

На правах рукописи



Логунов Михаил Владимирович

**ДИНАМИКА ДОМЕННЫХ СТРУКТУР
И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ
ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ**

Специальность 01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Саранск

2004

Работа выполнена в Мордовском государственном университете имени Н.П.Огарёва.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор О. С. Колотое

доктор физико-математических наук,
профессор В. Г. Клепарский

доктор физико-математических наук,
профессор А. Ф. Попков

Ведущая организация: Физико-технический институт имени
А. Ф. Иоффе РАН

Защита диссертации состоится 21 января 2005 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.231.01 при Институте радиотехники и электроники РАН в конференц-зале Института по адресу:
125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института радиотехники и электроники РАН.

Автореферат разослан 15 декабря 2004 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



С. Н. Артеменко

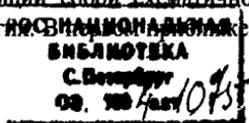
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Начало изучению динамики доменных структур положили эксперименты КСикстуса и Л.Тонкса по исследованию распространения магнитных неоднородностей (доменных границ) вдоль железоникелевой проволоки [1] и теоретическая работа Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица, в которой проводился анализ динамики доменной границы на основе уравнения движения магнитного момента с учетом релаксационных процессов [2]. На протяжении нескольких десятилетий экспериментальные методы исследования динамических доменов оставались косвенными, а результаты исследования различных магнитных материалов свидетельствовали о линейной зависимости скорости доменных границ от поля.

Непосредственные наблюдения динамической доменной структуры в процессе перемагничивания стробоскопическим методом или с помощью высокоскоростной фотографии [3-15] основываются в большинстве случаев на использовании магнитооптических эффектов благодаря их безинерционности. Наиболее полную информацию о процессах перемагничивания получают, одновременно регистрируя динамические доменные структуры и интегральные характеристики перемагничивания [16,17]. Применение прямых методов исследования, тесное сотрудничество экспериментаторов и теоретиков значительно расширили представления о процессах зарождения и движения доменов, о внутренней структуре доменных границ, о важной и часто определяющей роли нелинейных эффектов в процессах динамической перестройки доменной структуры.

Ферриты со структурой граната широко используются в различных радиоэлектронных устройствах, в магнитооптических устройствах для управления и обработки оптических сигналов, записи информации, визуализации и топографирования магнитных полей [3,4,18], при разработке перспективных магнитных кристаллов [19]. Исследование доменной структуры пленок ферритов-гранатов представляет интерес для разработки устройств на спиновых волнах [20], сверхпроводниковых токоведущих элементов с повышенным критическим током [21]. Благодаря совершенству кристаллической структуры и разнообразию физических свойств ферриты-гранаты являются объектом проверки теоретических концепций магнетизма. Исследования монокристаллических пленок ферритов-гранатов ведутся, начиная с 1970-х годов. К началу настоящей работы исследователей в области динамики доменных структур в одноосных ферромагнетиках, какими в большинстве случаев можно считать пленки ферритов-гранатов, было сосредоточено на исследовании следующих магнитных явлений: нелинейной динамики доменных границ, механизмов импульсного перемагничивания, механизмов формирования доменных структур.

Некоторое представление о разнообразии обнаруженных в пленках ферритов-гранатов динамических доменных структур и условиях их формирования дает рис. 1, представляющий собой схематичное обобщение результатов работ [3-13,22-28] и ряда других исследований, согласно



одномерной модели, диапазон магнитных полей, соответствующих линейной динамике доменов, ограничен сверху пороговым полем Уокера H_w [3,4]. Для процессов формирования доменных структур необходимы, как правило, магнитные поля $H \gg H_w$ (рис. 1), сравнимые с полем насыщения пленки (гармонические поля) или с полем одноосной анизотропии H_k (импульсные поля). Из-за существенной нелинейности и многофакторной зависимости процессов формирования динамических доменных структур исследование их теоретическими методами является серьезной проблемой и во многих случаях находится на начальной стадии. Разнообразие условий эксперимента и параметров исследовавшихся пленок в работах различных исследовательских групп нередко приводит к противоречивым выводам о природе и закономерностях наблюдавшихся явлений.



Рис. 1. Области формирования динамических доменных структур в материале с параметрами: фактор качества $Q = H_w/4\pi M_s = 10$, константа затухания $\alpha = 0,05$. $H/4\pi M_s$ - нормированная величина действующего магнитного поля.

В связи с интересом к процессам формирования спиральных, кольцевых доменных структур [20-24], двумерных решеток доменов [25-28] проводятся исследования процессов перемагничивания и петель гистерезиса в гармоническом магнитном поле звуковых и ультразвуковых частот [23,24]: выявлена взаимосвязь между формой петель гистерезиса и формированием спиральных доменов [23,24], обнаружена область неустойчивости динамических петель гистерезиса [23] и ряд других интересных явлений. В результате теоретического исследования нелинейной динамики доменных границ в периодических внешних магнитных полях найдены условия, при которых нелинейные колебания границ могут приводить к изменению периода доменной структуры, ее дроблению [29] и, как следствие, к возможному формированию доменных структур с новой топологией. В то же время не ясно, изменение каких динамических механизмов перемагничивания приводит к трансформации петель гистерезиса, при изменении амплитуды и частоты гармонической магнитной волны, каковы необходимые и достаточные условия

для формирования упорядоченных доменных структур. Остаются открытыми и ряд методических вопросов, например вопрос о соответствии результатов, получаемых при использовании различных методов измерения коэрцитивной силы. Такое положение во многом обусловлено отсутствием аппаратуры, позволяющей исследовать динамические доменные структуры в широком диапазоне частот гармонического магнитного поля в реальном масштабе времени и производить их сопоставление с соответствующими участками петли гистерезиса.

Таким образом, экспериментальное исследование динамических доменных структур в пленках ферритов-гранатов представляет собой актуальную проблему физики магнитных явлений. По ряду причин эта проблема является комплексной: исследуемые процессы (зарождение доменов, движение доменных границ, вращение вектора магнитного момента) существенно нелинейны, условия экспериментов чрезвычайно разнообразны (квазистатические, гармонические, импульсные магнитные поля с различными сочетаниями параметров полей), основные параметры пленок ферритов-гранатов могут изменяться на несколько порядков величины.

Целью диссертационной работы являлось исследование механизмов перемагничивания одноосных пленок ферритов-гранатов со сквозной по толщине пленки доменной структурой в гармонических и импульсных магнитных полях. Для достижения этой цели в работе решались следующие основные задачи:

- разработка экспериментальной установки для прямого исследования динамических доменных структур в пленках ферритов-гранатов в режиме реального времени стробоскопическим методом и методом высокоскоростной фотографии с одновременной регистрацией интегральных характеристик перемагничивания пленок;
- выяснение механизмов перемагничивания пленок ферритов-гранатов в импульсных магнитных полях, сравнимых с полем анизотропии пленок, и в гармонических магнитных полях, сравнимых с полем насыщения пленок;
- исследование взаимосвязи механизмов формирования динамических доменных структур с интегральными характеристиками процессов перемагничивания - параметрами кривых импульсного перемагничивания, петлей гистерезиса.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Найдены условия, при которых результаты измерения коэрцитивной силы, полученные методом осцилляции доменных границ, совпадают с результатами, полученными по полуширине квазистатической петли гистерезиса. Выяснена зависимость диапазона частот гармонического магнитного поля, в котором проявляется явление нестабильности петли гистерезиса в виде вариации поля старта, от параметров магнитного материала. Выявлена взаимосвязь между изменениями механизмов перемагничивания и модификацией динамических петель гистерезиса при изменении амплитуды и частоты гармонического магнитного поля.

2. Для пленок с малой константой затухания на зависимости скорости доменных границ от поля обнаружен участок с отрицательной дифференциальной подвижностью, соответствующий формированию пространственно-периодических структур на динамических доменных границах. Показано, что подвижность и скорость насыщения доменных границ вблизи точки магнитной компенсации остаются конечными, уменьшаясь более чем на два порядка величины по сравнению со значениями в окрестности точки компенсации момента импульса. В пленках со сложной анизотропией обнаружены новые разновидности анизотропии скорости доменных границ.

3. Впервые проведено исследование динамики доменных границ в магнитных полях вплоть до эффективного поля одноосной анизотропии пленок. Экспериментально показана возможность генерации спиновых волн движущейся доменной границей. Выявлен вид зависимости скорости доменных границ, движущихся вдоль оси легкого намагничивания, от поля в плоскости пленки. Найдены условия, при которых скорость доменных границ в одноосных пленках ферритов-гранатов может приближаться к скорости спиновых волн и скорости звука в кристалле.

4. Показано, что для феррит-гранатовых пленок кривая импульсного перемагничивания состоит из двух участков, усредненные коэффициенты переключения которых различаются на 1-3 порядка. Выявлены механизмы перемагничивания, соответствующие характерным участкам кривой импульсного перемагничивания. Показано, что критерий Стонера-Вольфарта выполняется при импульсном перемагничивании пленок вдоль оси легкого намагничивания в присутствии постоянного поля, перпендикулярного легкой оси.

5. Выявлена взаимосвязь величины рассогласования кристаллографических параметров пленки и подложки с механизмами импульсного перемагничивания пленок и параметрами квазистатических петель гистерезиса.

6. В результате исследования механизмов формирования доменных структур в аксиально-симметричном магнитном поле найдена взаимосвязь особенностей волны опрокидывания магнитного момента и параметров пленок, построена модель волны опрокидывания магнитного момента. Обнаружено изменение ориентации динамического треугольного магнитного домена относительно осей магнитной анизотропии пленки при изменении напряженности импульсного поля.

7. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния скорости нарастания магнитного поля на конфигурацию динамических доменных структур, возникающих в процессе импульсного перемагничивания пленок. На основе спин-волнового механизма построена модель трансформации доменных структур (волны опрокидывания магнитных моментов, системы концентрических кольцевых структур, магнитного вихря; динамической доменной границы) при изменении скорости нарастания поля.

8. Найдены необходимые и достаточные условия для формирования спиральных доменов и гигантских динамических доменов. Показано, что верхняя граница области формирования спиральных доменов по частоте поля связана с преобразованиями структуры границ доменов. Обнаружено

формирование динамических цилиндрических магнитных доменов с размерами, на два порядка превышающими равновесные размеры доменов. Выявлены условия формирования двумерных решеток доменов в гармонических и в импульсных магнитных полях. Обнаружены новые конфигурации двумерных решеток доменов.

На защиту выносятся результаты исследования:

1. Квазистатических и динамических петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов и процессов перемагничивания, определяющих параметры петель гистерезиса.

2. Динамики доменных границ в пленках ферритов-гранатов в магнитных полях, сравнимых с полем одноосной анизотропии пленок.

3. Кривой импульсного перемагничивания пленок ферритов-гранатов и взаимосвязи ее формы с механизмами импульсного перемагничивания пленок.

4. Влияния структурных особенностей пленок ферритов-гранатов, температуры, напряженности и направления магнитных полей на механизмы перемагничивания пленок в квазистатических, импульсных и гармонических магнитных полях.

5. Формирования и эволюции доменных структур в импульсных и гармонических магнитных полях.

6. Влияния скорости нарастания магнитного поля на конфигурацию динамических доменных структур, возникающих в процессе импульсного перемагничивания пленок.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на тщательной отработке методик и калибровке измерительных устройств разработанных в процессе подготовки диссертации экспериментальных установок, корреляции полученных экспериментальных результатов с результатами работ экспериментаторов из других научных организаций и результатами ряда теоретических работ. Материалы диссертации обсуждались на 40 российских и международных конференциях и семинарах различного уровня. В значительной своей части они уже получили признание у специалистов и неоднократно цитировались в литературе.

Практическая значимость работы определяется разработкой новых эффективных методик исследования динамических процессов перемагничивания и реализацией методик в виде действующих экспериментальных установок. Установки предназначены для одновременного исследования динамики доменных структур и интегральных характеристик перемагничивания магнитооптических материалов в импульсных и гармонических магнитных полях с временным разрешением 2 нс и временем однократной экспозиции доменной структуры 5 нс. Впервые применен стробоскопический метод исследования динамических доменных структур в переменном магнитном поле с регулируемой кратностью стробирования $K_{cm}=1, 2, 3 \dots$. Впервые для повышения чувствительности установки в тракте регистрации интегрального сигнала перемагничивания предложено использовать принцип двойного стробирования, что в комплексе с рядом

других мер позволило снизить периодические помехи, дрейф и флуктуационные шумы аппаратуры более чем на 40 дБ.

Ряд устройств, разработанных для магнитооптических установок, имеют самостоятельную практическую значимость: двухполярный стабилизатор тока электромагнита, малогабаритный блок питания электронно-оптического преобразователя, устройство подавления помех, дрейфа и шума при регистрации периодических наносекундных сигналов, широкополосный модулятор излучения гелий-неонового лазера с СВЧ-накачкой.

Полученные в работе результаты вносят существенный вклад в понимание механизмов перемагничивания, приводящих к видоизменению петель гистерезиса и формированию доменных структур в пленках ферритов-гранатов. Это расширяет возможности практического применения многодоменных магнитных пленок и создания на их основе новых технических устройств.

На основании результатов проведенных исследований процессов перемагничивания пленок предложены и защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами новые магнитооптические устройства: дефлекторы, модуляторы, способы повышения быстродействия магнитооптических устройств обработки и отображения информации, новые способы измерения ряда параметров пленок: знака гиромагнитного отношения, температуры компенсации магнитного момента, эффективного магнитного поля одноосной анизотропии, слоистой структуры пленок, новые способы и устройства для измерения, визуализации и топографирования магнитных полей.

Личный вклад автора в получении материалов диссертационной работы является определяющим и состоит в постановке задач, разработке и реализации экспериментальных методик, проведении экспериментальных исследований динамики доменных структур и интегральных характеристик процессов перемагничивания, анализе полученных результатов. Вклад Логунова М.В. в изобретения и патенты, в соответствии с прошедшими экспертизу документами на изобретения, принят равным вкладу соавторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX-XVIII Всесоюзных (Всероссийских, Международных) школах-семинарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Саранск, 1984; Рига, 1986; Ташкент, 1988; Новгород, 1990; Астрахань, 1992; Москва, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002), на Всесоюзных конференциях «Современные вопросы физики и приложения» (Москва, 1984; 1987; 1990), на II Всесоюзной конференции «Проблемы развития радиооптики» (Тбилиси, 1985), на IV Всероссийском координационном совещании педвузов по физике магнитных материалов (Иркутск, 1986), на Всесоюзной школе-семинаре «Доменные и магнитооптические запоминающие устройства» (Кобулет, 1987), на XVIII и XIX Всесоюзных конференциях по физике магнитных явлений (Калинин, 1988; Ташкент, 1991), на Международной конференции по когерентной оптике (Ужгород, 1989), на Всесоюзном семинаре «ЦМД/ВБЛ в системах обработки и хранения информации. Доменные и

магнитооптические устройства» (Москва, 1989), на семинаре «Материалы и изделия функциональных устройств в производстве радиоэлектронной аппаратуры» (Львов, 1989), на Международной конференции по тонким пленкам (Пекин, 1990), на X Всесоюзном семинаре по проблеме ЦМД/ВБЛ (Москва, 1991), на семинаре по магнитомикроэлектронике (Алушта, 1991), на Международном конгрессе по оптике и технологии (Гаага, 1991), на Международном симпозиуме по магнитооптической записи (Токио, 1991), на 13 и 14 Международных коллоквиумах по магнитным пленкам и поверхностям (Глазго, 1991; Дюссельдорф, 1994), на Международных конференциях «Проблемы и прикладные вопросы физики» (Саранск, 1997, 2001, 2003), на XIII Международной конференции по твердотельным кристаллам (Варшава, 1998), на III Всероссийской конференции «Методы и средства измерений физических величин» (Н.Новгород, 1998), на Международных симпозиумах по спиновым волнам (С.-Петербург, 1998, 2000, 2002), на конференции «Структура и свойства твердых тел» (Н.Новгород, 1999), на I-м Объединенном европейском магнитном симпозиуме (Гренобль, 2001), на Международном симпозиуме «Прогресс в магнетизме» (Екатеринбург, 2001), на XXII Научных чтениях имени Н. В. Белова (Н. Новгород, 2003), на II Байкальской международной конференции «Магнитные материалы» (Иркутск, 2003).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 48 статьях, 8 тезисах докладов, 16 авторских свидетельствах и патентах на изобретения, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 295 страниц, включая 134 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 350 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы, изложена структура диссертации.

Первая глава является методической. В ней представлен обзор методов наблюдения доменов, исследования динамики доменных структур и интегральных характеристик процессов перемагничивания. Приведено описание разработанной при выполнении настоящей работы магнитооптической установки для исследования доменных структур в импульсных и гармонических магнитных полях, способов **повышения** чувствительности установки и методов формирования использованных в экспериментах постоянных, импульсных и гармонических магнитных полей.

В данной установке реализован принцип одновременного изучения интегральных характеристик **и динамики процессов перемагничивания пленок ферритов-гранатов**, ранее разработанный для исследования пермаллоевых пленок [16] и позволяющий наиболее полно исследовать закономерности процессов **перемагничивания. Наблюдение доменов производится с помощью**

импульсного лазера, поляризационного микроскопа, видеокамеры и монитора, регистрация интегрального сигнала перемагничивания - с помощью ФЭУ. Изображение динамических доменов регистрируется с использованием эффекта Фарадея со временем однократной экспозиции 5 нс, пространственным разрешением до 0,5 мкм, интегральный сигнал перемагничивания - с временным разрешением 2 нс.

Фотометрическое исследование доменных структур, волны опрокидывания магнитных моментов осуществляли путем анализа видеосигнала изображения доменной структуры образца. Форма и амплитуда сигнала соответствуют профилю фарадеевского вращения (состоянию намагниченности) вдоль участка пленки, доменная структура которого отображается выбранной строкой видеокadra. Для интерпретации результатов исследований процессов перемагничивания свойства пленок изучены методами рентгенографии и ферромагнитного резонанса.

Повышение чувствительности установки при высокоскоростной фотографии достигается путем использования электронно-оптического преобразователя (усилителя яркости), для питания которого разработан малогабаритный блок с гальванической развязкой цепей питания фотокатода и микроканальных пластин преобразователя.

Для повышения чувствительности установки в канале регистрации интегрального сигнала перемагничивания [30] разработано устройство подавления помех, дрейфа и шума. Принцип работы устройства основан на стробоскопическом методе регистрации сигнала и обработке аналогового сигнала с выхода стандартного стробоскопического осциллографа: последовательных выборках в присутствии и отсутствии полезного сигнала на входе осциллографа, их накопления, суммирования и/или вычитания. Впервые для повышения чувствительности установки предложено использовать принцип двойного стробирования, что в комплексе с рядом других мер позволило снизить периодические помехи, дрейф и флуктуационные шумы аппаратуры более чем на 40 дБ.

Разработка двухполярного стабилизатора тока электромагнита для создания поля смещения позволила питать его обмотку постоянным током положительной и отрицательной полярности с плавным, без механического переключения переходом через нуль. Таким образом были исключены перерывы в измерениях и источники нежелательных механических вибраций элементов экспериментальной установки.

На установке впервые реализован стробоскопический метод исследования динамических доменных структур в переменном магнитном поле с регулируемой кратностью стробирования $K_{cm} = 1, 2, 3 \dots$ в диапазоне частот поля $10 - 2 \cdot 10^5$ Гц. При $K_{cm} = \backslash$ (стробоскопический режим) и сканировании импульса лазера по периоду поля изучали эволюцию доменных структур и делали вывод о повторяемости процессов перемагничивания. Выбор $K_{cm} \gg \backslash$ позволяет перейти в режим высокоскоростной фотографии, когда частота следования импульсов подсветки равна или близка к частоте смены кадров видеокамеры. Измерение скорости движения доменных границ и наблюдение эволюции доменных структур в течение одного периода гармонического

магнитного поля для неповторяющихся процессов перемагничивания проводили с помощью парных импульсов подсветки, на одном видеокadre регистрировали наложение двух последовательных изображений динамических доменных структур. Возможности гибкого изменения условий работы установки в стробоскопическом режиме достигнуты благодаря разработанному модулятору излучения лазера с СВЧ-накачкой, использованному в качестве источника подсветки исследуемого образца.

В зависимости от режима работы установки ее блоки модифицируются. Например, при регистрации квазистатических петель гистерезиса для повышения чувствительности изменяется режим модуляции лазерного излучения, добавляются селективные усилители, дифференциальный усилитель постоянного тока. Проведена оптимизация параметров магнитооптической установки при исследовании материалов, магнитооптическая добротность которых различается на несколько порядков. Это позволило снизить искажения при записи петель гистерезиса в несколько раз.

Приводятся методики расчета, формирования и калибровки источников квазистатических, импульсных и гармонических магнитных полей, калибровки временной разрешающей способности установки, методики приготовления образцов, измерения и расчета основных параметров пленок, а также параметры исследованных пленок ферритов-гранатов различных составов, выращенных на подложках с различной кристаллографической ориентацией.

В следующих пяти главах приведены результаты исследования динамических доменных структур и интегральных характеристик перемагничивания в квазистатических, импульсных и гармонических магнитных полях. В начале каждой главы дается обзор литературы, затем приводятся и обсуждаются полученные экспериментальные результаты.

Во второй главе представлены результаты исследования квазистатических процессов перемагничивания пленок ферритов-гранатов. Основное внимание при изучении квазистатических процессов перемагничивания обычно уделяется изучению петли магнитного гистерезиса - одной из важнейших и информативных характеристик магнитного материала. Гистерезисные явления отражают изменения в материале во время перемагничивания: генерацию и аннигиляцию доменов, перемещение и изменение длины доменных границ, вращение вектора намагниченности. С одной стороны, гистерезисные свойства связаны с такими фундаментальными параметрами материала, как намагниченность, анизотропия, константа обмена; с другой стороны - характеризуют совершенство материала.

Из-за структурной чувствительности доменной структуры и процессов намагничивания и перемагничивания количественная теория кривых намагничивания и петель гистерезиса ферромагнетиков находится в начальной стадии развития [32]. Численная модель петли гистерезиса, отражающая характерные особенности квазистатических экспериментальных петель одноосных пленок ферритов-гранатов, включая процессы зарождения и роста доменов, разработана недавно [33]. Остаются нерешенными ряд методических проблем, например проблема соответствия результатов, получаемых при

использовании различных методов измерения коэрцитивной силы. Эти вопросы важны для понимания динамических механизмов перемагничивания, поскольку коэрцитивная сила, поле насыщения и другие параметры петель гистерезиса используются при построении теоретических моделей динамических процессов.

Приведены частные и предельные петли гистерезиса для пленок с различными параметрами. Регистрация петель гистерезиса пленок в широком частотном диапазоне магнитного поля позволила определить границы перехода от квазистатических к динамическим процессам перемагничивания. Показано, что для пленок ферритов-гранатов квазистатическими можно считать процессы перемагничивания, протекающие при частоте перемагничивающего поля в единицы герц и менее.

Обнаружено, что величина коэрцитивной силы пленок ферритов-гранатов, определяемой как полуширина петли гистерезиса, зависит от максимальной напряженности магнитного поля H_m , которое достигается в процессе перемагничивания образца, а вид зависимости $H_c(H_m)$ существенно изменяется при повышении температуры с одновременным уменьшением коэрцитивной силы.

Показано, что результаты измерения коэрцитивной силы H_c методом осцилляции доменных границ совпадают с результатами, полученными по полуширине петли гистерезиса, для частного случая, когда не проявляются динамические эффекты при перемагничивании, а коэрцитивная сила для предельной и частных петель гистерезиса остается одинаковой.

Выявлена зависимость коэрцитивной силы пленки от величины рассогласования кристаллографических параметров решетки пленки и подложки. Обнаружено, что перегиб на температурной зависимости коэрцитивной силы $H_c(T)$ совпадает (по температуре) с перегибом на температурной зависимости относительного рассогласования параметров пленки феррита-граната и подложки, что позволяет получить количественную характеристику взаимосвязи напряжений в кристалле с величиной коэрцитивной силы. Показано, что различие между величинами H_c , измеренными по полуширине предельной квазистатической петли гистерезиса (на частоте $f \sim 10^{-3}$ Гц) и методом осцилляции доменных границ ($f \sim 10^2$ Гц), наиболее выражено в области перегиба на зависимости $H_c(T)$.

Третья глава посвящена исследованию динамики доменных границ (ДГ) в импульсных магнитных полях, многократно превышающих порог линейного (стационарного) движения ДГ и сравнимых с полем анизотропии пленок ферритов-гранатов. Движение ДГ в таких условиях во многом определяет закономерности формирования динамических доменных структур.

Движение ДГ в сильных магнитных полях является нелинейным, а в ряде случаев и неоднородным [3-8,34-36]. Многие проблемы нелинейной динамики ДГ остаются нерешенными. Одной из таких проблем является природа так называемой «диффузной» ДГ, когда ширина ее изображения (~ 10 мкм) в десятки раз превышает равновесную ширину ДГ [3,5]. Предлагаются модели диффузной ДГ, в которых уширение ее изображения связывают с изгибом по

толщине пленки [34] или с переходом в хаотический режим движения ДГ [35]. Нами в результате экспериментального исследования ДГ методом высокоскоростной фотографии показано, что диффузная ДГ может наблюдаться как совместно с другими неоднородными эффектами (генерацией магнитных возмущений, пространственно-периодическими искажениями ДГ), так и независимо от них, а в неоднородных по толщине пленках с высоким значением эффективного гиромангнитного отношения (высокой скоростью ДГ) ширина изображения ДГ может достигать аномальной величины ~ 200 мкм. Полученные данные согласуются с моделью диффузной ДГ, по которой она представляет собой ДГ обычной ширины, наклонную по толщине пленки.

Далее в этой главе представлены результаты исследования ДГ в однородных по толщине пленках ферритов-гранатов, в которых процессы вращения намагниченности не проявляются в действующих полях практически до эффективного поля одноосной анизотропии. Это впервые позволило исследовать свойства динамических доменных границ во всем возможном интервале их существования. Показано, что в присутствии поля в плоскости пленки H_{ns} , сравнимого с полем анизотропии, в пленках с высоким фактором качества $Q > 20$ возможно движение ДГ со скоростями V , на два-три порядка превышающими предельную скорость Уокера и близкими к минимальной фазовой скорости спиновых волн [37]

$$V_+ = 2\gamma \frac{\sqrt{AK_*}}{M_s} \left[(1 + 1/Q)^{1/2} + 1 \right] \quad (1)$$

и скорости поперечного звука в кристалле граната (рис. 2а), причем скорость насыщения V , при увеличении продвигающего поля Y достигается асимптотически.

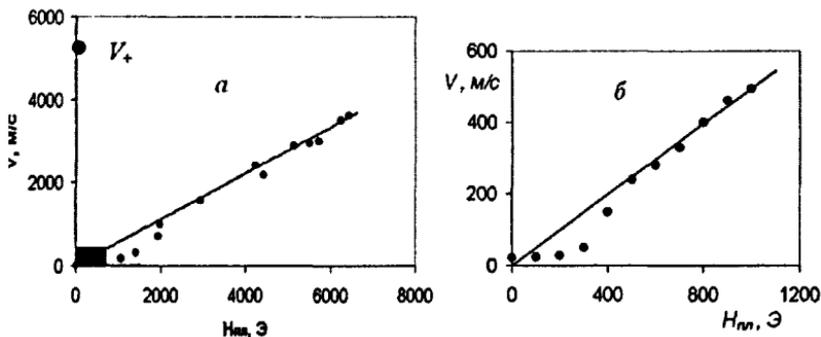


Рис. 2. а) Зависимость скорости ДГ V от планарного поля H_{ns} в действующем поле $Y = 372$ Э ($H_{ns} < 5$ кЭ), $Y = 210$ Э ($H_{ns} \geq 5$ кЭ). Точки - данные эксперимента, линия - результат теоретического расчета по модели [38]. Заштрихованный прямоугольник в начале координат - область, в которую укладываются результаты всех экспериментальных работ, опубликованных другими авторами до 2004 г.

б) Зависимость скорости торцевой ДГ $V(H_{ns})$ при $Y = 850$ Э.

Результаты наших экспериментальных работ послужили толчком к построению теории динамики и торможения ДГ при наличии поля, перпендикулярного оси легкого намагничивания и при скоростях до предельной скорости ДГ [38]. Движение ДГ исследовано в бездиссипативном приближении, а вклад в торможение при высоких скоростях ДГ вносит изменение модуля намагниченности под действием эффективного поля, создаваемого движущейся ДГ. Показано [38], что зависимость $V(H)$ имеет вид, стандартный для лоренц-инвариантных моделей и неплохо согласуется с экспериментальными данными, а предельная скорость ДГ линейно зависит от поля в плоскости пленки (рис. 2а):

$$V_c = \frac{\pi}{2} \gamma \sqrt{A/K_v} H_{ns}. \quad (2)$$

В области малых H_{ns} скорость насыщения ДГ достигается в сильных полях, чем и вызвано расхождение экспериментальных и теоретических результатов при $H_{ns} < 2$ кЭ (рис. 2а). Интересно, что проведенный нами эксперимент по исследованию движения торцевой ДГ вдоль оси легкого намагничивания показал удовлетворительное описание зависимости $V(H_{ns})$ (рис. 2б) с помощью теоретического соотношения (2), полученного для случая движения обычной ДГ - в перпендикулярном по сравнению с торцевой ДГ [17] направлении.

В результате исследования динамики ДГ в пленках, имеющих разнесенные на ~ 60 °С по температуре точки компенсации магнитного момента (КММ) и момента импульса (КМИ) ферромагнетика выявлены условия, при которых выполняется одномерная теория движения ДГ в окрестности точки КМИ. Впервые исследована динамика ДГ в непосредственной близости от точки КММ. Показано, что в окрестности точки КММ скорость и подвижность ДГ остаются конечными, уменьшаясь на два порядка величины по сравнению с соответствующими величинами в окрестности КМИ.

При исследовании динамики ДГ с предельно малым затуханием на зависимости скорости движения ДГ V от продвигающего поля H нами обнаружен участок с отрицательной дифференциальной подвижностью (рис. 3). На этом участке плоская ДГ неустойчива и испытывает изгибные искажения. В результате формируются пространственно-периодические структуры на ДГ (рис. 3б) за время $\sim 0,1$ мкс после начала движения ДГ. Период структур λ_x слабо зависит от времени движения ДГ и от продвигающего поля, но при приложении поля в плоскости пленки H_{ns} в несколько раз увеличивается или уменьшается в зависимости от направления H_{ns} .

Возможно, толчком к формированию строго периодической неоднородной структуры являются колебания ДГ, связанные с «поверхностным натяжением» ДГ. Расчет показывает, что длина волны таких колебаний [3] близка к λ_x и затухают колебания в пленках с малой константой затухания на расстоянии, на 1-2 порядка превышающем λ_x . В недавней теоретической работе [39] численными методами показана возможность установления колебаний большой амплитуды при движении ДГ в сильных магнитных полях, причем вид зависимости скорости ДГ от поля в зоне параметрического возбуждения качественно такой же, как и на рис. 3 на участке $Y < 1000$ Э. Можно даже

говорить о количественном соответствии: переход к участку с отрицательной дифференциальной подвижностью в [39] происходит при $H/4\pi M \sim 0,6+1,4$ (в зависимости от константы затухания α), а на рис. 3 - при $H/4\pi M \sim 1,2$. К сожалению, вопрос о возможной взаимосвязи параметрического возбуждения колебаний ДГ и формировании устойчивой пространственно-периодической структуры на динамической ДГ огромного (по сравнению с толщиной ДГ) размера в работе [39] не рассматривался.

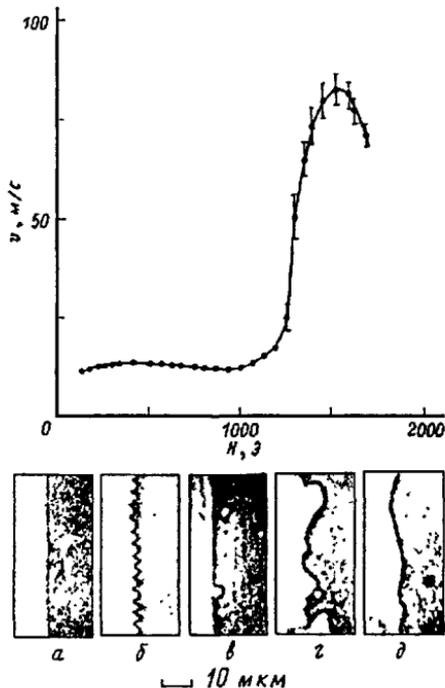


Рис. 3. Зависимость скорости ДГ от продвигающего поля H и динамические ДГ в различные моменты времени t после приложения H . H (Э), t (мкс): а) 420, 4; б) 650, 3; в) 1100, 0,25; г) 1100, 0,77; д) 1600, 0,4.

В более сильных полях ($H > 1000$ Э, рис. 3) движение ДГ сопровождается генерацией магнитных возмущений [8] впереди ДГ (рис. 3в,г). При $H > 2HJ7$ генерация магнитных возмущений прекращается, что приводит к снижению скорости фронта расширяющегося домена (рис. 3). Обнаружение верхней границы генерации магнитных возмущений показывает, что ключевым фактором дестабилизации намагниченности впереди динамической ДГ является излучение спиновых волн динамической ДГ, поток

которых, как предсказано теоретически [40], также сосредоточен по H в узком интервале. В этом интервале полей основная частота колебаний ДГ находится в полосе частот бегущих спиновых волн и поэтому появляется возможность для излучения энергии возбужденных ДГ в объем, занимаемый доменами.

Завершается глава результатами исследования движения ДГ в пленках с кристаллографической ориентацией (210), имеющих наряду с одноосной значительные кубическую и ромбическую компоненты анизотропии. Обнаружено, что в зависимости от сочетания параметров анизотропии пленок возможно формирование треугольных, каплеобразных доменов, нестабильность и формирование пространственно-периодических структур на ограниченных участках ДГ, изменение ориентации доменов при изменении направления продвигающего магнитного поля, однонаправленное повышение и снижение скорости ДГ (рис. 4). Показано, что приложение постоянного магнитного поля в плоскости пленки $H_{пл}$ может приводить, в зависимости от напряженности и

направления H_{ns} , как к подавлению анизотропии скорости ДГ, так и к значительному увеличению разнообразия форм динамических доменов, наблюдающихся в одном и том же образце.

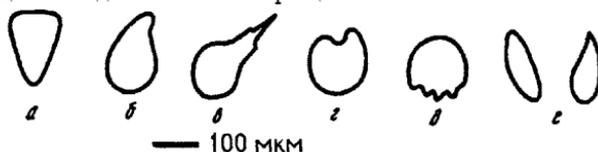


Рис. 4. Характерные формы расширяющихся доменов в (210)-пленках. Исходные домены малого размера имеют форму, близкую к цилиндрической.

В четвертой главе рассмотрены механизмы импульсного перемагничивания пленок ферритов-гранатов вдоль оси легкого намагничивания, характеризующиеся большим разнообразием механизмов перемагничивания. Наиболее детально с помощью различных экспериментальных методов импульсное перемагничивание исследовано в поликристаллических пермаллоевых пленках [30,31]. Основное внимание уделялось изучению кривой импульсного перемагничивания (КИП) - зависимости $\tau_n^{-1}(H_u)$, где τ_n - время перемагничивания пленки при амплитуде поля H_u . Линейные участки КИП характеризуют коэффициентом переключения

$$S_w = \tau_n (H_u - H_n), \quad (3)$$

где H_n - пороговое поле, определяемое точкой пересечения прямой, аппроксимирующей соответствующий участок кривой, с осью абсцисс.

В экспериментальной части главы приведены особенности методики исследования импульсного перемагничивания пленок ферритов-гранатов. Показано, что КИП пленок ферритов-гранатов, несмотря на разнообразие их форм для пленок с различными параметрами [17], в целом можно охарактеризовать как состоящими из двух характерных участков с различающимися на 1-3 порядка значениями S_w . КИП наиболее простой формы приведена на рис. 5а. На первом участке процесс перемагничивания включает зарождение доменов с обратной намагниченностью и их расширение, $S_w > 50$ Э*мкс. Второй участок соответствует механизму перемагничивания вращением вектора намагниченности, однородным по площади исследуемой области, но неоднородным, по-видимому, по толщине пленки. Он характеризуется значением $S_w < 10$ Э*мкс, а пороговое поле перехода ко второму участку совпадает со значением эффективного поля анизотропии $H_{к0}$. В отличие от пермаллоевых пленок [30,31] поля рассеяния в пленках ферритов-гранатов малы и формирования доменов в процессе перемагничивания при $H_u > H_k$ нами не обнаружено.

Для большинства пленок первый участок КИП имеет более сложный вид (например, ступенчатый; его можно характеризовать усредненной величиной S_w), отражая особенности процесса зарождения и расширения доменов, структурную стратификацию пленок - в первую очередь, неоднородность $H_{к0}$ по толщине пленки. При наличии в пленке слоя с пониженным значением $H_{к0} < Y_{к3}$ на КИП наблюдается ступенчатый переход к участку «насыщения» в полях

$H_{кз}^* < H < H_{кз}$ (рис. 5б). Показано, что этому участку соответствует механизм перемагничивания, начинающийся вращением намагниченности в слое с пониженным $H_{кз}$. Затем на границе слоев формируется торцевая ДГ [17], перемагничивание завершается движением ДГ по толщине пленки. Переход к этому механизму перемагничивания сопровождается резким ростом плотности зародышей (до $>10^6$ см⁻²) и формированием характерной «турбулентной» структуры (рис. 5в-е).

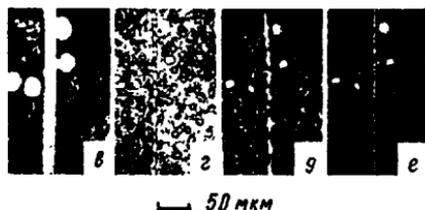
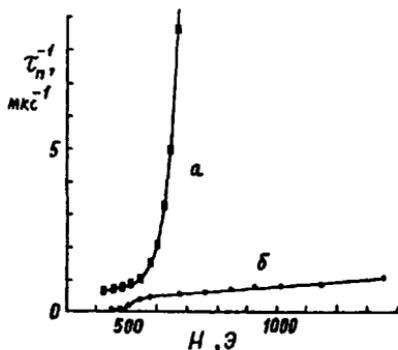


Рис. 5. КИП для однородной пленки (а) и первый участок КИП для пленки, неоднородной по толщине (б). Динамические домены (в-г) для области перехода к перемагничиванию зарождением и движением торцевой ДГ на зависимости (б). H , Э; ν , мкс: в) 480; 1,0; г) 560; 0,8; д) 590; 0,6; е) 640; 0,2.

В следующих параграфах приведены результаты исследования динамики и интегральных характеристик процессов перемагничивания, соответствующих различным участкам КИП - зародышеобразования, движения доменных границ, вращения вектора намагниченности, а также влияния ориентации и напряженности магнитных полей, температуры, структурных особен-

ностей пленок на процессы перемагничивания.

Конечное время формирования зародыша обратной магнитной фазы [10] влияет на кинетику процесса перемагничивания и является причиной задержки сигнала перемагничивания в течение 0,2-1 мкс. Обнаружено снижение порогового поля зарождения домена $H_{кз}$ при периодическом зарождении по сравнению с однократным.

В исследованных пленках ферритов-гранатов различных составов выявлена общая закономерность: переход к процессам вращения намагниченности происходит в меньших полях $H_{кз}^*$ в пленках с отрицательным рассогласованием кристаллографических параметров решетки пленки и подложки $\Delta\alpha$. Взаимосвязь $H_{кз}^*$ с $\Delta\alpha$ возможна в том случае, если магнитострикционная компонента анизотропии компенсирует неоднородность ростовой компоненты анизотропии по толщине пленки или, наоборот, усиливает её.

С ростом температуры КИП обычно монотонно смещаются в сторону меньших полей. В ряде пленок обнаружено изменение формы КИП с температурой. Показано, что причиной этого является изменение соотношения магнитных параметров в слоях пленки. Выявлена взаимосвязь между формой КИП и особенностями нелинейной динамики ДГ в сильных магнитных полях.

При расчете критических полей перемагничивания обычно используют критерий Стонера-Вольфарта, в соответствии с которым однородное перемагничивание локальных участков пленки будет происходить в том случае, если действующее статическое поле удовлетворяет уравнению астроида

$$H_{см}^{2/3} + H_{пл}^{2/3} = (H_k - 4\pi M_s)^{2/3}, \quad (4)$$

где $H_{см}$ - поле смещения, $H_{пл}$ - планарное магнитное поле.

Учет динамических эффектов [41] приводит к выводу о том, что под действием перепада поля перемагничивание может происходить при гораздо меньших амплитудах поля, чем в квазистатическом случае. В эксперименте пленку перемагничивали импульсным полем вдоль оси легкого намагничивания в присутствии постоянного магнитного поля в плоскости пленки. Показано, что критерий Стонера-Вольфарта выполняется при этих условиях (рис. 6). Динамический эффект снижения пороговых полей перемагничивания нами не обнаружен. Это можно объяснить как геометрией эксперимента (в плоскости пленки прикладывали постоянное поле), так и конечным временем установления импульса поля (10-20 нс), в то время как в [41] рассмотрен процесс перемагничивания, происходящий при приложении ступеньки поля.

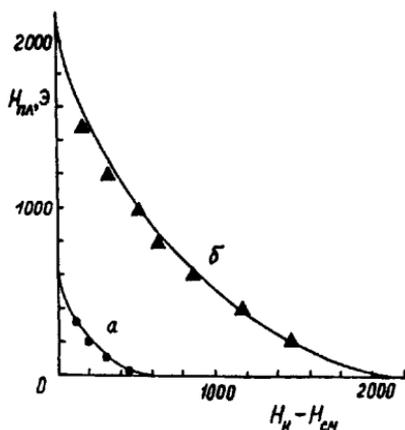


Рис. 6. Астроида перемагничивания для двух пленок с различным $H_{ю}$. Кривые соответствуют критерию Стонера-Вольфарта, точки - данные эксперимента

Завершается глава результатами исследования процессов импульсного перемагничивания в материалах с высокой скоростью движения доменных границ (в пленках с повышенным гиромангнитным отношением и ромбической анизотропией), представляющих интерес для быстродействующих магнитооптических устройств.

Пятая глава посвящена исследованию процессов перемагничивания пленок ферритов-гранатов в гармоническом магнитном поле. Следует ожидать, что параметры петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов [23,24], так же как и параметры петель гистерезиса других материалов, сложным образом зависят от амплитуды и частоты перемагничивающего поля. Для выяснения механизмов перемагничивания в гармоническом магнитном поле применены прямые методы исследования динамической доменной структуры: стробоскопический метод и метод высокоскоростной фотографии. Разработанная методика позволила провести сопоставление вида динамических доменных структур с конкретными участками петель гистерезиса в диапазоне частот $f = 10^3 - 2 \cdot 10^5$ Гц.

Ярким проявлением трансформации динамической петли гистерезиса с

частотой поля является ее нестабильность [23] в виде вариации поля старта (рис. 7). Показано, что причина нестабильности петли - неповторяемость процесса зарождения доменов при повторении циклов перемагничивания. Обнаружено, что время задержки зародышеобразования при перемагничивании в гармоническом поле может достигать -100 мкс, что на 2-3 порядка превышает характерные времена формирования зародыша новой магнитной фазы при импульсном перемагничивании пленок [10]. В гармоническом поле процесс зарождения и роста доменов с противоположным направлением намагниченности происходит под действием магнитного поля, изменяющегося в течение всего процесса перемагничивания. Вероятно, это является одной из причин увеличения задержки появления зародышей перемагничивания.

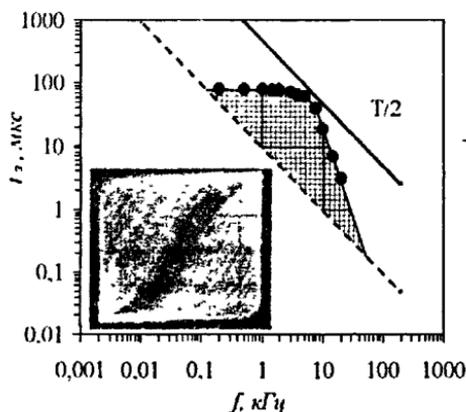


Рис. 7. Частотная зависимость времени задержки зародышеобразования t_3 (заштрихованная область). Маркерами обозначена зависимость t_3^{max} от частоты поля / при амплитуде гармонического поля $H_m = 76$ Э. Сплошная линия соответствует $t = T/2$, штриховая - $0,01T$. На вставке показана петля гистерезиса для $f = 5$ кГц.

t_3^{max} становится сравнимым с величиной полупериода поля 772 (рис. 7). При этом частота поля является граничной f_{cp} ; при $f > f_{cp}$ состояние насыщения образца не достигается в течение обоих полупериодов поля, имеет место нестабильность выбора преимущественной ориентации намагниченности и происходит переход к асимметричной петле гистерезиса треугольной формы.

Показано, что для петли гистерезиса в области нестабильности механизмы перемагничивания зависят от следующих основных параметров: скорости насыщения доменных границ V_s и среднего числа зародышей перемагничивания n_{cp} на единицу площади образца. Введенный нами параметр

$$N = V_s n_{cp} / f_{cp} \quad (5)$$

(являющийся константой эксперимента, зависящей от размера исследуемой области пленки) практически постоянен для серии образцов с параметрами V_s , n_{cp} и f_{cp} , различающимися на 1-2 порядка (рис. 8). Это позволяет прогнозировать расположение области нестабильности формы динамической петли гистерезиса по известным параметрам материала.

При изменении амплитуды H_m и частоты f гармонического магнитного поля имеет место цепочка модификаций динамических петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов (частные и предельные петли гистерезиса, нестабильные петли гистерезиса, петли гистерезиса треугольной,

эллиптической, прямоугольной формы и др.). Модификация петель гистерезиса в амплитудно-частотном H_{mf} пространстве представлена в виде фазовой диаграммы. Благодаря прямой методике наблюдения динамических доменов впервые проведено сопоставление изменения формы и параметров динамической петли гистерезиса при изменении параметров магнитного поля с соответствующими изменениями механизмов перемагничивания (особенностями зарождения, движения, коллапсирования доменов в течение периода поля в различных областях фазовой диаграммы). В завершающей части главы результаты сопоставления обобщены и представлены в виде сводной таблицы.

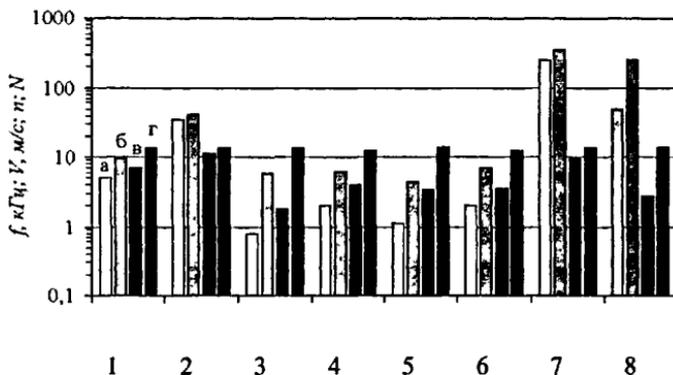


Рис. 8. Параметры пленок ферритов-гранатов для серии из 8 образцов: V_s (δ), n_{cp} (θ), f_{cp} (α), N (r).

В шестой главе представлены результаты исследования процессов формирования доменных структур при различных условиях внешнего воздействия: при квазистатическом изменении магнитного поля (5-домены, спиральные домены), в импульсном магнитном поле (массив полосовых доменов, двумерные решетки доменов, метастабильные динамические ЦМД), в гармоническом магнитном поле (спиральные домены, гигантские домены, двумерные решетки доменов), в аксиально-симметричном магнитном поле (магнитный вихрь, кольцевые структуры, волна опрокидывания магнитного момента). Найдены необходимые и достаточные условия формирования ряда структур, выявлены закономерности их эволюции.

Для выяснения механизма формирования спиральных доменов [22-24] исследовали начальную стадию процесса образования спирального домена в результате расширения цилиндрического магнитного домена (ЦМД) при квазистатическом снижении поля смещения ниже поля эллиптической неустойчивости ЦМД. Процесс разворачивания/сворачивания S -домена регистрировали с помощью видеокамеры и одновременно записывали соответствующую этому процессу квазистатическую частную петлю гистерезиса (рис. 9), фокусируя луч подсветки на область пленки, содержащей один ЦМД. Скачкообразное увеличение/уменьшение длины S -домена приводит к появлению ступеней разной величины на петле гистерезиса, а

расширение/сужение ширины S -домена отражено в виде наклона ступеней (рис. 9). Полуширина петли гистерезиса на порядок превышает коэрцитивную силу при перемагничивании лабиринтной доменной структуры (в частности, из-за гистерезиса перехода полосовой/цилиндрический домен).

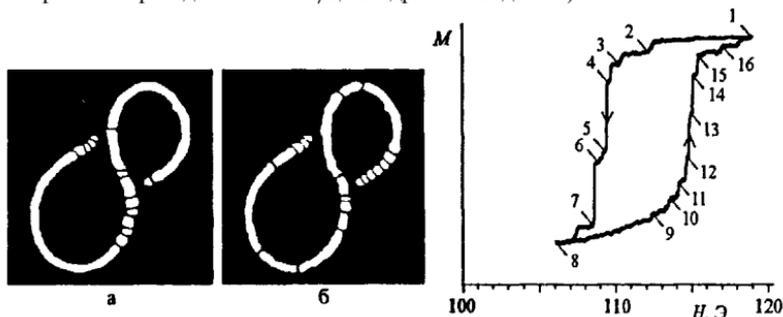


Рис. 9. Формирование S -домена при квазистатическом изменении поля смещения, а, б - результат наложения фотографий для процесса разворачивания (а) и сворачивания (б) 5-домена. Маркерами 1-16 на частной петле гистерезиса отмечены моменты фотографирования.

Закручивание полосового домена происходит во время скачков благодаря действию гиротропной силы [3]

$$F_g = 4\pi M_s \gamma^{-1} h S [\mathbf{z} \times \mathbf{V}] \quad (6)$$

на головку полосового домена, движущуюся со скоростью V . Здесь γ - гиромагнитное отношение, h - толщина пленки, \mathbf{z} - вектор, характеризующий направление намагниченности вне домена, S - эффективное число оборотов намагниченности по азимутальному углу в доменной границе замкнутого домена. Показано, что параметрами образца, характеризующими возможность формирования спиральных доменов, являются удельная гиротропная сила F_g/w_0 (гиротропная сила на единицу ширины домена) и площадь, занимаемая одним ЦМД в поле, близком к полю эллиптической неустойчивости ЦМД.

Исследование эволюции спиральных доменов в течение периода гармонического магнитного поля показало, что в течение периода поля форма спирального домена значительно изменяется. Верхняя граница области формирования динамических спиральных доменов по частоте поля связана с преобразованиями структуры границ динамических доменов, образованием участков с различной эффективной массой доменных границ, что приводит в итоге к разрывам полосовых доменов. Выявлены необходимые и достаточные условия формирования гигантских динамических доменов в гармоническом магнитном поле. Петля гистерезиса, соответствующая области их формирования, имеет форму искаженного эллипса и асимметрична относительно линии нулевой намагниченности; возможна нестабильность петли.

Под действием монополярного импульсного магнитного поля в монокристаллических пленках ферритов-гранатов может происходить самоорганизация распределения вектора намагниченности, проявляющаяся в

возникновении упорядоченных доменных структур в виде двумерных решеток доменов [25,26]. Элементами таких доменных структур могут являться ЦМД, эллипсообразные и гантелевидные домены. Формирование двумерных структур является непростой задачей, поскольку области их формирования весьма узкие (рис. 10), а для перестройки лабиринтной структуры в двумерную решетку доменов могут потребоваться десятки тысяч импульсов поля. По этим причинам разнообразные двумерные доменные структуры были обнаружены [25,26] лишь через 20 лет после начала интенсивных исследований доменной структуры в пленках ферритов-гранатов.

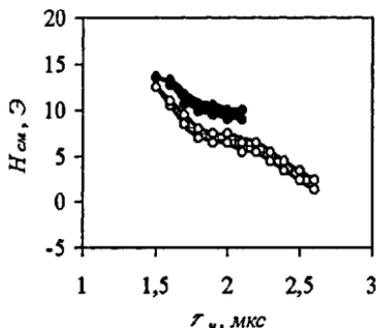


Рис. 10. Области формирования доменных структур с симметрией типа *P6* (черные маркеры) и *Pab2* (серые маркеры) по полю смещения $H_{см}$ в зависимости от длительности импульса магнитного поля $\tau_{и}$ при фиксированной амплитуде импульса $H_{и} = 270$ Э.

Тщательный анализ условий формирования двумерных структур позволил найти взаимосвязь между параметрами пленок и параметрами магнитных полей (комбинации постоянного поля смещения и импульсного или гармонического поля), под воздействием которых возможно формирование двумерных решеток доменов в пленке, и обнаружить новые конфигурации двумерных доменных структур (№ 2-4 на рис. 11). Показано, что в одной и той же пленке возможно формирование двумерных решеток доменов, принадлежащих к пяти пространственным группам ромбической и гексагональной сингоний: *P2*, *Pab2*, *P6*, *Cmm2* и *Cmm6*. Области формирования некоторых двумерных решеток частично перекрываются и они могут сосуществовать. Структурные фазовые переходы между решетками (например, *Cmm6* – *P6* – *Pab2*), как и в [25], были обратимыми. Динамические петли гистерезиса, соответствующие процессам формирования и преобразования двумерных решеток доменов, являются частными. Их характерным признаком является асимметричность (рис. 11).

В пленках ферритов-гранатов с высокой однородностью параметров по площади пленки (рис. 12а) обнаружено, что процесс искажения формы динамических ЦМД с ротационной периодичностью $l > 2$ из-за магнитостатической неустойчивости [3,4] может существенно тормозиться во времени, а размеры неискаженных метастабильных расширяющихся ЦМД достигают гигантских величин, на два порядка превышая равновесные размеры ЦМД в статических магнитных полях той же величины (рис. 12). Наибольших размеров ЦМД достигают при расширении в магнитном поле с высокой пространственной однородностью.

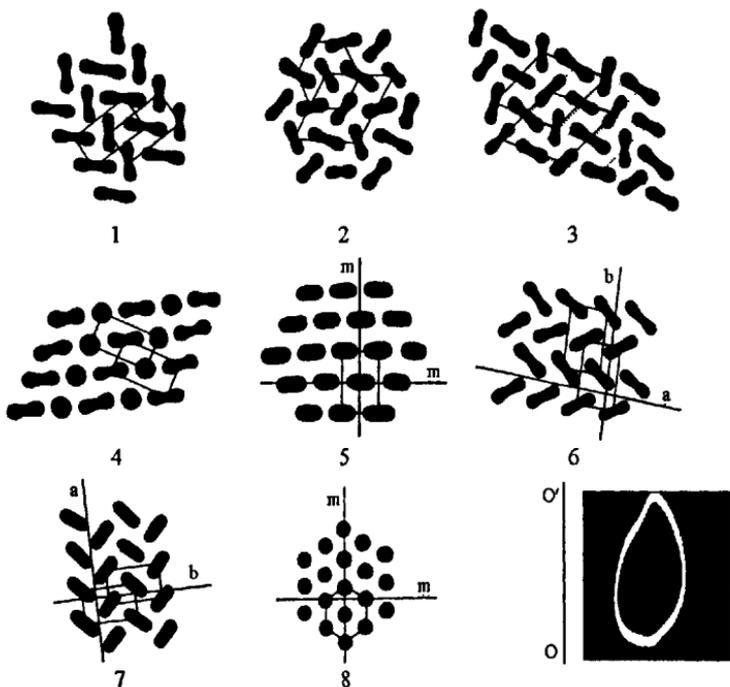


Рис. 11. Фрагменты статических доменных структур, сформированных под действием гармонического магнитного поля амплитудой $H_m = 77$ Э и частотой $\neq 90$ (1), ~ 100 (2-6), 120 (7), 160 кГц (8) на одном и том же участке образца в присутствии поля смещения $H_{cu} = 6$ Э. Симметрия доменных структур описывается двумерными пространственными группами $P2$ (1-4), $Cmm2$ (5), $Pab2$ (6 и 7), $Cmm6$ (8). Выделены элементарные ячейки (P , C) и отмечены плоскости скользящего (a , b) и зеркального (m) отражений. Указано опорное направление 00 в плоскости образца и приведена петля гистерезиса, характерная для области формирования двумерных структур.

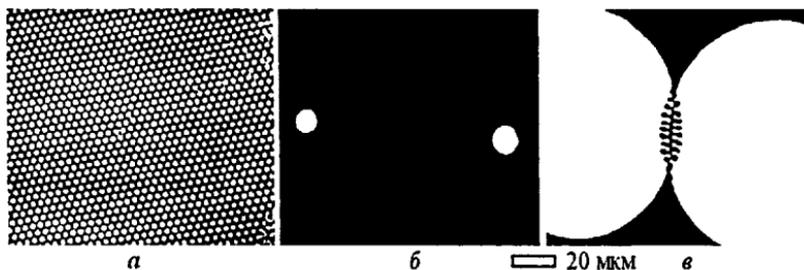


Рис. 12. Статическая гексагональная решетка ЦМД (a) и динамические ЦМД через 0,4 (b) и 3,2 мкс (v) после начала процесса размагничивания пленки.

Далее приведены результаты исследования процессов формирования динамических доменных структур в импульсном магнитном поле с аксиальной симметрией. Динамические доменные структуры в таком поле: волна опрокидывания магнитных моментов (ВОММ) [9], кольцевые структуры, магнитный вихрь [8,9,12] - также обладают аксиальной симметрией, а влияние кубической анизотропии пленки приводит к образованию динамического треугольного магнитного домена (ТМД) [8,12]

При исследовании механизма перемагничивания движением ВОММ показано, что в однородных пленках он завершается через 10-20 нс после приложения импульса поля. В пленках с ярко выраженным переходным слоем движение волны в течение 100-300 нс заключается в формировании наклонной ДГ после окончания фронта импульса поля H_0 и последующем изменении наклона ДГ до тех пор, пока она не станет перпендикулярной плоскости пленки - до образования сквозного по толщине пленки ТМД. Результаты исследования кривой импульсного перемагничивания в однородном поле (гл. 4) позволяют рассчитать хронограммы движения ВОММ, используя выражение

$$\tau_n(r) = S_w / (H(r) (\sin^{2/3} \varphi + \cos^{2/3} \varphi)^{3/2} - H_{cs}), \quad (7)$$

основанное на (3), (4). Здесь $\tau_n(r)$, $H(r)$, φ - время перемагничивания, действующее поле и угол отклонения вектора поля от оси лёгкого намагничивания плёнки в точке с координатой r . Таким образом, движение ВОММ отражает пространственное распределение аксиально-симметричного поля и вызванного им различия времени перемагничивания по площади пленки, ограниченной катушкой. Наблюдавшиеся экспериментально особенности ВОММ: время формирования, форма хронограммы [9] близки к расчетным (рис. 13). Несколько позже нашей работы авторы [42] предложили близкую к рассмотренной выше модель формирования ВОММ.

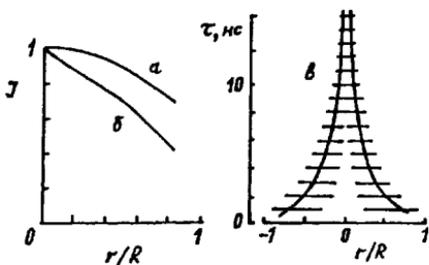


Рис. 13. Расчетные зависимости положения участков в пленке от величины тока / в плоской катушке радиуса R , где достигаются значения магнитного поля, соответствующие: а) $H=H_{cs}$, б) астрои́де перемагничивания ($J=1$ соответствует $H=H_{cs}$ в центре катушки), в) расчетная хронограмма при $H=H_{cs}$ в центре катушки.

В результате исследования процесса формирования ТМД обнаружено, что от амплитуды импульса поля зависят не только размеры и форма ТМД, но и его ориентация относительно осей кубической анизотропии пленки. Направление поворота ТМД (на угол $\sim 60^\circ$), скорее всего, имеет динамическую природу, подобную механизму закручивания рукавов вихря: во всех исследовавшихся образцах указанные направления совпадали. В пленках ферритов-гранатов с пренебрежимо малой кубической анизотропией после окончания движения ВОММ неперемагниченная область имеет не

треугольную, а практически круговую форму (рис. 14а). По форме сигнала перемагничивания можно судить о характере протекания процесса перемагничивания, что позволяет в ряде случаев обойтись без визуального наблюдения доменной структуры магнетика. Показано, что перегибы на сигнале соответствуют качественным изменениям в процессе перемагничивания: формированию торцевой ДГ, ТМД.

Впервые проведено экспериментальное исследование влияния скорости нарастания магнитного поля на конфигурацию динамических доменных структур, возникающих в процессе импульсного перемагничивания пленок. Показано, что в пленках с достаточно малым параметром затухания в одном и том же образце возможно как формирование ВОММ, так и кольцевой и вихревой структур.

Конфигурация структур определяется временем установления импульса поля или, точнее, скоростью перемещения линии по площади пленки в процессе нарастания H_u , на которой напряженность поля постоянна. Длительности фронта $\tau_\phi = 5-10$ нс соответствует пространственная скорость перемещения линии $V_n \sim 10^7$ м/с, что на 1-2 порядка превышает минимальную фазовую скорость спиновых волн V_+ . При этом перемагничивание осуществляется движением ВОММ, переходящей в треугольный или круговой домен (рис. 14а). С увеличением τ_ϕ , когда $V_n \sim V_+$, происходит переход к процессу перемагничивания с образованием характерной кольцевой структуры (рис. 14б-г). Она представляет собой чередование концентрических «колец» - перемагниченных и неперемагниченных участков пленки с периодом 20-60 мкм, зависящем от V_n .

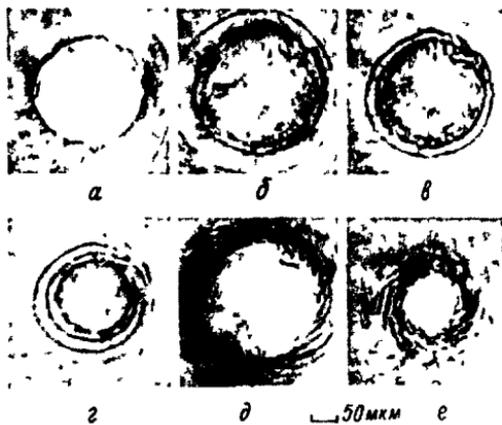


Рис. 14. Динамические доменные структуры при $H_u = 1,4$ кЭ (а), 1,5 кЭ (б-е) в моменты времени t после приложения H_u с различной длительностью фронта τ_ϕ , нс; t , нс: а - 7; 15; б - 40, 30; в - 40; 35; г - 40, 45; д - 70, 75. $H_{см} = 220$ Э.

Дальнейшее увеличение τ_ϕ приводит к появлению новой динамической доменной структуры - магнитного вихря (рис. 14д,е). Рукава вихря состоят из слившихся микродоменов, большая ось которых вследствие действия гиротропной силы направлена под углом к радиусу, что и приводит к формированию вихря. Направление закрутки вихрей (если они вызываются гиротропной силой) в исследованных пленках должны совпадать, поскольку знак гиромагнитного отношения в них не изменяется. В экспериментах действительно наблюдалось одно и то же направление закрутки вихрей. В

случае $V_{\#} \ll V_{+}$ динамическая ДГ «отслеживает» перемещение линии, где $H = \text{const}$.

Приводятся данные по области локализации динамических доменных структур относительно центра перемещающегося устройства в виде плоской катушки для различных V_{+} . Показано, что определяющую роль в их формировании играет генерация магнитных возмущений вблизи движущихся ДГ, которая может быть объяснена в рамках спин-волнового механизма. Дополнительным аргументом в пользу влияния механизма излучения спиновых волн движущейся в сильном магнитном поле ДГ на формирование ряда наблюдавшихся доменных структур является то, что все звенья эволюции доменных структур (ВОММ, кольцевые и вихревые структуры, динамическая ДГ) наблюдаются только в феррит-гранатовых пленках с малым затуханием.

Седьмая глава посвящена прикладным вопросам - использованию пленок ферритов-гранатов в магнитооптических устройствах с повышенным быстродействием, разработке новых способов измерения параметров пленок и параметров магнитных полей.

Приведены результаты исследования процессов перемагничивания магнитооптических транспарантов на базе пленок ферритов-гранатов, даются рекомендации по повышению быстродействия и расширению области устойчивой работы устройств. Показано, что зависимости требуемых для переключения ячеек транспарантов энергозатрат от времени переключения ячеек нося пороговый характер.

На основании проведенных исследований процессов перемагничивания пленок предложены способы повышения быстродействия магнитооптических устройств обработки информации, создаваемых на базе феррит-гранатовых пленок, как за счет повышения скорости движения ДГ, так и перехода от механизма перемагничивания движением ДГ к механизму перемагничивания вращением вектора намагниченности. Предложено использовать упорядоченные доменные структуры в качестве основы для управляемых магнитооптических дефлекторов.

Предложены новые способы измерения параметров пленок: знака гиромангнитного отношения, температуры компенсации момента импульса ферромагнетика, эффективного магнитного поля одноосной анизотропии, слоистой структуры пленок.

Приведено описание новых способов и устройств для измерения, визуализации и топографирования магнитных полей, позволяющих оперативно контролировать пространственное распределение магнитных полей сложной формы, визуализировать дефекты в немагнитных проводящих материалах, контролировать качество постоянных магнитов; визуализировать распределение магнитных частиц вплоть до субмикронных размеров на немагнитном носителе; проводить детальную экспертизу магнитной кодировки ценных бумаг и денежных знаков.

Завершается диссертация изложением основных полученных в работе результатов и списком цитированной литературы.

Основные результаты и выводы

1. Разработана магнитооптическая установка для одновременного исследования динамики доменных структур и интегральных характеристик перемагничивания магнитооптических материалов в гармонических и импульсных магнитных полях с временным разрешением 2 нс и временем однократной экспозиции доменной структуры 5 нс. На установке впервые реализован стробоскопический метод исследования динамических доменных структур в переменном магнитном поле с регулируемой кратностью стробирования $K_{cm} = 1, 2, 3 \dots$. Впервые для повышения чувствительности установки в тракте регистрации интегрального сигнала перемагничивания предложено использовать принцип двойного стробирования, что в комплексе с рядом других мер позволило снизить периодические помехи, дрейф и флуктуационные шумы аппаратуры более чем на 40 дБ.

2. Экспериментально исследованы квазистатические процессы перемагничивания пленок ферритов-гранатов. Найдены условия, при которых результаты измерения коэрцитивной силы, полученные методом осцилляции доменных границ, совпадают с результатами, полученными по полуширине квазистатической петли гистерезиса. Показано, что динамические механизмы перемагничивания начинают оказывать влияние на параметры петли гистерезиса, начиная с частот в единицы герц. Выявлена взаимосвязь перегиба на температурной зависимости коэрцитивной силы пленок ферритов-гранатов с наличием соответствующего перегиба на температурной зависимости рассогласования кристаллографических параметров пленки и подложки.

3. При исследовании процессов перемагничивания пленок в гармоническом магнитном поле обнаружена аномальная временная задержка процесса зарождения доменов. Выявлена зависимость диапазона частот гармонического магнитного поля, в котором проявляется явление нестабильности петли гистерезиса в виде вариации поля старта, от параметров магнитного материала. Показано, что причиной нестабильности петли является неповторяемость процесса зарождения доменов при повторении циклов перемагничивания. Благодаря прямой методике наблюдения динамических доменов впервые проведено сопоставление изменения формы и параметров петли гистерезиса при изменении амплитуды и частоты магнитного поля с соответствующими изменениями механизмов перемагничивания, построена обобщенная фазовая диаграмма модификации петель гистерезиса и процессов перемагничивания.

4. В результате исследования динамики доменных границ в сильных магнитных полях показано, что уширение изображения динамической границы может происходить как совместно с изгибными искажениями границы, генерацией магнитных возмущений, так и независимо от них и достигает 200 мкм в пленках с высокой скоростью движения доменных границ. В пленках с малой константой затухания на зависимости скорости доменных границ от поля вдали от критического поля срыва стационарного движения границ обнаружен участок с отрицательной дифференциальной подвижностью, соответствующий

формированию пространственно-периодических структур на динамических доменных границах. Показано, что подвижность и скорость насыщения доменных границ вблизи точки магнитной компенсации остаются конечными, уменьшаясь более чем на два порядка величины по сравнению со значениями в окрестности точки компенсации момента импульса. В пленках со сложной анизотропией обнаружены новые разновидности анизотропии скорости доменных границ. Показано, что приложение постоянного магнитного поля в плоскости пленки может приводить, в зависимости от его напряженности и направления, как к подавлению анизотропии скорости границ, так и значительному увеличению разнообразия видов анизотропии скорости доменных границ, наблюдающихся в одном и том же образце.

5. Впервые проведено исследование динамики доменных границ в магнитных полях вплоть до эффективного поля одноосной анизотропии пленок. Показано, что в присутствии поля в плоскости пленки, сравнимого с полем анизотропии, в пленках с высоким фактором качества возможно движение доменных границ со скоростями, на два-три порядка превышающими предельную скорость Уокера и близкими к минимальной фазовой скорости спиновых волн и скорости поперечного звука в кристалле граната, причем скорость насыщения доменных границ при увеличении продвигающего поля достигается асимптотически. Обнаружена верхняя (по полю) граница генерации магнитных возмущений вблизи движущейся доменной границы, тем самым подтверждено теоретически предсказанное явление излучения спиновых волн доменной границей в сильных магнитных полях. Выявлен вид зависимости скорости доменных границ, движущихся вдоль оси легкого намагничивания, от поля в плоскости пленки.

6. Проведено исследование процессов импульсного перемагничивания пленок ферритов-гранатов в однородном магнитном поле. Показано, что кривая импульсного перемагничивания состоит из двух участков, усредненные коэффициенты переключения которых различаются на 1-3 порядка. На первом участке (с большим коэффициентом переключения) в процессе перемагничивания образуются динамические доменные структуры, форма участка отражает особенности процессов зарождения и движения доменов, а также неоднородность пленок. Пороговое поле перехода ко второму участку (с меньшим коэффициентом переключения) совпадает с эффективным полем анизотропии пленок. На втором участке в процессе перемагничивания доменные структуры не образуются. Выявлена взаимосвязь порогового поля перехода к процессам вращения намагниченности с величиной рассогласования кристаллографических параметров решетки пленки и подложки. Обнаружено снижение пороговых полей зарождения доменов при периодическом зарождении доменов по сравнению с однократным. Показано, что критерий Стонера-Вольфарта выполняется при импульсном перемагничивании пленок вдоль оси легкого намагничивания в присутствии постоянного поля, перпендикулярного легкой оси.

7. В результате исследования механизмов формирования доменных структур в аксиально-симметричном импульсном магнитном поле найдена

взаимосвязь особенностей волны опрокидывания магнитного момента и параметров пленок, построена модель волны опрокидывания магнитного момента. Обнаружено изменение ориентации динамического треугольного магнитного домена относительно осей магнитной анизотропии пленки при изменении амплитуды импульса поля. Выявлена взаимосвязь формы интегрального сигнала перемагничивания с механизмами импульсного перемагничивания пленок.

8. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния скорости нарастания магнитного поля на конфигурацию динамических доменных структур, возникающих в процессе импульсного перемагничивания пленок. Показано, что в пленках с достаточно малой константой затухания при уменьшении скорости нарастания поля с аксиальной симметрией последовательно реализуются механизмы перемагничивания пленок с образованием следующих динамических доменных структур: волны опрокидывания магнитного момента, переходящей в треугольный или круговой магнитный домен; системы концентрических кольцевых доменов; магнитного вихря; динамической доменной границы. На основе спин-волнового механизма построена модель трансформации доменных структур при изменении скорости нарастания поля.

9. Исследована эволюция гигантских динамических доменов и динамических спиральных доменов в течение периода гармонического магнитного поля. Найдены необходимые и достаточные условия для формирования спиральных доменных структур и гигантских динамических доменов. Показано, что верхняя граница области формирования спиральных доменов по частоте поля связана с преобразованиями структуры границ доменов. Обнаружено формирование динамических цилиндрических магнитных доменов с размерами, на два порядка превышающими равновесные размеры доменов. Выявлены условия формирования решеток доменов как в гармоническом, так и в импульсном магнитном поле. Обнаружены новые конфигурации двумерных решеток доменов.

10. На основании результатов проведенных исследований процессов перемагничивания пленок ферритов-гранатов предложены и защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами:

- новые **магнитооптические** устройства: дефлекторы, модуляторы;
- новые способы повышения быстродействия магнитооптических устройств обработки и отображения информации;
- новые способы измерения параметров пленок: знака гиромагнитного отношения, температуры компенсации момента импульса ферромагнетика, эффективного магнитного поля одноосной анизотропии, слоистой структуры пленок;
- новые способы и устройства для измерения, визуализации и топографирования магнитных полей.

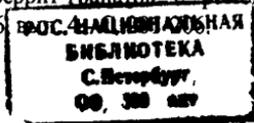
Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Дудоров В.Н., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Червенков В.Д. Устройство подавления помех, дрейфа и шума для магнитооптической установки // ПТЭ.- 1985.-№1,- С. 146-148.
2. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Интегральные характеристики импульсного перемагничивания пленок феррит-гранатов // ЖТФ.- 1985.- Т. 55, вып. 6.- С. 1199-1201.
3. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. Универсальная установка для исследования динамических свойств материалов с цилиндрическими магнитными доменами // ПТЭ.-1985.- № 5.- С. 247-248.
4. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Интегральные характеристики и динамика импульсного перемагничивания пленок феррит-гранатов // ЖТФ.-1985.- Т. 55, вып. 10,-С. 1987-1991.
5. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Зарождение доменов с обратной намагнитченностью при импульсном перемагничивании пленок феррит-гранатов в присутствии поля в плоскости пленки // Письма в ЖТФ.- 1986.- Т. 12, вып. 1.-С. 28-32.
6. Дудоров В.Н., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Тимошечкин М.И., Червоненкис А.Я. Магнитооптический носитель информации. Авт. свид. № 1292511.1986.
7. Дудоров В.Н., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Магнитооптический модулятор. Авт. свид. №1274511.1986.
8. Дудоров В.Н., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Влияние неоднородности импульсного магнитного поля на перемагничивание пленок феррит-гранатов //ЖТФ.-1986.- Т. 56, вып. 6.- С. 949-951.
9. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. Спин-волновой механизм генерации микродоменов вблизи движущейся доменной стенки // Новые магнитные материалы микроэлектроники (тез. докл. X Всесоюзной школы-семинара). Рига.-1986.- С. 208-209.
- Ю.Дудоров В.Н., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Влияние температуры на интегральные характеристики импульсного перемагничивания пленок феррит-гранатов // ФТТ,-1986.- Т. 28, вып.5.- С. 1549-1552.
- П.Логунов М.В., Рандошкин В.В. Импульсное перемагничивание пленок феррит-гранатов в присутствии поля в плоскости пленки // ФТТ.- 1986.- Т. 28, вып. 5.- С. 1559-1562.
- П.Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. Динамические доменные структуры при импульсном перемагничивании монокристаллических пленок феррит-гранатов // ФТТ.-1987.- Т. 29, вып. 8.- С. 2247-2254.
- 13.Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Тимошечкин М.И. Магнитооптический носитель информации. Авт. свид. № 1351446.1987.
- 14.Дудоров В.Н., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ определения числа слоев в домено-содержащей пленке. Авт. свид. № 1300560. МКИ G1 1C11/14 // Бюлл.изобр. 1987.-№12.

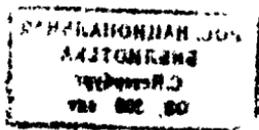
15. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Формирование волны опрокидывания магнитных моментов в пленках феррит-гранатов // ФТТ.-1988.- Т. 30, вып. 2.- С. 378-381.
16. Логунов М.В., Рандошкин В.В. О динамике доменных стенок в пленках феррит-гранатов в сильных магнитных полях // ЖТФ.-1988.- Т. 58, вып. 6.- С. 1237-1238.
- П. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Спиральная доменная структура в пленках феррит-гранатов // XVIII Всесоюзн. конф. по физике магн. явлений (тез. докл.). Калинин, 1988.- С. 235-236.
18. Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Импульсное перемагничивание пленок феррит-гранатов вблизи точки компенсации момента импульса // Письма в ЖТФ.-1988.-Т. 14, вып.14.-С. 1315-1318.
19. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Малогабаритный блок питания электронно-оптического преобразователя // ПТЭ.-1988.- № 5.- С. 242.
20. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Высокие скорости доменных стенок в магнитооптических пленках феррит-гранатов в присутствии планарного магнитного поля // Письма в ЖТФ.- 1989.- Т. 15, вып. 9.- С. 64-67.
21. Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ определения знака гиромангнитного отношения в доменосодержащих пленках. Авт. свид. № 1501159. МКИ G11C11/14 // Бюлл. изобр. 1989.- №30.
22. Голузинский П.А., Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ определения температуры компенсации момента импульса в доменосодержащих пленках. Авт. свид. № 1513518. МКИ G11C11/14 // Бюлл. изобр. 1989.-№37.
23. Логунов М.В., Прытков В.П., Рандошкин В.В. Способ калибровки электромагнита. Авт. свид. № 1513530. МКИ H01F7/06, H01H49/00 // Бюлл. изобр. 1989.-№37.
24. Рандошкин В.В., Логунов М.В., Чани В.И., Сажин Ю.Н., Клиш В.П., Нам Б.П., Соловьев А.Г., Червоненкис А.Я. Магнитооптические пленки феррит-гранатов для быстродействующих управляемых транспарантов // Письма в ЖТФ.- 1989.- Т. 15, вып. 14.- С. 42-44.
25. Клиш В.П., Логунов М.В., Нам Б.П., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н., Соловьев А.Г., Чани В.И., Червоненкис А.Я. Влияние диффузионного отжига на свойства пленок $(Y, Lu, Pr, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с ромбической анизотропией // Письма в ЖТФ.-1989.- Т. 15, вып. 14.- С. 79-83.
26. Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. Исследование свойств пленок $(Gd, Tm, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ в окрестности точки компенсации момента импульса // ФТТ.-1989.- Т. 31, вып. 10.- С. 58-63.
27. Рандошкин В.В., Чани В.И., Логинов Н.А., Логунов М.В., Сигачев В.Б., Тимошечкин М.И., Свойства магнитооптических пленок феррит-граната состава $(Bi, Y, Lu)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ // Препринт ИОФ АН СССР № 76. М., 1989.-68 с.
28. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н. Динамические домены в пленках $(Y, Lu, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с ориентацией (210) // ФТТ.- 1990.- Т. 32, вып. 5.- С. 1456-1460.

29. Еськов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н., Чани В.И. Свойства пленок $(Y, Lu, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$, выращенных на подложках из кальций-ниобий-галлиевого граната // Электронная техника. Серия Материалы. 1990.- № 5/250.- С. 30-32.
30. Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. О знаке эффективного значения гиромагнитного отношения в пленках феррит-гранатов вблизи точки компенсации момента импульса // ЖТФ.-1990.- Т. 60, вып. 9.- С. 126-128.
31. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ калибровки источника магнитного поля. Авт. свид. № 1603436. МКИ G1 IC11/14 // Бюлл. изобр. 1990.- № 40.
32. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Носитель информации. Авт. свид. № 1541673 // Бюлл. изобр. 1990.- № 5.
33. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н. Импульсное перемагничивание эпитаксиальных пленок $(Y, Lu, Pr, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с ромбической анизотропией // Письма в ЖТФ.-1990.- Т. 16, вып. 12.- С. 68-72.
34. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н. Влияние температуры на свойства эпитакси-альных пленок с ориентацией (210) // Письма в ЖТФ.- 1990.- Т. 16, вып. 18.- С. 60-64.
35. Randoshkin V.V., Logunov M.V.. Dynamic properties of iron garnet films // Thin Films and Beam-Solid Interactions. C-MRS Proc. 1990.- V. 4.- P. 267-272.
36. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Динамика перемагничивания пленок феррит-гранатов со слабой одноосной анизотропией // ФТТ.- 1991.- Т. 33, вып. 3.- С. 955-957.
37. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н., Клиш В.П., Нам Б.П., Соловьев А.Г. Механизмы переключения ячеек магнитооптического управляемого транспаранта с повышенной коэрцитивностью // ЖТФ.- 1991.- Т. 61, вып. 4.- С. 205-207.
38. Логунов М.В., Рандошкин В.В.. Способ формирования доменной структуры в магнетике и магнитооптический дефлектор-концентратор. Авт. свид. № 1675950. МКИ G1 IC11/14 // Бюлл. изобр. 1991.- № 33.
39. Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н. О термостабильности динамических параметров магнитооптических пленок феррит-гранатов с высоким быстродействием // ЖТФ.- 1991.- Т. 61, вып. 10.- С. 180-183.
40. Айрапетов А.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Чани В.И. Пленки $(Yb, Bi)_3(Fe, Ga)_5 O_{12}$ с повышенным гиромагнитным отношением // Письма в ЖТФ.-1992.- Т. 18, вып. 2.- С. 74-77.
41. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ измерения эффективного магнитного поля одноосной анизотропии в магнитной пленке. Авт. свид. № 1765847. МКИ G1 IC11/14 // Бюлл. изобр. 1992.- № 36.
42. Рандошкин В.В., Логунов М.В., Сажин Ю.Н., Чани В.И., Клиш В.П., Шушера Е.Э. Пленки $(Eu, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с разной ориентацией вблизи точки компенсации момента импульса // Письма в ЖТФ.- 1992.- Т. 18, вып. 4.- С. 71-74.
43. Айрапетов А.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Чани В.И., Шушера Е.Э. Пленки $(Dy, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с повышенным гиромагнитным отношением // Письма в ЖТФ.-1992.- Т. 18, вып. 4.- С. 79-82.

44. Айрапетов А.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Чани В.И., Шушурова Е.Э. Свойства пленок $(\text{Ho,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ вблизи точки компенсации момента импульса // ФТТ.-1992.- Т. 34, вып. 5.- С. 1640-1642.
45. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Нелинейная динамика доменных стенок в висмут-содержащих монокристаллических пленках феррит-гранатов // Труды ИОФАН. М.: Наука, 1992.- Т. 35.- С. 107-122.
46. Рандошкин В.В., Ефремов В.В., Логунов М.В., Сажин Ю.Н. Пленки $(\text{Tb,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ вблизи компенсации момента импульса // Письма в ЖТФ.- 1993.-Т. 19, вып. 2.-С. 28-32.
47. Рандошкин В.В., Логунов М.В. Динамическая визуализация магнитной записи // Письма в ЖТФ.-1993.- Т. 19, вып. 16.- С. 62-65.
48. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Устройство для визуализации и топографирования пространственно-неоднородного магнитного поля. Патент № 1813217. МКНГ11В11/14 //Бюлл. изобр. 1993.-№ 16.
49. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ топографирования неоднородного магнитного поля. Авт. свид. № 1824618. МКИ G02F1/09 // Бюлл. изобр. 1993.- № 24.
50. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ визуализации и топографирования магнитных полей. Авт. свид. № 1824619. МКИ G02F11/09 // Бюлл. изобр. 1993.-№ 24.
51. Рандошкин В.В., Логунов М.В. Эффект "памяти" при импульсном перемагничивании пленок феррит-гранатов, начинающемся зародышеобразованием // Письма в ЖТФ.-1994.- Т. 20, вып. 5.- С. 17-21.
52. Рандошкин В.В., Логунов М.В. Динамическая визуализация дефектов в проводящих материалах с помощью магнитооптического магнитовизора // Письма в ЖТФ.-1994.- Т. 20, в. 5.- С. 22-26.
53. Рандошкин В.В., Логунов М.В. Механизм формирования диффузной доменной стенки // ФТТ.-1994.- Т. 36, вып. 6.- С. 1770-1773.
54. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Влияние рассогласования параметров пленки и подложки на перемагничивание висмут-содержащих пленок феррит-гранатов // ЖТФ.-1994.- Т. 64, вып. 7.- С. 197-200.
55. Рандошкин В.В., Логунов М.В. Влияние планарного магнитного поля на динамику доменных стенок в пленках феррит-гранатов с малым затуханием // ФТТ.-1994.- Т. 36, вып. 12.- С. 3498-3505.
56. Logunov M.V. Domain wall mobility at high drive fields // 14th Int. Coll. on Magnetic Films and Surfaces. Dusseldorf, 1994.- P. 700-701.
57. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Способ визуализации и топографирования неоднородных магнитных полей. Патент РФ № 2017182. МКИ G02F11/09 // Бюлл. изобр. 1994.-№ 14.
58. Логунов М.В., Рандошкин В.В. Устройство для визуализации и топографирования неоднородных магнитных полей. Патент РФ № 2047170. МКИ G02F11/09 // Бюлл. изобр. 1995.- № 30.
59. Рандошкин В.В., Логунов М.В., Сажин Ю.Н. Влияние празеодима на динамику доменных стенок в пленках феррит-гранатов с ромбической магнитной анизотропией // ЖТФ.-1996.- Т. 66



60. Логунов М.В., Червенков В.Д. Двухполярный импульсный стабилизатор тока электромагнита // ПТЭ.-1997.- № 1.- С. 166-167.
61. Логунов М.В., Моисеев Н.В. Формирование сотовой доменной структуры в магнитных пленках // Письма в ЖТФ.-1997.- Т. 23, вып. 9.- С. 46-51.
62. Логунов М.В., Косинец Г.А. Динамика торцевой доменной границы в пленках ферритов-гранатов // Новые магнитные материалы микроэлектроники (тез. докл. XVI Междунар. школы-семинара). М., 1998.- С. 290-291.
63. Логунов М.В., Герасимов М.В. Коэрцитивная сила пленок ферритов-гранатов в зависимости от максимальной напряженности внешнего магнитного поля // Письма в ЖТФ.-1999.- Т. 25, вып. 22.- С. 39-43.
64. Логунов М.В., Герасимов М.В., Косинец Г.А., Моисеев Н.В. Установка для исследования процессов перемагничивания магнитооптических материалов в диапазоне частот 0-200 кГц// Методы и средства измерений физических величин (тез. докл IV Всеросс. конф.). Н. Новгород, 1999.- Ч. 1.- С. 37-38.
65. Батин В.В., Герасимов М.В., Кяшкин В.М., Логунов М.В. Влияние рассогласования параметров пленки и подложки на коэрцитивную силу пленок ферритов-гранатов // Вестник Нижегородского университета. Серия физика тв. тела.- 2000.- Вып. 1(3).- С. 24-30.
66. Логунов М.В., Герасимов М.В. Формирование двумерных решеток доменов в гармоническом магнитном поле // Письма в ЖЭТФ.- 2001.- Т. 74, вып. 10.- С. 551-555.
67. Логунов М.В., Герасимов М.В. Эволюция динамических спиральных доменов в течение периода переменного магнитного поля // ФТТ.- 2002.- Т. 44, вып. 9.- С. 1627-1631.
68. Логунов М.В., Герасимов М.В., Малышев П.М. О причинах нестабильности динамических петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов // Новые магнитные материалы микроэлектроники (сб. трудов XVIII междунар. школы-семинара). М., 2002.- С. 428-430.
69. Логунов М.В., Герасимов М.В. Формирование спиральных доменов при квазистатическом изменении магнитного поля // Новые магнитные материалы микроэлектроники (сб. трудов XVIII междунар. школы-семинара). М., 2002.- С. 431-433.
70. Логунов М.В., Моисеев Н.В., Юдина С.В. Динамика доменных границ в окрестности точки компенсации магнитного момента // Новые магнитные материалы микроэлектроники (сб. трудов XVIII междунар. школы-семинара). М., 2002.- С. 471-473.
71. Логунов М.В., Моисеев Н.В., Сажин Ю.Н., Юдина С.В. Быстродействие и энергетические затраты на переключение состояния ячеек магнитооптического транспаранта // Письма в ЖТФ.- 2003.- Т. 29, вып. 12.- С. 37-41.
72. Логунов М.В., Герасимов М.В. Формирование и эволюция гигантских динамических доменов в гармоническом магнитном поле // ФТТ.- 2003.- Т. 45, вып. 5,- С 1031-1036.



Список цитируемой литературы

1. Sixtus K.J., Tonks L. Propagation of Large Barkhausen Discontinuities // Phys. Rev.- 1931.- V. 37, № 8.- P. 930-958. Part II: Phys. Rev.- 1932.- V. 42, № 3.- P. 419-435.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. К теории дисперсии магнитной проницаемости в ферромагнитных телах (1935 г.) // В кн.: Ландау Л.Д. Собр. тр. М.: Наука, 1969.- С. 128-243.
3. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. - М.: Мир, 1982.- 384 с.
4. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / А.М. Балбашов, Ф.В. Лисовский, В.К. Раев и др. / Под ред. Н.Н. Евтихеева, Б.Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987.- 488 с.
5. Zimmer G.J., Morris T.M., Vural K., Humphrey F.V. Dynamic diffuse wall in magnetic bubble garnet materials // Appl. Phys. Lett.-1974.- Vol. 25, N 12.- P.750-753.
6. Боков В.А., Волков В.В., Карпович В.И. Эмпирическое выражение для скорости насыщения доменной стенки в гранатовых ЦМД-пленках // ФТТ.- 1982.- Т.24, вып. 8.- С. 2318-2324.
7. Боков В.А., Волков В.В., Петриченко Н.Л. Динамика доменных границ в пленках гранатов в больших продвигающих полях. ФТТ.- 2002.- Т. 44, вып. П.-С. 2018-2021.
8. Иванов Л.П., Логгинов А.С., Непокойчицкий Г.А. Экспериментальное обнаружение нового механизма движения доменных границ в сильных магнитных полях //ЖЭТФ.-1983.- Т. 84, вып. 3.- С. 1006-1022.
9. Иванов Л.П., Логгинов А.С., Непокойчицкий Г.А., Никитин Н.И. Экспериментальное исследование неоднородного вращения вектора намагниченности в монокристаллических пленках ферритов-гранатов // ЖЭТФ.-1985.- Т. 88, вып. 1.- С. 260-271.
10. Kleparski V. G., Pinter I, Bodis L. Domain walls formation during nucleation in garnet films // IEEE Trans. Magn.1984.- V. MAG-20, N 5.- P. 1156-1158.
- П.Клепарский В.Г., Пинтер И. Динамические микромагнитные структуры в магнито-одноосных пленках ферритов-гранатов // ФТТ.- 1988.- Т. 30, вып. 9.- С. 2787-2790.
- 12.Куделькин Н.Н., Прохоров А.М., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б., Тимошечкин М.И. Механизмы импульсного перемагничивания пленок феррит-гранатов // ДАН СССР.-1985.- Т. 281, вып. 4.- С. 848-851.
- 13.Четкий М.В., Шапаева Т.Б., Савченко Л.Л. Аксиально-симметричные доменные структуры в пленках ферритов-гранатов // ФТТ.- 2000.- Т. 42, вып. 7.-С. 1287-1290.
- 14.Барьятар В.Г., Иванов Б.А., Четкий М.В. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках // УФН.-1985.- Т. 146, вып. 3.- С. 417-458.
- 15.Белотелов В.И., Логгинов А.С., Николаев А.В. Детектирование и исследование магнитных микро- и наноструктур с применением оптической микроскопии темного поля // ФТТ.- 2003.- Т. 45, вып. 3.- С. 490-499.

16. Колотов О.С., Мусаев Т.Ш., Погожев В.А., Телеснин Р.В. Универсальная установка для изучения импульсного перемагничивания магнитных пленок в наносекундном диапазоне // ПТЭ.-1976.- № 5.- С. 243-245/
17. Колотов О.С., Погожев В.А. Импульсное перемагничивание пленок ферритов-гранатов // Вестник МГУ. Серия 3. Физика, Астрономия.-1991,- Т. 32, № 5.- С. 3-18.
18. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок.- М.: Наука, 1988.- 192 с.
19. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В., Климов А.А., Тайад Ф., Пресманес Л., Бонин К., Цай Ч.С., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с маглонной запрещенной зоной - магنونные кристаллы // Письма в ЖЭТФ.- 2003.- Т. 77, вып. 10.-С. 670-674.
20. Вашковский А.В., Локк Э.Г., Щеглов В.И. Влияние наведенной одноосной анизотропии на доменную структуру и фазовые переходы пленок железиттриевого граната// ФТТ.-1999.- Т. 41, вып. 11.- С. 2034-2041.
21. Беспятых Ю.И., Василевский В., Воронов В.И., Никитов С.А. Закрепление флюксонов в поле рассеяния доменной структуры одноосного ферромагнетика // Радиотехника и электроника.- 2003.- Т. 48,2.- С. 233-241.
22. Кандаурова Г.С., Свидерский А.Э. Процессы самоорганизации в многодоменных магнитных средах и формирование устойчивых динамических структур // ЖЭТФ.-1990.- Т. 97, вып. 4.- С. 1218-1230.
23. Кандаурова Г.С. Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов // УФН.- 2002.- Т. 172, № 10.- С. 1165-1187.
24. Дикштейн И.Е., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Чижик Е.С. Формирование рефлексивных доменных структур при монополярном и циклическом намагничивании одноосных магнитных пленок // ЖЭТФ.- 1991.- Т. 100, вып. 5.-С. 1606-1626.
25. Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Николаева Е.П., Николаев А.В. Динамическая самоорганизация и симметрия распределений магнитного момента в тонких пленках // ЖЭТФ.-1993.- Т. 103, вып. 1.- С. 213-233.
26. Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Пак Ч.М. Сценарии упорядочения и структура самоорганизующихся двумерных массивов доменов в тонких магнитных пленках // ЖЭТФ.-1995.- Т. 108, вып. 3.- С. 1031-1051.
27. Seshadri R., Westervelt R.M. Statistical mechanics of magnetic bubble arrays. I. Topology and thermalization. II. Observations of two-dimensional melting // Phys. Rev. B.-1992.- V. 46, № 9..p. 5142-5149 (I), 5150-5161 (II).
28. Hu J., Westervelt R.M. Collective transport in two-dimensional magnetic bubble arrays // Phys. Rev. B.-1995.- V. 51, № 23.- P. 17279-17282.
29. Соловьев М.М., Филиппов Б.Н. Поведение полосовой доменной структуры одноосной ферромагнитной пленки во внешнем периодическом поле // ФММ.- 2003.-Т. 96, № 2.-С. 74-77.
30. Колотое О.С., Погожев В.А., Телеснин Р.В. Методы и аппаратура для исследования импульсных свойств тонких магнитных пленок. - М.: Изд-во МГУ, 1970.-192 с.

31. Колотов О.С., Погожев В.А., Телеснин Р.В. Импульсное перемагничивание тонких магнитных пленок // УФН.-1974.- Т.113, вып.4.- С. 569-595.
32. Вонсовский С.В. Ферромагнетизм // Физическая энциклопедия. М., 1998.- Т. 5.- С. 294-299.
33. Magni A., Vertesy G. Dipolar-random-field Ising model: An application to garnet films // Phys. Rev. B.- 2000,- V. 61, № 5.- P. 3203-3206.
34. Поляков П.А. Теория диффузной доменной границы // Письма в ЖЭТФ.- 1994.- Т. 60, вып. 5.- С. 336-339..
35. Kosinski R.A. Chaotic motion of diffuse domain wall in magnetic garnets // Phys. Rev. B.-1994.- V. 50, N 7.- P. 6751-6755.
36. Звездин А.К., Попков А.Ф., Четкий М.В. Динамика солитонов в доменной границе ферромагнетика // УФН.-1992.- Т. 162, № 12.- С. 151-155.
37. Елеонский В.М., Кирова Н.Н., Кулагин Н.Е. О предельных скоростях и типах волн магнитного момента // ЖЭТФ.-1978.- Т. 74, вып. 5.- С. 1814-1820.
38. Иванов Б.А., Кулагин Н.Е. О предельной скорости и вынужденном движении доменной стенки ферромагнетика во внешнем поле, перпендикулярном оси легкого намагничивания // ЖЭТФ.-1997.- Т. 112, вып. 3.- С. 953-974.
39. Ходенков Г.Е. Устойчивость режима одномерного прецессионного движения доменной границы под действием постоянного магнитного поля в одноосном ферромагнетике.- ФТТ.- 2002.- Т. 44, вып. 1.- С. 106-111.
40. Ходенков Г.Е. Излучение спиновых волн при движении бловховской доменной границы в ферромагнетике с большой константой анизотропии // ФММ-1975.- Т. 39, вып. 3.- С. 466-472.
41. Лебедев Ю.Г., Раевский Е.И. Роль динамических эффектов при перемагничивании ЦМД-пленки // Новые магнитные материалы для микроэлектроники (тез. докл. VIII Всесоюзн. школы-семинара). Донецк, 1982.-С.121-122.
42. Мишин С.А., Рудашевский Е.Г. Перемагничивание тонкой магнитной пленки в сильном импульсном магнитном поле // ЖТФ.-1988.- Т. 58, вып. 9.- С. 1815-1817.

Подписано в печать 07.12.04. Объем 2,25 п. л. Тираж 100 экз.
Заказ № 2408.

Типография Издательства Мордовского университета
430000, г. Саранск, ул. Советская, 24

26856

it