя угол плоскости поляризации анализатора (или поляризатора) относительно положения полной компенсации. Проведенные исследования показали, что пленки РЗМ-ПМ можно использовать в некоторых областях специальной и художественной фотографии и голографии.

Также проведены эксперименты по регистрации полей рассеяния на магнитных лентах и головках. Полученные результаты показали, что высокое линейное разрешение ТМП в сочетании с возможностью запоминания сформированных полями рассеяния картин позволяет проводить регистрацию как статических, так и импульсных характеристик магнитного поля магнитных головок.

*В четвертой главе* диссертации исследуется корреляция структура-магнитные свойства в нанокристаллических пленках 3d-металлов. Так как свойства нанокристаллических материалов проявляют сильную зависимость от размера структурных блоков, основополагающую роль в решении поставленной цели играет технология получения ультрадисперсных конденсатов. Для осаждения нанокристаллических пленок с размером частиц < 5нм нами предложен метод импульсно-плазменного распыления (ИПР) в вакууме  $10^{-6}$  Торр.

На пленках 3d-металлов, полученных методом ИПР, проведено комплексное исследование влияния отжига на их структуру и магнитные свойства. Для этого использовались рентгеновская и электронная микроскопия, Оже-анализ, а также мессбауэровская спектроскопия, ферромагнитный и спин-волновой резонансы, вибрационный магнитометр и индукционный петлескоп.

Оже-анализ показал, что в полученных конденсатах содержится большое количество углерода (~ 20ат.% в пленках Fe и ~30 ат.% в Co). Эта особенность химсостава образцов определяется химической активностью наночастиц 3d-металлов и особенностями использованного метода напыления (большая скважность между

импульсами). Данные о дисперсии и размерах наночастиц получены с помощью рентгеноструктурного анализа (по уширению рентгеновского дифракционного пика определен максимальный размер частиц  $L_{\max} = 3,5 - 4,0$  нм) и из толщинной зависимости электросопротивления (пленки становятся сплошными при  $h = 2,0 - 2,5$  нм, что соответствует  $L_{\min}$ ) (рис. 8а,б).

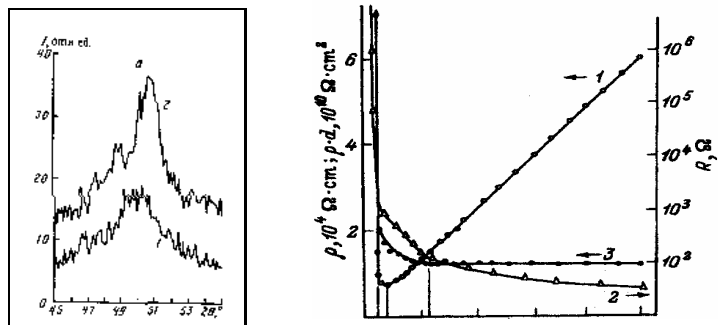


Рис. 8 а. Рентгеновская дифракционная картина с пленки Co в исходном состоянии

Рис. 8 б. Зависимость электрических параметров от толщины пленки Co

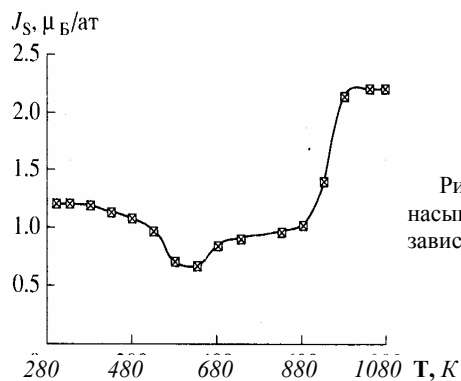


Рис 9. Намагниченность насыщения ( $J_s$ ) пленок Fe в зависимости от температуры

Величина магнитного момента в пленках Fe в исходном состоянии (рис. 9) меньше, чем у пленочных аналогов, получаемых обычными вакуумными

методами. В процессе отжига пленок намагниченность насыщения практически не изменялась до  $T_{an} < 700^{\circ}\text{C}$ , после дальнейшего отжига  $J_s$  становилась равной намагниченности насыщения объемного Fe.

На пленках Fe, допированных изотопом  $\text{Fe}^{57}$ , сняты мессбауэровские спектры. Мессбауэровские данные показывают, что в пленках железа в исходном состоянии наблюдаются две магнитные фазы ( $H_{st} = 330$  кЭ и  $H_{st} = 250$  кЭ) и только одна магнитная фаза после  $T_{an} > 700^{\circ}\text{C}$  ( $H_{st} = 330$  кЭ).

Из данных по спин-волновому резонансу была определена величина обменного взаимодействия. Оказалось, что константа обменного взаимодействия в пленках Fe (в исходном состоянии) почти на порядок меньше, чем у массивного Fe ( $A = 1 \div 4 \cdot 10^{-7}$  эрг / см). Из экспериментов по измерению низкотемпературного хода намагниченности в интервале 4,2 – 210 К была определена величина локальной анизотропии ( $K \sim 10^7$  эрг/см<sup>3</sup>), что более чем на порядок превышает константу магнитной анизотропии в объемном железе.

Наилучшим образом полученные результаты, а также данные электронной дифракции объясняет модель наночастицы, состоящей из «ядра» (3d- металл), окруженного карбидной фазой-«шубой». При нагревании карбидная фаза разлагается, и в образце остается только фаза 3d-металла.

В пленках Co проведены исследования электрических свойств. Обнаружено, что пленки имеют большое удельное сопротивление ( $> 10^{-4}$  ом•см) и нулевой ТКС в диапазоне  $T = 4 - 300$  К. Полученные результаты объясняются в рамках модели, предполагающей туннелирование электронов проводимости через граничные потенциалы с учетом возможного понижения плотности носителей заряда при уменьшении размера частиц.

Пленки Ni, полученные методом ИПР, содержат в исходном состоянии частицы размером 20 – 25 нм, что на порядок превышает размеры частиц, полученных в пленках Co, Fe. Это может быть связано с тем фактом, что никель характеризуется более высокими скоростями кристаллизации, чем Fe и

Со. Пленки Ni состоят из частиц ГПУ-фазы и имеют нулевую намагниченность. Эти данные можно интерпретировать на основе предположения, что эта фаза соответствует карбиду никеля ( $\text{Ni}_3\text{C}$ ). При отжиге происходит перестройка структуры, приводящая к формированию в пленках ГЦК-фазы Ni с магнитными параметрами, характерными для объемного аналога.

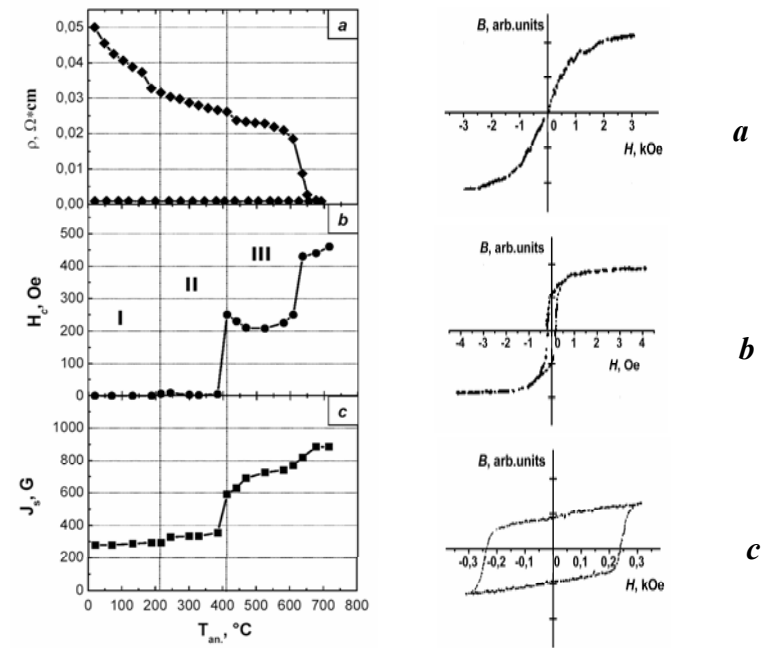
В пятой главе диссертации рассмотрены возможности практического использования нанокристаллических пленок 3d-металлов, а именно, вопросы создания высокорезистивных магнитомягких материалов для СВЧ-устройств и сред-носителей для сверхплотной магнитной записи.

Для решения первой задачи необходимо использовать нанокристаллические конденсаты с размером частиц  $L < 7$  нм, так как только при таких размерах наблюдаются эффекты локализации электронов проводимости. Однако, однодоменные ферромагнитные частицы при таких размерах переходят в суперпарамагнитное состояние, так как в этом случае тепловые флуктуации превышают порог перемагничивания, задаваемый магнитной анизотропией. Исследования, проведенные в конце прошлого столетия показали, что при увеличении объема магнитной фазы в системе суперпарамагнитных частиц в них наблюдается гистерезис. Предполагается, что появление магнитного порядка в этом случае задается эффектами магнитного взаимодействия между наночастицами. Природа и свойства этого магнитного состояния находятся в начальной стадии изучения.

Нами предлагается использовать этот переход для создания высокорезистивных магнитомягких материалов. Возможность реализации этой идеи показана на примере нанокристаллических пленок Co-Sm-O, полученных методом ИПР. На рис.10 показано влияние отжига на магнитные и электрические свойства этих пленок. В исходном состоянии данный композит является суперпарамагнетиком ( $T_B \sim 80\text{K}$ ) с большим электросопротивлением. При отжиге ( $T_{\text{ан}}=200 - 350^\circ$ ) в нем формируется кооперативный магнитный порядок с малой коэрцитивной силой.



Величины магнитных и электрических свойств в зависимости от условий синтеза и отжига могут значительно меняться. В таблице 2 приведены данные для пленок в исходном состоянии и после отжига. Видно, что отожженные пленки обладают неплохими магнитоякими свойствами при высоком удельном электросопротивлении.



**Рис. 10 а.** Зависимости удельного электросопротивления (а), коэрцитивной силы (б) и намагниченности насыщения (с) от температуры отжига.

**Рис. 10 б** Характерные формы петель гистерезиса для пленок Co-Sm-O: в исходном состоянии (а) и после отжигов при  $T_{an} = 300$  °C (б), при  $T_{an} = 480$  °C (с).

Таблица 2

	$J_s$ , G	$H_C$ , Oe ( $T = 300$ К)	$H_K$ , Oe ( $T = 300$ К)	$\rho$ , $\Omega \cdot \text{cm}$

Исходная	~ 300	-	-	$5 \cdot 10^{-2}$
После отжига	~ 360	0,5 - 3	10 -15	$4,3 \cdot 10^{-2}$

Таким образом, вместо обычно принятого метода получения магнитомягких нанокристаллических материалов, использующего структурный переход из аморфного в нанокристаллическое состояние, нами предлагается использовать магнитный переход в наногранулированных композитах из суперпарамагнитного состояния в область кооперативного магнитного упорядочения, обусловленного магнитными взаимодействиями между наночастицами. В данных материалах может быть получено более высокое удельное электросопротивление, что делает перспективным их использование в СВЧ-устройствах.

В настоящее время поставлена задача создания магнитных носителей с плотностью записи  $>10^{10}$  бит/см<sup>2</sup>. Для этого необходимы нанокристаллические материалы с размером магнитных частиц ~5нм и коэрцитивной силой  $>5$  кЭ. Чтобы в системе суперпарамагнитных частиц получить такое высокое значение  $H_c$ , необходимо значительно повысить температуру блокировки. Один из подходов к решению этой задачи заключается в создании в этой системе определенного структурного порядка. Ряд теоретических исследований магнитных свойств такой системы показал, что при определенной геометрии расположения наночастиц в образце, этот эффект может быть достигнут.

Для реализации этой задачи можно использовать высокую адсорбционную способность наночастиц к высокомолекулярным соединениям. Химические методы получения нанокомпозитов показали возможность решения этой проблемы, но в прикладном плане более перспективно использовать «сухой» способ (без использования растворов) формирования наногранулированных структурно-упорядоченных магнитных пленок. Поэтому для синтеза таких материалов предложено отработать технологию вакуумного осаждения нанокомпозитов, совмещающую физические и химические подходы.

Кроме чисто прикладного интереса, структурно-упорядоченные

нанокомпозиты открывают широкое поле деятельности для фундаментальных исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

В результате проведенной работы осуществлены экспериментальные и теоретические исследования ряда аспектов проблемы создания магнитопленочных материалов с новыми свойствами, востребованными современной практикой. Основные научные результаты, представленные в диссертации, сводятся к следующему:

1. Разработана технология получения аморфных пленочных сплавов РЗМ-ПМ в условиях сверхвысокого вакуума с контролем их магнитных параметров «in situ»; развит новый метод импульсно-плазменного напыления нанокристаллических пленок 3d-металлов с размером структурных блоков <5нм.

2. На пленках сплавов РЗМ (Tb, Dy) – ПМ (Fe, Co) впервые проведены систематические исследования корреляции структуры и магнитных свойств:

- электронной дифракцией установлена аморфная структура данных конденсатов со структурной единицей (размером 1,0-1,5нм), обладающей ближним порядком типа CaCu<sub>5</sub>, а также установлена текстурированность данной структуры, обусловленная преимущественным расположением пар атомов ПМ-ПМ вдоль нормали к плоскости пленки;
- обнаружены особенности температурной и полевой зависимостей намагниченности и ЭДС Холла, а также параметров СВЧ резонансного поглощения, которые обусловлены протеканием спонтанных и индуцированных магнитным полем ориентационных фазовых переходов в двухподрешеточном ферромагнетике, модифицированных неоднородностями атомной и химической структуры;

– в рамках феноменологического подхода исследована магнитная фазовая диаграмма одноосного ферримагнетика вблизи точки магнитной компенсации ( $T_K$ ) при произвольной ориентации внешнего магнитного поля относительно оси анизотропии. Определены области существования метастабильных состояний в координатах поле-температура, установлено гистерезисное поведение температурных границ этих состояний при малых внешних полях. Показано, что наилучшее описание экспериментальных магнитооптических петель вблизи  $T_K$  получается в предположении существования плоскостной анизотропии для одной подрешетки;

– предложена модель многослойной обменно-связанной системы для описания процессов перемагничивания аморфных пленок РЗМ-ПМ, более полно отражающая реальную ситуацию. Полученные на ее основе индукционные и магнитооптические петли гистерезиса позволяют объяснить особенности наблюдаемых экспериментальных результатов;

– исследовано влияние эффектов старения в пленках РЗМ-ПМ на их магнитные и магнитооптические свойства. Установлено, что наиболее существенным механизмом «старения» являются окислительные процессы, а структурно-релаксационные эффекты работают лишь при  $T_{an} > 300^\circ\text{C}$ . Предложено использование защитных слоев для стабилизации магнитных свойств пленок.

3. Впервые изучены эффекты взаимодействия коротких импульсов лазерного излучения с аморфными пленками РЗМ-ПМ. Получены следующие результаты:

– проведено численное исследование магнитоструктурных состояний и процесса термомагнитной записи в магнитных пленках с учетом обменного и дипольного взаимодействий и поля анизотропии. Определены параметры оптического излучения и свойства магнитопленочных носителей для реализации устойчивой записи информации;

– обнаружен новый механизм термомагнитной записи информации, в основе которого лежат упруго-магнитные эффекты; энергетическая чувствительность данного механизма на два порядка выше порога записи в точке Кюри;

– изучены особенности генерации акустических волн в пленках РЗМ-ПМ при воздействии импульсов лазерного излучения. Определены условия, при которых термоупругие напряжения снижают энергию термомагнитной записи.

4. Впервые продемонстрирована возможность термомагнитной записи аналоговой информации на пленках РЗМ-ПМ с перпендикулярной анизотропией и наклонной петлей гистерезиса. Определены оптимальные условия записи и предложена модель, качественно объясняющая основные особенности процесса записи.

5. Предложена модель «оболоченных» наночастиц как основной структурной особенности нанокристаллических пленок 3d-металлов и экспериментально показано, что в рамках данной модели описываются многие особенности магнитных и электрических свойств исследуемых конденсатов.

6. Предложен способ получения магнитомягких свойств в высокорезистивных нанокристаллических пленках 3d-металлов, основанный на переводе системы суперпарамагнитных частиц в состояние кооперативного магнитного упорядочения за счет эффектов магнитного взаимодействия между ними; осуществлена его экспериментальная реализация на пленках системы Co-Sm-O.

7. Комплексные исследования магнитных свойств и эффектов взаимодействия лазерного излучения с аморфными пленками РЗМ—ПМ привели к использованию этих материалов в устройствах оптической обработки информации:

– создан макет магнитооптического диска с требуемыми рабочими параметрами. Успех в решении этой задачи связан как с разработкой самого рабочего слоя с оптимальными магнитными параметрами, так и с выбором конструкции диска;

– на базе исследований процессов термомагнитной записи информации аналогового вида на пленках РЗМ – ПМ создан прибор для регистрации

пространственного распределения интенсивности оптических излучений в большом динамическом и спектральном диапазонах в реальном масштабе времени. Прибор использован в экспериментах по изучению качества обращения волнового фронта ИК – излучения;

– показано, что метод термомагнитного копирования на пленках РЗМ – ПМ можно использовать для изучения магнитных неоднородностей в носителях информации и для магнитооптической визуализации полей рассеяния на магнитных головках.

На исследованные магнитопленочные материалы с новыми магнитными и электрическими свойствами, интересными для практических приложений, получено 6 авторских свидетельств на изобретения.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Буркова Л. В., Фролов Г.И. Аморфные пленки TbFe-новый материал для магнитооптической записи // Зарубежная электроника, 1987, № 9, с. 3-70.
2. Вершинина Л.И., Захаров Н.Д., Склюев С.З., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Процессы кристаллизации и магнитные превращения в аморфных пленках DyCo // ФММ, 1988, т.66, №2, с. 278-282.
3. Vershinina L.I., Skluev S.Z., Zhigalov V.S., Stepanov A.G., Frolov G.I., Avilov A.S. The structure of amorphous DyCo films with magnetic anisotropy // Phys. Stat. sol. (a), 1990, 121, K 145-148.
4. Хрусталев Б.П., Поздняков В.Г., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Температурная зависимость намагниченности и спин-переориентационный переход в аморфных пленках DyCo // ФТТ, 1989, т.31, №3, с. 112-118.
5. Хрусталев Б.П., Поздняков В.Г., Фролов Г.И. Эффект Холла и переход в неколлинеарное состояние в ферромагнитных пленках DyCo // ФТТ, 1993, т.35, №4, с. 921-924.
6. Фиш Г.И., Хрусталев Б.П., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Ферромагнитный резонанс в пленках DyCo в области спин-переориентационных переходов // ФТТ, 1986, т.28, №7, с. 2205-2207.

7. Фиш Г.И., Вершинина Л.И., Фролов Г.И., Хрусталеv Б.П., Яковчук В.Ю. Особенности ориентационных фазовых переходов в аморфных пленках DyCo // ФТТ, 1988, т.30, №4, с. 1224-1226.
8. Артемьев Е.М., Вершинина Л.И., Мягков В.Г., Склюев С.З., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Лоренцова электронная микроскопия аморфных пленок с перпендикулярной анизотропией // ФММ, 1990, №2, с. 77-84.
9. Ерухимов М.Ш., Попов Г.В., Середкин В.А., Фролов Г.И., Холжигитов С.Ф., Яковчук В.Ю. Особенности основного состояния легкоосного ферримагнетика в наклонном поле в окрестности температуры компенсации // ФТТ, 1988, т.30, №4, с.1009-1014.
10. Подмарков А.Н., Попов Г.В., Холжигитов С.Ф., Фролов Г.И. Расчет кривых перемагничивания пленок  $Du_xCo_{1-x}$  вблизи точки компенсации // ФТТ, 1991, т.33, в.7, с.2134-2139.
11. Холжигитов С.Ф., Подмарков А.Н., Фролов Г.И. Магнитные фазовые диаграммы для двухслойной ферримагнитной пленки // ЖТФ, 1996, №1, с. 71-78
12. Вершинина Л.И., Захаров Н.Д., Склюев С.З., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Процессы кристаллизации и магнитные превращения в аморфных пленках DyCo // ФММ, 1988, т.66, №2, с. 278-282.
13. Попов Г.В., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Статическое перемагничивание аморфных пленок DyCo // ФММ, 1990, №2, с. 61-70.
14. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Журавлев А.В. Толщинная зависимость магнитных и магнитооптических свойств аморфных пленок DyCo // Поверхность, 1995, №4, с. 74-78.
15. Вершинина Л.И., Жигалов В.С., Журавлев А. В., Фролов Г.И. Перпендикулярная анизотропия в пленках DyCo // ФММ, 1991, №4, с. 62-72.
16. Жигалов В.С., Журавлев А.В., Фролов Г.И. Временная нестабильность магнитных свойств аморфных пленок DyCo // ФММ, 1991, №9, с. 74-80.
17. Белошапкин В.В., Берман Г.П., Середкин В.А., Третьяков А.Г., Фролов Г.И., Цыбина Ж.Б. Процессы структурообразования и термомагнитная запись в двумерных магнитных системах // ФТТ, 1991, т.33, №9, с. 2554-2560.
18. Берман Г.П., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Новый механизм оптической записи в аморфных ферримагнитных пленках // Письма ЖТФ, 1988, т.14, №11, с. 1029-1032.

19. Александров К.С., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Оптическая запись в аморфных ферромагнитных пленках // Автометрия, 1988, №4, с. 59-67.
20. Berman G.P., Frolov G.I., Seredkin V.A., Yakovchouk V.Yu. Analysis of interaction of laser radiation pulses with metal magnetostrictive film // Sol. St. Comm., 1988, v.67, №12, p. 1203-1207.
21. Белошапкин В.В., Мухин В.В., Фролов Г.И. Численное моделирование процессов структурообразования и термомагнитная запись в двумерных магнитных системах // Автометрия, 1994, №5, с. 17-24.
22. Aleksandrov K.S., Berman G.P., Frolov G.I., Seredkin V.A. Thermomagnetic recording on amorphous ferromagnetic films // SPIE, 1991, v.1621, p. 51-61.
23. Вершинин В.В., Тарасенко А.В., Фролов Г.И. Термоупругие напряжения в магнитных пленках при оптической записи // Автометрия, 1994, №5, с. 25-31.
24. Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Термомагнитная запись полутоновых оптических изображений на пленках РЗМ-ПМ // ЖТФ, 1984, т.54, №6, с. 1183-1185.
25. Буркова Л.В., Ерухимов М.Ш., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Термомагнитная запись аналоговой информации на пленках РЗМ-ПМ // ЖТФ, 1985, т.55, №4, с. 707-713.
26. Александров К.С., Болотских Л.Т., Попков В.Г., Попов А.К., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Исследование обращения волнового фронта ИК-излучения методом термомагнитной записи // ДАН СССР, 1987, т.286, №3, с. 610-612.
27. Фролов Г.И. Аморфные ферромагнитные пленки для устройств оптической обработки информации // сб. "Магнитные свойства кристаллических и аморфных сред", Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 1989, с. 218-234.
28. Фролов Г.И., Жигалов В.С. Козрцитивная сила пленок системы  $(\text{Fe-Ni})_{100-x}(\text{SiO})_x$  // ФММ, 1975, Т. 40, В. 3, С. 518-523.
29. Ерухимов М.Ш., Жигалов В.С., Фролов Г.И. Температурное поведение намагниченности пермалловых сплавов при наличии примесных атомов // ФММ, 1980, Т. 49, В. 6, С. 1210- 1215.
30. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Жарков С.М., Яруллин И.Р. Пленки железа с микрокластерной структурой // ФТТ, 1994, Т. 36, № 4, С. 970-972.
31. Фролов Г.И., Баюков О.А., Жигалов В.С., Квеглис Л.И., Мягков В.Г. Электронномикроскопические и мессбауэровские исследования



- сверхрешетки в пленках железа // Письма в ЖЭТФ, 1995, Т. 61, № 1, С. 61-64.
32. Жарков С.М., Жигалов В.С., Фролов Г.И. ГПУ фаза в пленках никеля // ФММ, 1996, Т. 81, В. 3, С. 170-173.
  33. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Польский А.И., Поздняков В.Г. Исследование электропроводности в нанокристаллических пленках кобальта // ФТТ, 1996, Т. 38, № 4, С. 1208-1213.
  34. Жарков С.М., Жигалов В.С., Квеглис Л.И., Лисица Ю.В., Ренская К.В., Фролов Г.И. Кластерная структура и сверхрешетки в пленках Co и Fe // Письма в ЖЭТФ, 1997, Т. 65, В. 12, С. 872-875.
  35. Квеглис Л.И., Лисица Л.И., Жарков С.М., Басько А. Л., Мытниченко С.В., Жигалов В.С., Фролов Г.И. Масштабная инвариантность структуры при взрывной кристаллизации аморфных пленок Co // ПОВЕРХНОСТЬ, Рентг., синхротрон. и нейтронные исследования, 1998, № 7, С. 112-117.
  36. Жигалов В.С., Фролов Г.И., Квеглис Л.И. Нанокристаллические пленки кобальта, полученные в условиях сверхбыстрой конденсации // ФТТ, 1998, Т. 40, № 11, С. 2074-2079.
  37. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Квеглис Л.И., Жарков С.М., Баюков О.А., Басько А.Л. Структура и магнитные свойства нанокристаллических пленок железа // ФММ, 1999, Т. 88, № 2, С. 85-89.
  38. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Мальцев В.К. Влияние температуры на структурные превращения в нанокристаллических пленках кобальта // ФТТ, 2000, Т. 42, № 2, С. 326-328.
  39. Жигалов В.С., Фролов Г.И., Мягков В.Г., Жарков С.М., Бондаренко Г.В. Исследование нанокристаллических пленок никеля, осажденных в атмосфере азота // ЖТФ, 1998, Т. 68, № 9, С. 136-138.
  40. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Баюков О.А. Фазовый состав нанокристаллических пленок железа, осажденных в атмосфере азота // ФТТ, 1999, Т. 41, В. 10, С. 1819-1821.
  41. Жигалов В.С., Баюков О.А., Исаков Р.С., Фролов Г.И. Исследование фазовых переходов в пленках Fe-C. // ФММ, 2002, Т. 93, № 3, С. 1-8.
  42. Фролов Г.И. Пленочные носители для устройств памяти со сверхплотной магнитной записью // ЖТФ, 2001, т.71, №12, с. 50-57.
  43. Фролов Г.И., Жигалов В.С., Жарков С.М., Польский А.И. Микроструктура и свойства наногранулированных пленок Co-Sm-O // ФТТ, 2003, т.45, №12, с. 2198-2203.
  44. Фролов Г.И. Магнитомягкие свойства в нанокристаллических пленках 3d- металлов // ЖТФ, 2004, т.74, №7, с. 102- 109.

45. А.с. 658990 СССР. Способ изготовления магнитооптического элемента и ферромагнитный материал для его осуществления. / Середкин В.А., Жигалов В.С., Фролов Г.И. – от 28 декабря 1978 г
46. А.с.589627 СССР. Сплав для тонких магнитных пленок на основе железа / Жигалов В.С., Середкин В.А., Фролов Г.И. – опубл. в Б.И., 1978, № 3.
47. А.с. 656365 СССР. Сплав на основе никеля для магнитных пленок. / Жигалов В.С., Фролов Г.И., Кан С.В., Киселев Н.И. – от 14 декабря 1978 г.
48. А.с. 792978 СССР. Сплав для магнитных пленок на основе железа. / Середкин В.А., Гринин Э.Ф., Жигалов В.С., Фролов Г.И. – от 1.09.1980г.
49. А.с. 1095236 СССР. Магнитный носитель информации / Яковчук В.Ю., Середкин В.А., Фролов Г.И. – от 30 марта 1983 г.
50. А. с. 1124381 СССР. Магнитный носитель информации / Яковчук В.Ю., Середкин В.А., Фролов Г.И. – от 21 декабря 1982 г.

---

Подписано в печать 14.05.04.  
Формат 60×85/16. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л. 1,5.  
Усл. Печ. Л. 2. Тираж 100. Заказ № 24

---

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН

---