

На правах рукописи

ГЕРАСИМОВ

Михаил Викторович

**КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕТЛИ
ГИСТЕРЕЗИСА ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ**

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

САРАНСК – 2002

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарева

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент М. В. Логунов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
В. Г. Клепарский

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
В. И. Щеглов

Ведущая организация: Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Защита состоится 28 марта 2002 г. в 13⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета К 002.125.01 во Фрязинском отделении Института радиотехники и электроники РАН по адресу:
141120, г. Фрязино Московской обл., пл. акад. Введенского, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ РАН.

Автореферат разослан 22 февраля 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 002.125.01
кандидат физико-математических наук



И. И. Чусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Петля магнитного гистерезиса – одна 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, в частности коэрцитивная сила H_c , связаны с такими фундаментальными параметрами материала, как намагниченность, анизотропия, константа обмена; с другой стороны – характеризуют совершенство материала. Доменные границы действуют как зонды дефектов и измеренное значение H_c доменной границы содержит информацию о распределении и количестве дефектов.

Интерес к исследованию параметров петли гистерезиса монокристаллических пленок ферритов-гранатов обусловлен их применением в качестве основы для различных устройств микроэлектроники и магнитооптики. Такие исследования ведутся, начиная с 1970-х годов (см., например, [1-7]). Благодаря совершенству кристаллической структуры и разнообразию физических свойств ферриты-гранаты являются объектом проверки теоретических концепций магнетизма твердого тела. Относительно результатов исследования петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов можно отметить, что основные усилия были направлены на изучение квазистатических петель [1,6], а в динамическом режиме – на изучение коэрцитивных свойств отдельных доменов и участков доменных границ [2]. Об актуальности проблемы говорит и тот факт, что модель петли гистерезиса, отражающая характерные особенности квазистатических экспериментальных петель пленок ферритов-гранатов, разработана недавно [8], а модели динамических петель отсутствуют.

В последнее время в связи с интересом к процессам формирования упорядоченных доменных структур [9-12], в частности двумерных решеток доменов [13-16], исследуются петли гистерезиса в гармоническом магнитном поле звуковых и ультразвуковых частот [10,17,18]: установлена взаимосвязь между формой петель гистерезиса и формированием спиральных доменных структур [10,17], обнаружена область неустойчивости динамических петель гистерезиса [18]. В то же время не ясно, изменение каких динамических механизмов перемагничивания приводит к трансформации петель гистерезиса, каковы необходимые условия для формирования упорядоченных доменных структур. Остаются открытыми и ряд методических вопросов, например соответствие результатов, получаемых при использовании различных методов измерения коэрцитивной силы. Такое по-

ложение 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 петель гистерезиса.

Цель работы: экспериментальное исследование механизмов перемагничивания пленок ферритов-гранатов в гармоническом магнитном поле в диапазоне частот поля $10^{-4} \div 10^5$ Гц. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Разработать методику записи петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов с одновременной регистрацией динамических доменных структур, соответствующих участкам петли гистерезиса, стробоскопическим методом.

2. Изучить зависимость параметров частных и предельных петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов от амплитуды гармонического магнитного поля в диапазоне частот $10^{-4} \div 10^5$ Гц.

3. Выяснить взаимосвязь процессов формирования динамических доменных структур в пленках ферритов-гранатов с параметрами петель гистерезиса.

Научная новизна представленных в диссертации результатов заключается в следующих положениях, выносимых на защиту:

1. Впервые реализована методика одновременной записи петель гистерезиса в диапазоне частот гармонического магнитного поля $10^{-4} \div 2 \cdot 10^5$ Гц и регистрации соответствующих участкам петель гистерезиса динамических доменных структур стробоскопическим методом с временным разрешением 0,8 мкс и регулируемой кратностью стробирования $K_{cm}=1, 2, 3 \dots$

2. Определены условия, при которых результаты измерения коэрцитивной силы, полученные методом осцилляции доменных границ, совпадают с результатами, полученными по полуширине квазистатической петли гистерезиса.

3. Установлены механизмы перемагничивания, приводящие к изменениям параметров петель гистерезиса при изменении амплитуды и частоты гармонического магнитного поля.

4. Установлено, что верхняя граница области формирования динамических спиральных доменов по частоте магнитного поля связана с преобразованиями структуры границ доменов. Определены условия формирования ряда упорядоченных доменных структур в виде двумерных решеток доменов в импульсном и гармоническом магнитных полях. Обнаружены новые конфигурации двумерных решеток доменов.

Практическая значимость работы заключается в создании установки для исследования петель гистерезиса и доменной структуры магнитооптических материалов в широком интервале амплитуд и частот гармонического магнитного поля. Полученные в работе результаты вносят существенный вклад в понимание механизмов перемагничивания, приводящих к видоизменению петель гистерезиса и формированию доменных структур в пленках ферритов-гранатов в гармоническом магнитном поле. Это расширяет возможности практического применения многодоменных магнитных пленок и создания на их основе новых технических устройств.

Апробация работы. Результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на XV Всероссийской, XVI и XVII Международных школах-семинарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва, 1996, 1998, 2000), Международной конференции «Проблемы и прикладные вопросы физики» (Саранск, 1997), IV Всероссийской конференции «Методы и средства измерений физических величин» (Н.Новгород, 1999), конференции «Структура и свойства твердых тел» (Н.Новгород, 1999), Международном симпозиуме по спиновым волнам (С-Петербург, 2000), Евро-азиатском симпозиуме «Прогресс в магнетизме» (Екатеринбург, 2001).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 184 страницы машинописного текста, включая 98 рисунков, 4 таблицы и 148 наименований цитируемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описана структура и содержание диссертации, приведены основные результаты работы.

Первая глава представляет собой обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию петель гистерезиса и доменной структуры пленок ферритов-гранатов, и анализ методов регистрации петель гистерезиса и коэрцитивной силы. В конце первой главы определены цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена методике исследования пленок ферритов-гранатов. Основное внимание уделено разработанной стробоскопической установке для исследования процессов перемагничивания в диапазоне частот гармонического магнитного поля $f = 10^{-4} \div 2 \cdot 10^5$ Гц.

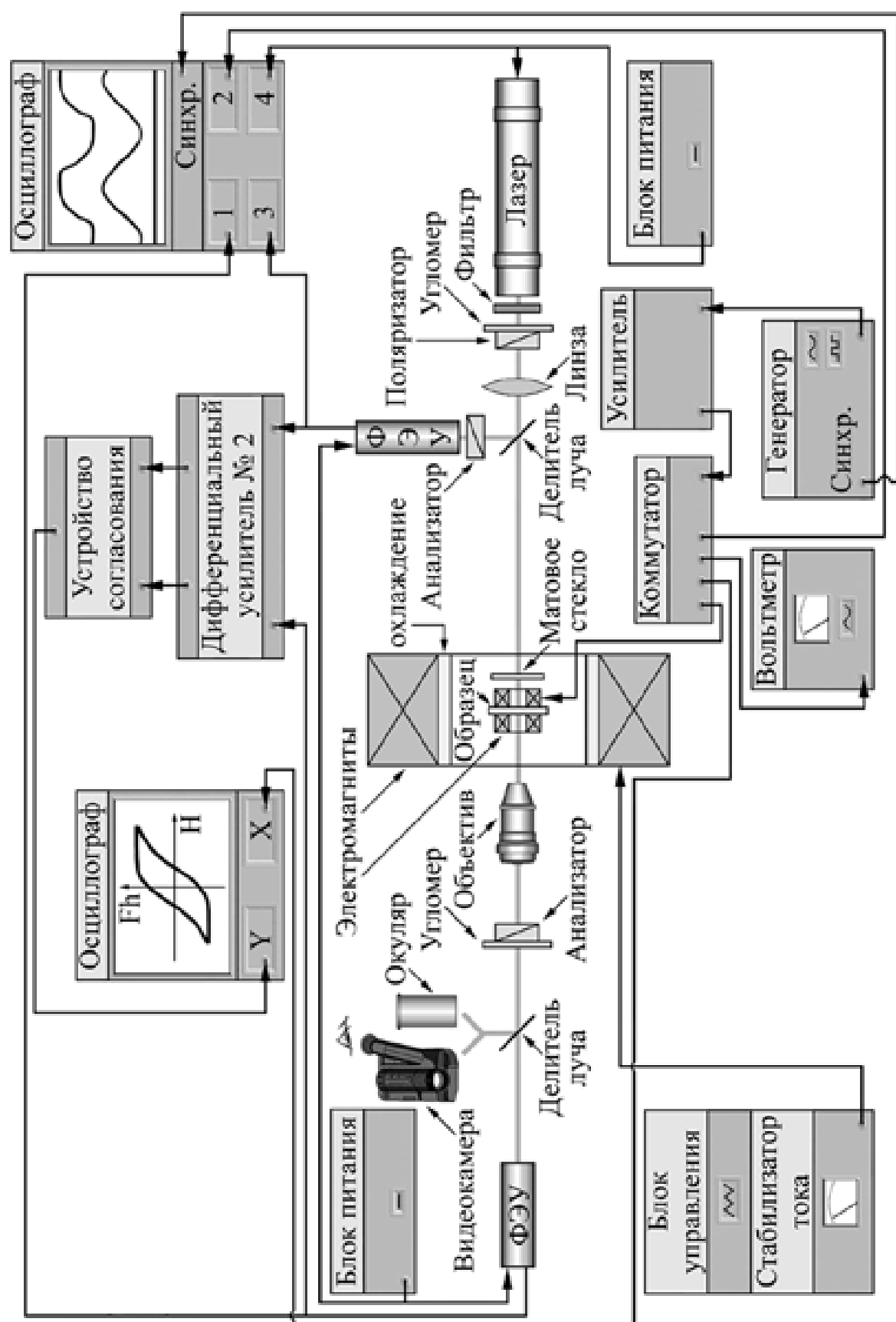


Рис. 1. Блок-схема установки при регистрации динамических петель гистерезиса.

Установка (рис. 1) работает с использованием эффекта Фарадея. В качестве источника подсветки использован гелий-неоновый лазер с поперечной СВЧ-накачкой. Одновременно с фотометрической регистрацией петель гистерезиса в установке осуществлена возможность визуального наблюдения доменной структуры исследуемого материала и записи ее изображения с помощью видеокамеры. Возможности гибкого изменения режима модуляции лазера позволили реализовать стробоскопический метод с временным разрешением 0,8 мкс и регулируемой кратностью стробирования $K_{cm}=1, 2, 3, \dots$ (рис. 2).

При $K_{cm}=1$ (рис. 2б) и сканировании импульса лазера по периоду поля изучали эволюцию доменных структур и делали вывод о повторяемости процессов перемагничивания. Выбор $K_{cm}>1$ (рис. 2в) 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 (рис. 2г). На одном видеокадре регистрировали наложение двух последовательных изображений динамических доменных структур.

Наряду с обычным методом регистрации динамических петель гистерезиса с экрана осциллографа, когда на одном кадре регистрируется последовательность петель для многих циклов перемагничивания, установка позволяет стробировать и записывать с помощью видеокамеры динамическую петлю гистерезиса для единичного цикла перемагничивания. Для этого импульс подсветки лазера синхронизировали по фазе и длительности с периодом гармонического магнитного поля (рис. 2д).

В зависимости от режима работы установки блок-схема (рис. 1) модифицируется. Например, при регистрации квазистатических петель гистерезиса для повышения чувствительности изменяется режим модуляции лазерного излучения, добавляются селективные усилители, дифференциальный усилитель постоянного тока и двухкоординатный самописец.

Проведена оптимизация параметров установки для исследования материалов, различающихся по величине фарадеевского вращения на $2\div 3$ порядка. Это позволило снизить искажения при записи петель гистерезиса в несколько раз. Для увеличения разрешающей способности установки до 5 нс в режиме высокоскоростной фотографии в качестве источника подсветки использовали лазер на красителе с внешней накачкой импульсным азотным лазером. Из-за ограничений по частоте следования импульсов (100 Гц) азотный лазер не может быть использован во всех режимах работы установки.

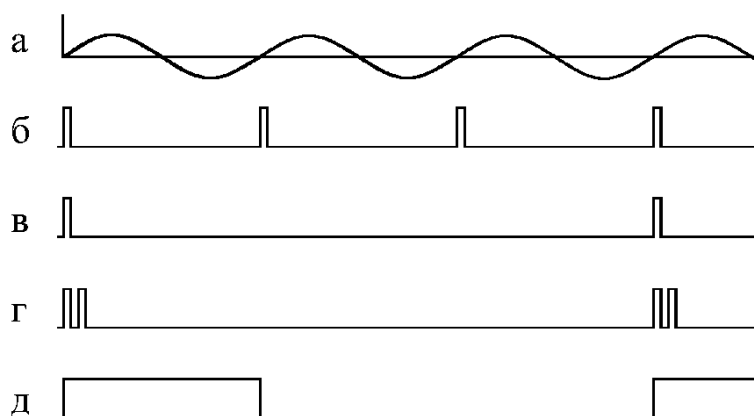


Рис. 2. Временные диаграммы работы источника гармонического магнитного поля (а) и импульсного лазера (б-д): в стробоскопическом режиме с $K_{cm}=1$ (б), в режиме высокоскоростной фотографии с $K_{cm}>1$ (в), при измерении скорости доменных границ (г), в режиме записи единичных динамических петель гистерезиса (д).

В третьей главе диссертации изложены результаты исследования квазистатических петель гистерезиса.

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 (рис. 3), а вид зависимости $H_c(H_m)$ существенно изменяется при повышении температуры с одновременным уменьшением коэрцитивной силы.

Регистрация петель гистерезиса пленок в широком частотном диапазоне магнитного поля позволила определить границы перехода от квазистатических к динамическим процессам перемагничивания. 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 (рис. 3в).

Обнаружено, что перегиб на температурной зависимости коэрцитивной силы $H_c(T)$ совпадает (по температуре) с перегибом на температурной зависимости относительного рассогласования кристаллографических параметров пленки феррита-граната и подложки $\Delta a/a_s(T)$ (рис. 4), что позволяет получить количественную характеристику взаимосвязи напряжений в кристалле с величиной H_c . Различие между величинами H_c , измеренными по полуширине предельной квазистатической петли гистерезиса ($f \sim 10^{-3}$ Гц) и методом осцилляции доменных границ ($f \sim 10^2$ Гц), наиболее выражено в области перегиба.

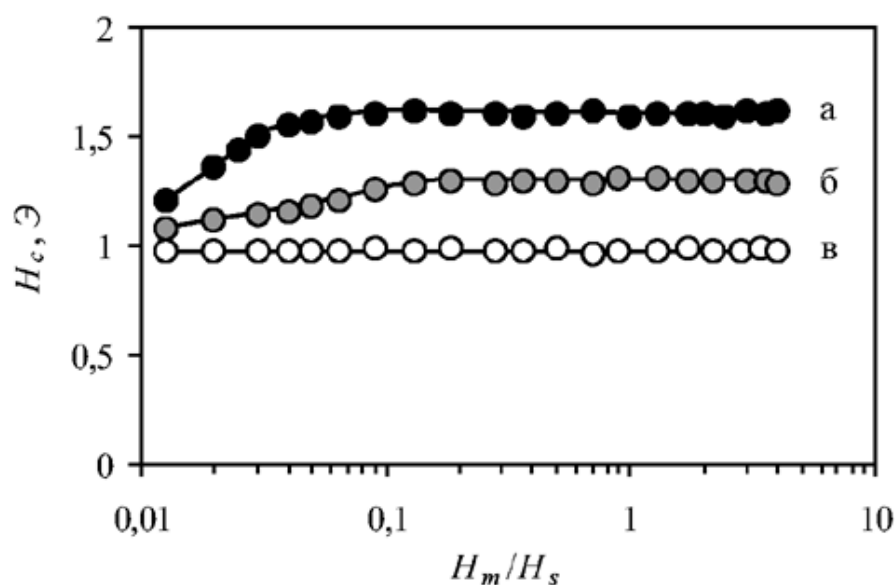


Рис. 3. Зависимости коэрцитивной силы H_c от максимальной напряженности магнитного поля H_m для температуры $T=25$ (а), 35 (б) и 45 °C (в).

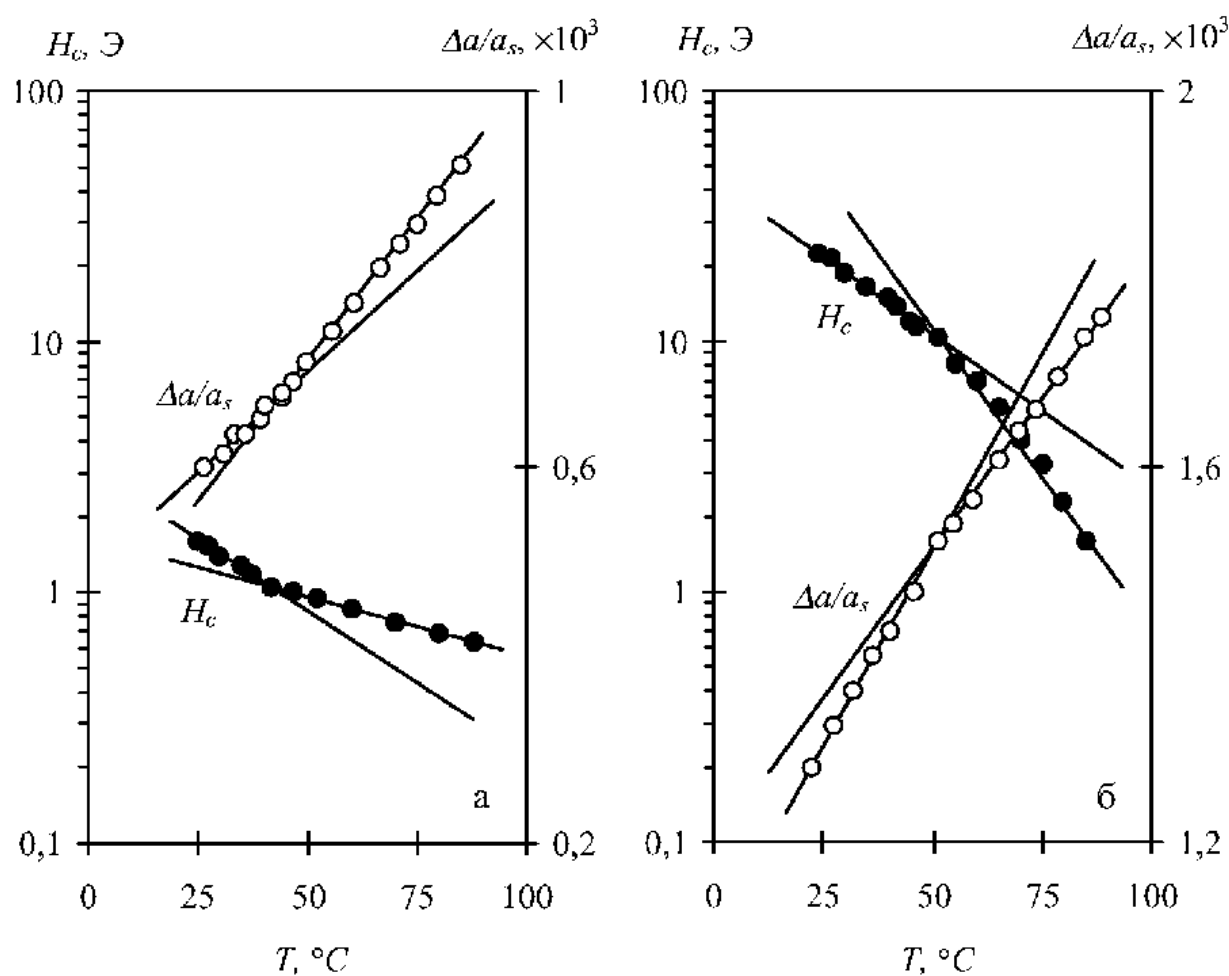


Рис. 4. Температурные зависимости коэрцитивной силы H_c и относительного рассогласования $\Delta a/a_s$ для пленок ферритов-гранатов с кристаллографической ориентацией (111) (а) и (210) (б).

Четвертая глава посвящена исследованию механизмов перемагничивания, приводящих к модификации динамических петель гистерезиса при изменении частоты и амплитуды гармонического магнитного поля в широком диапазоне частот и амплитуд поля. Разработанная методика позволила провести сопоставление вида доменных структур с конкретными участками петель гистерезиса (рис. 5).

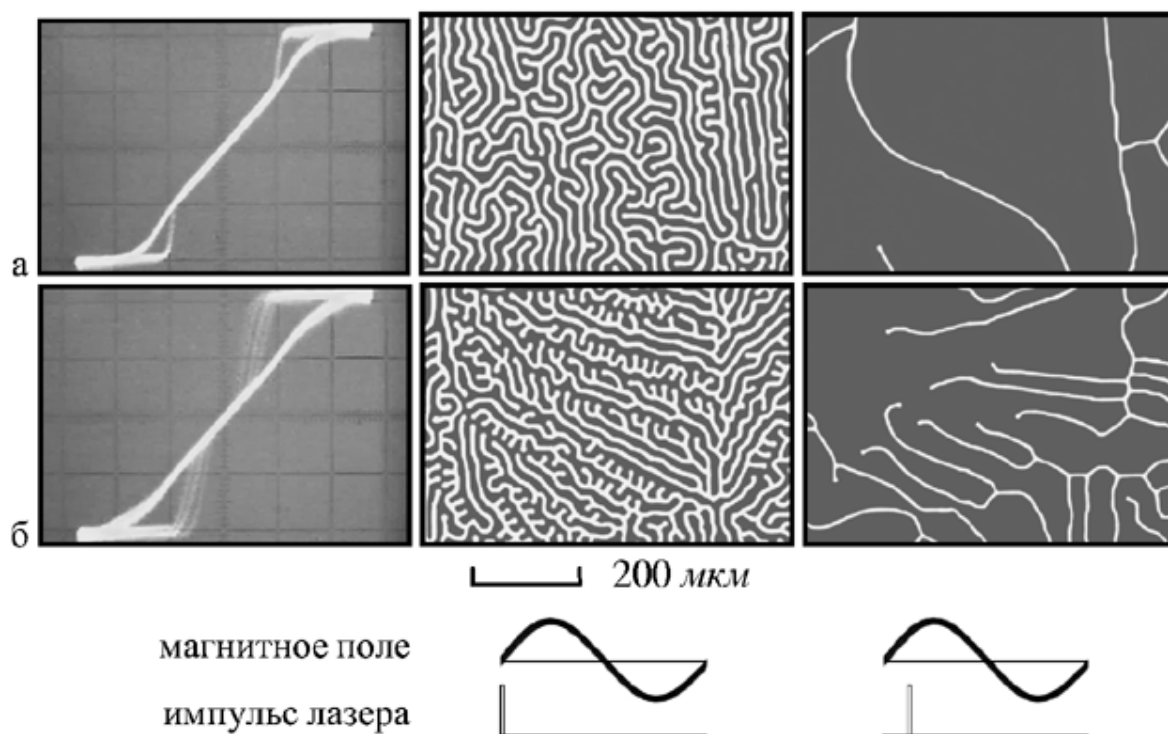


Рис. 5. Петли гистерезиса при амплитуде поля $H_m=76$ Э и частоте поля $f=100$ (а) и 500 Гц (б) и динамические доменные структуры, соответствующие фазам $\varphi=0^\circ$ и 45° гармонического магнитного поля. Фазе $\varphi=90^\circ$ соответствует монодоменное состояние.

Квазистатическая предельная петля гистерезиса пленки имеет вид, типичный для одноосных пленок ферритов-гранатов (незначительно отличающаяся от петли на рис. 5а). Влияние динамических механизмов перемагничивания пленок ферритов-гранатов: изменение условий зарождения доменов, достижение скорости насыщения V_s доменными границами и образование на них участков с различной эффективной массой – начинает сказываться в увеличении числа отростков на участках полосовых доменов, приводящих к более частому ветвлению доменов (рис. 5а, б) по сравнению со случаем равновесного формирования лабиринтной структуры уже в области частот гармонического поля $f \sim 100$ Гц, обычно считающейся квазистатической.

Трансформация петель гистерезиса в амплитудно-частотном $H_m f$ пространстве представлена в виде фазовой диаграммы (рис. 6). Сплошная

(справа) и штриховая (сверху) линии, ограничивающие диаграмму, показывают ограничение методики измерений. При малых амплитудах поля ($H_m < H_0$, где H_0 – поле коллапса ЦМД) петли являются частными симметричными (фаза 1). С увеличением амплитуды поля H_m имеет место переход к предельным симметричным петлям (фаза 2).

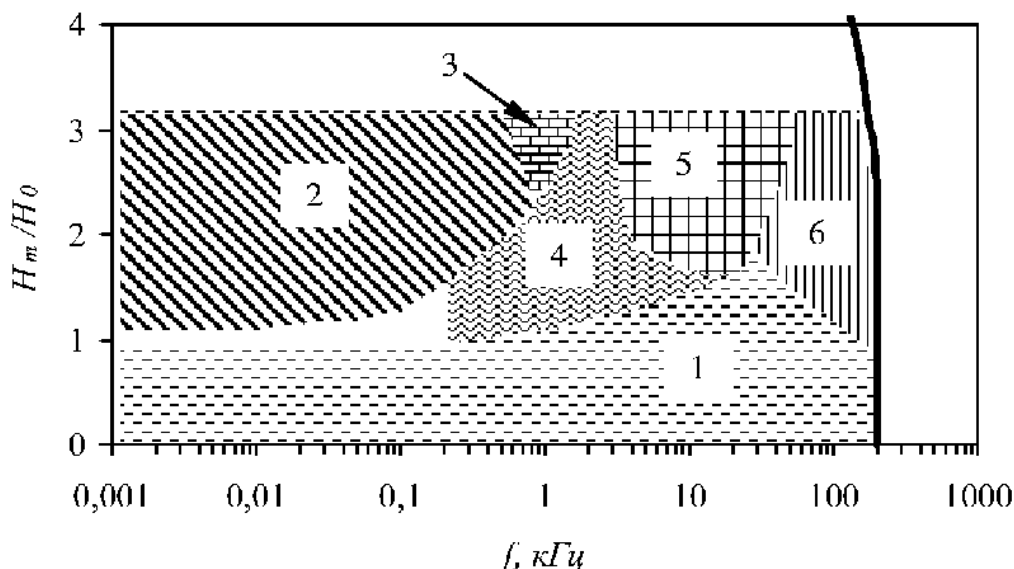


Рис. 6. Фазовая диаграмма петель гистерезиса при изменении амплитуды H_m и частоты f гармонического магнитного поля: 1 - частные симметричные; 2 - предельные; 3 - предельные прямоугольные; 4 - область неустойчивости; 5 - треугольные; 6 - эллиптические петли гистерезиса.

Ярким проявлением трансформации динамической петли гистерезиса с частотой поля является ее неустойчивость [18] (фаза 4) в виде вариации поля старта ΔH_{cm} (рис. 5б, 7а). Незаштрихованная область между фазами 1, 2 и 4 (рис. 6) образуется в результате ограничений, связанных с точностью измерений параметров петли гистерезиса в области неустойчивости. Фаза 3 является промежуточной между фазами 2 и 4.

Выявлено, что для петли гистерезиса в области неустойчивости механизмы перемagnичивания зависят от следующих основных параметров: скорости насыщения доменных границ V_s и среднего числа зародышей перемagnичивания n_{cp} на единицу площади образца. Зародыши перемagnичивания образуются в разных местах по площади образца и в разное время при повторении циклов перемagnичивания, что и является причиной неустойчивости петли.

Обнаружено, что время задержки зародышеобразования при перемagnичивании в гармоническом поле может превышать время задержки зародышеобразования в импульсном поле на два порядка величины. 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 и является основной причиной задержки появления зародышей перемагничивания на время $t_3 \sim 100$ мкс.

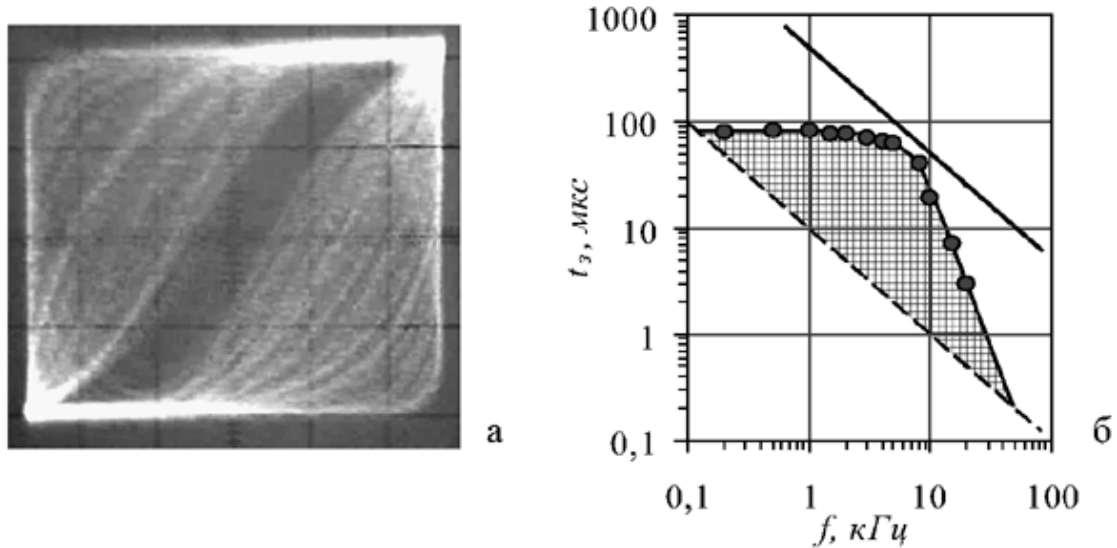


Рис. 7. Динамическая петля гистерезиса при амплитуде поля $H_m=76$ Э и частоте $f=5$ кГц (а) и частотная зависимость времени задержки зародышеобразования t_3 (б, заштрихованная область). Маркерами обозначена зависимость t_3^{max} от частоты поля f при амплитуде гармонического поля $H_m=76$ Э. Сплошной линии соответствует длительность полупериода поля $T/2$, а штриховой – 2% от длительности полупериода поля.

Максимальная нестабильность петли гистерезиса имеет место, когда максимальное время задержки зародышеобразования t_3 становится сравнимым с величиной полупериода поля $T/2$ (рис. 7б). Эта 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 треугольной асимметричной петле (фаза 5), когда состояние насыщения достигается только при одной полярности поля.

Введенный нами параметр $N=V_s n_{cp}/f_{cp}$ практически постоянен для серии образцов с параметрами V_s , n_{cp} и f_{cp} , различающимися на $1 \div 2$ порядка (рис. 8). Это позволяет установить взаимосвязь между параметрами образца и частотным диапазоном поля, в котором наблюдается нестабильность динамических петель гистерезиса: например, проводить оценку граничной частоты f_{cp} при известных V_s и n_{cp} .

В области 6 частные петли становятся эллиптическими из-за конечной скорости движения доменных границ и отставания их движения по фазе от изменения магнитного поля (фаза 6). Характерно, что в фазах 4-6 процессы

перемагничивания очень чувствительны к неоднородности магнитного поля и параметров пленок. Приложение небольшого поля смещения $H_{см} \ll H_m$ приводит к асимметрии или, наоборот, симметрирует петли гистерезиса в случае небольшой асимметрии параметров пленки или гармонического поля (рис. 9).

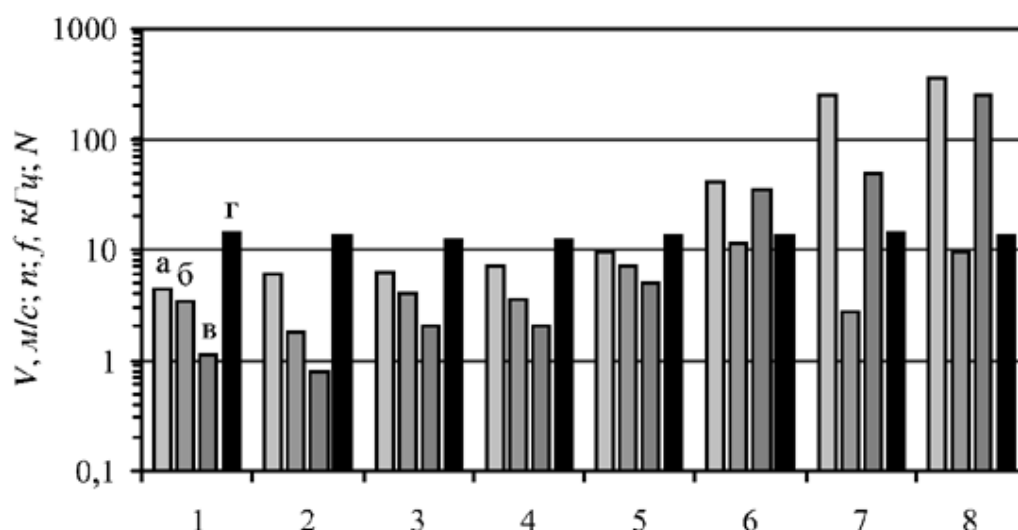


Рис. 8. Параметры серии образцов пленок ферритов-гранатов (№№ 1÷8):

- а) скорость насыщения доменных границ V_s ;
- б) среднее число зародышей перемагничивания n_{cp} ;
- в) граничная частота гармонического поля $f_{зр}$;
- г) параметр $N = V_s n_{cp} / f_{зр}$.

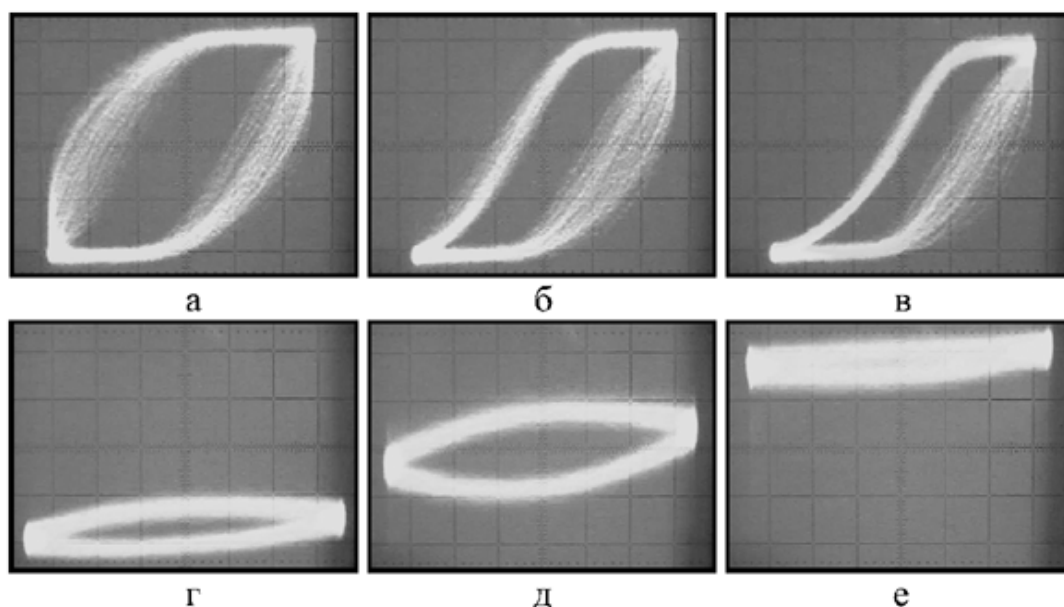


Рис. 9. Динамические петли гистерезиса при амплитуде гармонического магнитного поля $H_m = 70$ Э и частоте поля $f = 5$ кГц (а-в), при амплитуде поля $H_m = 120$ Э и частоте поля $f = 40$ кГц (г-е) в присутствии постоянного поля смещения $H_{см} = 0$ (а, г), -5 (б), -10 (в), $0,6$ (д) и $1,4$ Э (е).

В пятой главе приведены результаты исследования частных петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов, соответствующих процессам формирования статических и динамических доменных структур.

Для установления механизма формирования спиральных доменов исследовали начальную стадию процесса – образование спирального домена в результате расширения ЦМД при квазистатическом снижении поля смещения ниже поля эллиптической неустойчивости ЦМД. Процесс разворачивания/сворачивания S-домена (рис. 10б, в) регистрировали с помощью видеокамеры и одновременно записывали соответствующую этому процессу квазистатическую частную петлю гистерезиса (рис. 10а), 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. 10). При многократном воспроизведении вышеуказанных процессов петля гистерезиса изменяется незначительно с сохранением общих закономерностей: полуширина петли гистерезиса на порядок превышает коэрцитивную силу при перемагничивании лабиринтной доменной структуры (в частности, из-за гистерезиса перехода полосовой-цилиндрический домен), а петля гистерезиса является ступенчатой.

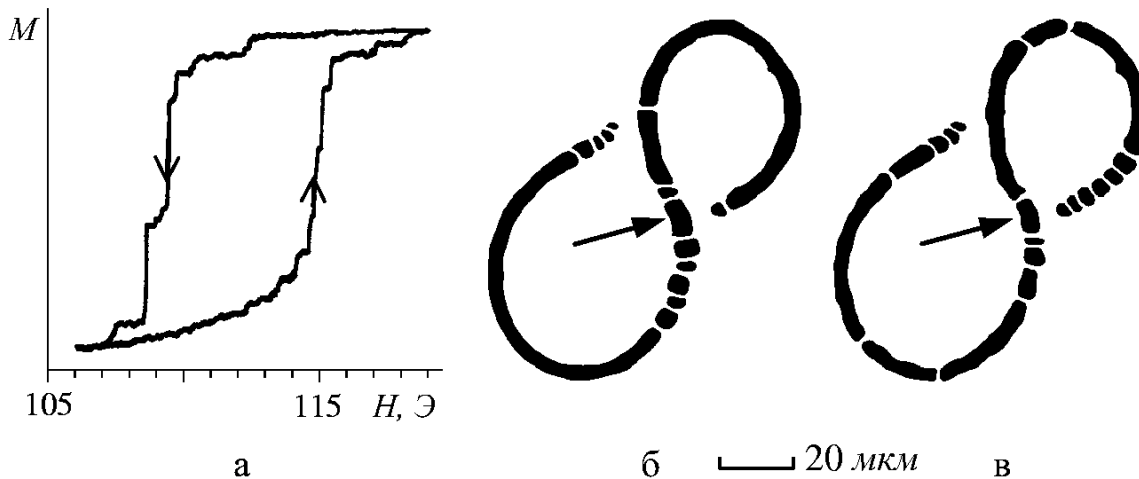


Рис. 10. Частная петля гистерезиса (а), соответствующая процессу разворачивания (б) и сворачивания (в) ядра спирального домена (в виде S-домена) при квазистатическом изменении поля смещения $H_{см}$ (стрелками указана исходная/конечная часть домена).

Закручивание полосового домена происходит во время скачков благодаря действию гиротропной силы на головку полосового домена. В результате исследования нескольких десятков образцов установлено, что параметрами образца, характеризующими возможность формирования спи-

ральных доменов, являются удельная гиротропная сила F_g/w_0 (гиротропная сила на единицу ширины домена) и площадь $S_{\text{цмд}}(H_2)$, занимаемая одним ЦМД в поле, близком к полю эллиптической неустойчивости H_2 .

Исследование эволюции спиральных доменов в течение периода гармонического магнитного поля стробоскопическим методом показало, что в течение периода поля форма спирального домена значительно изменяется (рис. 11). Характерно различие формы доменов одной и той же полярности при изменении напряженности гармонического магнитного поля в течение полупериода: нарастание изгибных искажений при уменьшении поля (рис. 11в) и формирование отростков при увеличении поля (рис. 11а). При смене полярности поля (следующем полупериоде поля) картина повторяется. Установлено, что верхняя граница области формирования динамических спиральных доменов по частоте поля f связана с преобразованиями структуры границ динамических доменов, образованием участков с различной эффективной массой доменных границ, что приводит к разрывам полосовых доменов.

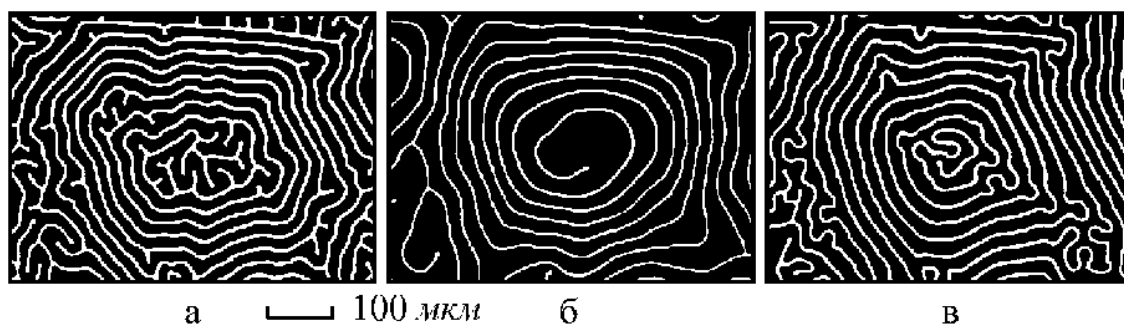


Рис. 11. Динамические доменные структуры, соответствующие различным фазам гармонического магнитного поля при частоте $f = 2$ кГц и амплитуде $H_m = 38$ Э: $\varphi = 30^\circ$ (а), 100° (б) и 135° (в).

Методом высокоскоростной фотографии мы выявили, что изгибная неустойчивость границы гигантского динамического домена, в результате которой образуется сеть полосовых доменов конечной длины (гребень), имеет место в области смены полярности поля (при фазе $\varphi = 180 \pm 30^\circ$). Возможность формирования гигантских динамических доменов определяется скоростью насыщения доменных границ и плотностью дефектов (центров зарождения доменов) в пленке.

В одной и той же пленке обнаружено формирование двумерных решеток доменов (рис. 12), принадлежащих к пяти пространственным группам ромбической и гексагональной сингоний: $P2$, $Pab2$, $P6$, $Cmm2$ и $Cmm6$, в результате приложения гармонического магнитного поля в течение нескольких секунд. Как и в [14], диапазон параметров гармонического магнитного поля, при которых возможно формирование двумерных структур,

расширялся при приложении небольшого поля смещения $H_{см} < H_0$. Примечательно то, что все разнообразие доменных структур, в том числе и новые конфигурации решеток доменов, нам удалось наблюдать под действием гармонического магнитного поля неизменной амплитуды $H_m \sim 2,5H_0$. Изменяли только один параметр внешнего воздействия – частоту поля f .

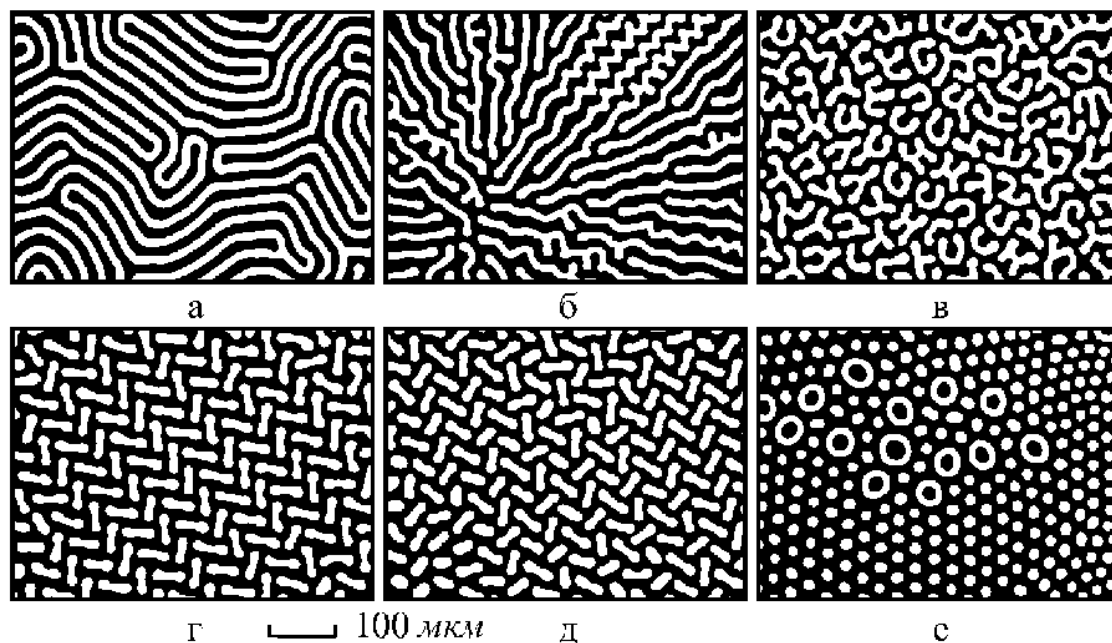


Рис. 12. Статические доменные структуры, сформированные на одном и том же участке образца пленки феррита-граната в результате воздействия гармоническим полем с амплитудой $H_m = 77$ Э различной частоты: $f = 0,1$ (а), 60 (б), 70 (в), 90 (г), 100 (д), 160 кГц (е). Поле смещения $H_{см} = 0$ (а) и 6 Э (б-е).

Динамические петли гистерезиса, соответствующие процессам формирования и преобразования двумерных решеток доменов, являются частными. Их характерным признаком является асимметричность, которая проявляется при приложении поля смещения (рис. 13б). При частоте гармонического поля ниже области формирования двумерных решеток доменов петля гистерезиса схлопывается в горизонтальную линию (рис. 13а), а образец намагничивается до насыщения. При частоте поля выше области формирования двумерных решеток доменов петля гистерезиса становится симметричной (рис. 13в).

Под действием гармонического поля частотой десятки и сотни герц формировалась лабиринтная доменная структура (рис. 12а). При увеличении частоты поля до нескольких килогерц и выше начинают играть существенную роль динамические эффекты: в течение полупериода поля пленка намагничивается до насыщения, а процесс размагничивания не успевает протекать квазистатически (рис. 12б); поле старта на петле гистерезиса уменьшается.

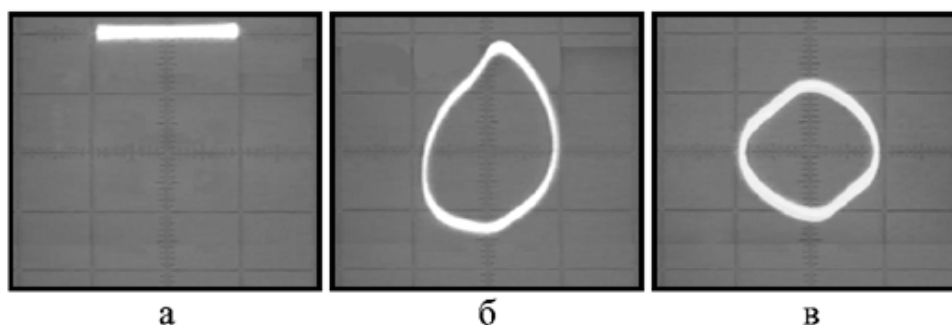


Рис. 13. Петли гистерезиса при амплитуде гармонического магнитного поля $H_m=77$ Э и частоте $f=50$ (а), 100 (б) и 150 кГц (в). Поле смещения $H_{см}=10$ Э.

При дальнейшем увеличении частоты поля процессы коллапсирования лабиринтных доменов прекращаются. Имеет место только сближение доменных границ с неравномерно распределенной эффективной массой. Оно сопровождается разрывами лабиринтных доменов, вследствие чего образуется неупорядоченный массив коротких лабиринтных доменов (рис. 12в). Увеличение частоты поля приводит к трансформации формы доменов в гантелевидную, а затем – в эллиптическую, цилиндрическую, кольцевую и сопровождается процессами упорядочения в расположении доменов (рис. 12г-е).

В низкочастотной области диапазона магнитных полей, соответствующих формированию двумерных решеток доменов, формируются решетки с симметрией $Pab2$ (рис. 12г); вблизи верхней (по частоте поля) границы диапазона – гексагональная решетка цилиндрических доменов с симметрией $Cmm6$. Наибольшее разнообразие упорядоченных двумерных решеток доменов имеет место в диапазоне частот поля – от 100 до 110 кГц, где они могут сосуществовать (рис. 12д). В этом диапазоне обнаружены новые конфигурации решеток с симметрией $P2$ (рис. 14а-в) и $Cmm2$ (рис. 14г).

Проведено сравнение условий образования решеток доменов в гармоническом и импульсном магнитных полях. Значительного влияния формы импульса поля на процессы формирования двумерных решеток доменов не выявлено: мы их формировали под действием импульсов поля с длительностью фронта 20 нс и более. Широкий диапазон изменения амплитуды импульса поля H_u , при которой происходит формирование двумерных решеток, связан с тем, что скорость движения доменных границ достигает насыщения в поле $H_u \ll H_0$ и остается практически постоянной вплоть до $H_u \sim 10H_0$.

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

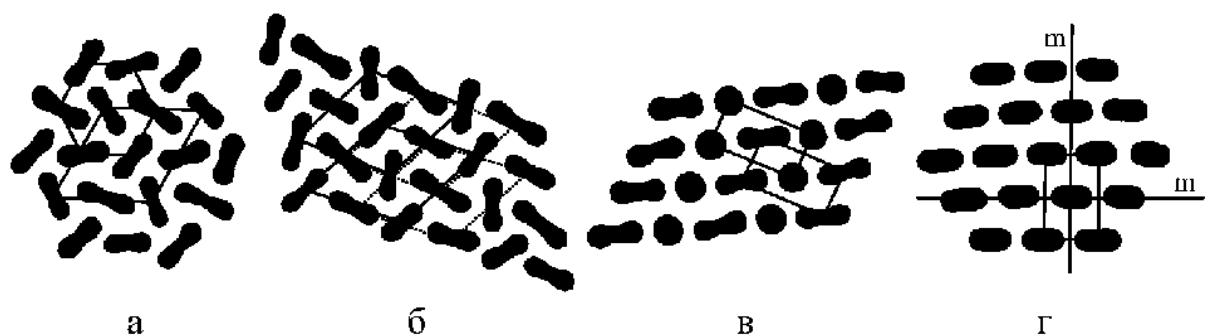


Рис. 14. Фрагменты статических доменных структур, сформированных под действием гармонического магнитного поля с амплитудой $H_m=77$ Э и частотой $f \sim 100$ кГц на одном и том же участке образца. Поле смещения $H_{см}=6$ Э. Отмечены элементарные ячейки и плоскости зеркального отражения (m).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана установка для исследования механизмов перемагничивания магнитооптических материалов в диапазоне частот гармонического магнитного поля $10^{-4} \div 2 \cdot 10^5$ Гц. Впервые установка позволяет одновременно с записью петель гистерезиса регистрировать соответствующие участкам петель динамические доменные структуры стробоскопическим методом с временным разрешением 0,8 мкс и кратностью стробирования $K_{см}=1, 2, 3 \dots$.

2. 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. Определены условия, при которых результаты измерения коэрцитивной силы, полученные методом осцилляции доменных границ, совпадают с результатами, полученными по полуширине квазистатической петли гистерезиса.

3. Обнаружено, что величина коэрцитивной силы пленок ферритов-гранатов зависит от максимальной напряженности магнитного поля, которое достигается в процессе перемагничивания образца. При наличии перегиба на зависимости коэрцитивной силы от температуры он совпадает (по температуре) с перегибом на зависимости относительного рассогласования кристаллографических параметров пленки феррита-граната и подложки от температуры.

4. Выяснены механизмы перемагничивания, приводящие к неустойчивости петли гистерезиса. Определены параметры магнитного материала, определяющие диапазон частот гармонического магнитного поля, в котором проявляется явление неустойчивости петли гистерезиса в виде varia-

ции поля старта.

5. Обнаружено, что процесс закручивания полосового домена в спиральный домен при квазистатическом изменении магнитного поля происходит ступенчато. Исследована эволюция динамических спиральных доменов в течение периода гармонического магнитного поля. Показано, что верхняя граница области формирования динамических спиральных доменов по частоте поля связана с преобразованиями структуры границ доменов.

6. Установлено, что эволюция гигантского динамического домена в течение периода гармонического магнитного поля ультразвуковой частоты сопровождается формированием гребенчатой границы домена только в области смены полярности поля.

7. Определены условия формирования ряда упорядоченных доменных структур в виде двумерных решеток доменов как в гармоническом, так и в импульсном магнитном поле. Показано, что формирование двумерных доменных структур имеет место под действием импульсов магнитного поля с длительностью фронта 20 нс и более. Обнаружены новые конфигурации решеток доменов, соответствующих группам симметрии $P2$ и C_{2v} .

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Логунов М.В., Герасимов М.В. Магнитооптическая установка на базе гелий-неонового лазера с СВЧ-накачкой // Новые магнитные материалы микроэлектроники. (Тез. докл. XV Всеросс. школы-сем.). М.: МГУ, 1996.- С. 505-506.

2. Герасимов М.В., Логунов М.В. Применение гелий-неоновых лазеров с поперечной СВЧ-накачкой в физическом эксперименте // Проблемы и прикладные вопросы физики. (Тез. докл. Междунар. конф.)- Саранск: МГПИ, 1997.- С. 154-155.

3. Логунов М.В., Герасимов М.В. Коэрцитивная сила пленок ферритов-гранатов // Новые магнитные материалы микроэлектроники. (Тез. докл. XVI Междунар. школы-сем.)- М.: МГУ, 1998.- Ч. II,- С.559-560.

4. Герасимов М.В., Логунов М.В. Оптимизация параметров магнитооптической установки // Сб. научн. трудов ученых Мордовского гос. ун-та.- Саранск.: НИИР, 1998.- Ч. III,- С. 5-9.

5. Логунов М.В., Герасимов М.В. Коэрцитивная сила монокристаллических пленок ферритов-гранатов в зависимости от максимальной напряженности магнитного поля // Письма в ЖТФ.- 1999.- Т. 25, вып. 22.- С. 39-43.

6. Логунов М.В., Герасимов М.В., Косинец Г.А., Моисеев Н.В. Установка для исследования процессов перемагничивания магнитооптических

материалов в диапазоне 0-200 кГц // Методы и средства измерений физических величин (Тез. докл. IV Всеросс. конф.)- Н.Новгород: НГТУ, 1999.- Ч. 1,- С. 37-38.

7. 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 ун-та. Серия: физика твердого тела.- 2000.- Вып. 1(3).- С. 24-30.

8. Логунов М.В., Герасимов М.В., Косинец Г.А., Моисеев Н.В. Изучение процессов формирования доменных структур в переменном магнитном поле стробоскопическим методом // Новые магнитные материалы микроэлектроники. (Сб. трудов XVII Междунар. школы-сем.)- М.: МГУ, 2000.- С. 874-876.

9. Батин В.В., Герасимов М.В., Кяшкин В.М., Логунов М.В. Коэрцитивная сила пленок ферритов-гранатов с различной кристаллографической ориентацией // Новые магнитные материалы микроэлектроники. (Сб. трудов XVII Междунар. школы-сем.)- М.: МГУ, 2000.- С. 771-773.

10. Logunov M.V., Gerasimov M.V. Dynamic and static hysteresis loops of monocrystal garnet films // EASTMAG-2001 Abstract Book.- Ekaterinburg.- 2001.- P. 281.

11. 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.

12. Логунов М.В., Герасимов М.В. Эволюция динамических спиральных доменов в течение периода переменного магнитного поля // ФТТ.- 2002.- Т. 44. (принята к печати).

Список цитируемой литературы

1. Craik D.J., Myers G. Bloch lines and hysteresis in uniaxial magnetic crystals // Phil. Mag.- 1975.- V. 31,- P. 489-502.

2. Barbara B., Jouve H., Magnin J. Jump probability and bubble dynamics // J. Magn. Magn. Mat.- 1980.- V. 20.- P. 212-215.

3. Pardavi-Horvath M. Coercivity of epitaxial magnetic garnet crystals // IEEE Trans. Magn.- 1985.- MAG-21,- P. 1694-1699.

4. Шишков А.Г., Ильичева Е.Н., Широкова Н.Б., Козлов В.И., Федюнин Ю.Н., Бажажин Г.А. Влияние температуры на закрепление доменных границ в феррит-гранатовых пленках // Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия.- 1988.- Т. 29, № 1.- С. 65-69.

5. Клепарский В.Г., Дымченко Н.П. Рентгенографическое выявление квазипериодических модуляций внутренних напряжений в пленках ферритов-гранатов // Микроэлектроника.- 1988.- Т. 17, вып. 2.- С. 182-184.

6. Григоренко А.Н., Мишин С.А., Рудашевский Е.Г. Квазистатическое взаимодействие с дефектами и коэрцитивность уединенной доменной стенки в неоднородном поле в пленках на основе ИЖГ // ЖТФ.- 1990.- Т. 60, вып. 2.- С. 113-122.
7. Pust L., Bertotti G., Tomas I., Vertesy G. Domain-wall coercivity in ferromagnetic systems with nonuniform local magnetic field // Phys. Rev. B.- 1996.- V. 54, № 17.- P. 12262-12271.
8. Magni A., Vertesy G. Dipolar-random-field Ising model: An application to garnet films // Phys. Rev. B.- 2000.- V. 61, № 5.- P. 3203-3206.
9. 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.
10. 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.
11. Гобов Ю.Л., Шматов Г.А. Спиральные и ветвящиеся домены в одноосных магнитных пленках в статическом магнитном поле // ФММ.- 1994.- Т. 78, № 1.- С. 39-50.
12. Четкин М.В., Ахуткина А.И., Шапаева Т.Б. Формирование спиральных доменов в пленках феррита-граната // Микроэлектроника.- 1998.- Т. 27, № 5.- С. 396-399.
13. 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).
14. 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.
15. 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(9).- С. 1031-1051.
16. Hu J., Westervelt R.M. Collective transport in two-dimensional magnetic bubble arrays // Phys. Rev. B.- 1995.- V. 51, № 23.- P. 17279-17282.
17. Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х. Эффект «мигающей» петли гистерезиса в ангерном состоянии пленок ферритов-гранатов // Письма в ЖТФ.- 1994.- Т. 20, вып. 21.- С. 24-28.
18. Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х. Устойчивые и неустойчивые динамические гистерезисные циклы в пленках ферритов-гранатов // ДАН.- 1999.- Т. 365, № 2.- С. 181-183.