

На правах рукописи

**РУСИНОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ДИНАМИЧЕСКАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ  
ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ И АНГЕРНОЕ СОСТОЯНИЕ  
ПЛЁНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ**

01.04.11 – Физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2001

Работа выполнена в Уральском государственном университете  
им. А.М.Горького на кафедре физики магнитных явлений  
и в отделе магнетизма твёрдых тел НИИ ФПМ.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Г.С.Кандаурова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Ю.И.Ялышев  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Ю.Л.Гобов

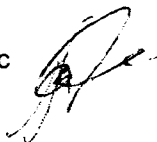
Ведущая организация: Институт физики металлов  
УрО РАН

Защита состоится « 28 » июня 2001 г.  
в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.286.01  
по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора физ.-  
мат. наук в Уральском государственном университете им.  
А.М.Горького (620083, г.Екатеринбург, К-83, пр.Ленина 51, комн.248).

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной  
библиотеке Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, снс



Н.В.Баранов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из актуальных проблем современной науки, является исследование процессов самоорганизации в открытых, неравновесных термодинамических системах, состоящих из хаотически движущихся и взаимодействующих элементов. Особый интерес представляют образующиеся в результате самоорганизации пространственно упорядоченные структуры в виде концентрических колец или спиралей в так называемых активных (автоволновых) средах, например, в химических растворах. Указанные процессы и исследуются в синергетике [1]. В [2,3] при изучении доменной структуры плёнок ферритов-гранатов в пространственно однородных переменных магнитных полях низкой частоты ( $10^2 - 10^4$  Гц) было обнаружено, что в ограниченной области амплитуд и частот поля в плёнках может возникнуть особое возбуждённое состояние (названное впоследствии [4] ангерным состоянием АС), характерными чертами которого являются: *самоорганизация* коллектива доменов и образование из хаоса упорядоченных, устойчивых динамических доменных структур (ДДС) в виде колец, спиралей и *самогенерация* квазипериодических процессов переходов хаос $\leftrightarrow$ порядок, появление $\leftrightarrow$ исчезновение упорядоченных ДДС. Эти процессы длятся так долго, как долго действует поле накачки. (Ранее [5,6] динамические структуры в виде колец и многорукавных вихрей наблюдались при импульсном перемагничивании локального участка плёнок ферритов-гранатов). В последнее время возрос интерес к явлению динамической самоорганизации магнитных доменов, к теоретическому и экспериментальному изучению свойств кольцевых и спиральных динамических доменов (см., например, [7 - 12]).

Впервые систематическое исследование упорядоченных ДДС и ангерного состояния в плёнках ферритов-гранатов проведено в [13]. Установлен целый ряд новых закономерностей в поведении ДДС и сформулировано необходимое условие реализации АС. Однако, общая картина поведения динамического массива магнитных доменов, существующих в плёнках при различных частотах и амплитудах переменного магнитного поля, не рассматривалась. Остались неизученными процессы формирования, эволюции и разрушения упорядоченных динамических доменных структур типа «ведущий центр» (ВЦ) и спиральных доменов (СД). Совершенно недостаточно исследовано влияние поля смещения на указанные ДДС.

Наконец надо отметить, что плёнки ферритов-гранатов являются важным магнитным материалом для техники [14]. Исследование АС и упорядоченных ДДС в этих плёнках не только способствует развитию физики магнитных доменов, но и создаёт основу для новых идей для расширения области практического применения многодоменных плёночных магнитных сред.

**Цель работы.** Основной целью диссертационной работы являлось исследование закономерностей в возникновении ангерных состояний и формировании различных ДДС плёнок ферритов гранатов (далее в автореферате плёнки) с перпендикулярной анизотропией в пространственно однородных, низкочастотных ( $10^1$ – $10^5$  Гц) гармонических магнитных полях.

Для достижения поставленной цели решались следующие конкретные задачи:

1. Построение и изучение полных динамических доменных фазовых диаграмм (ДФД) на плоскости частота-амплитуда переменного поля. Установление общих закономерностей в строении ДФД для различных плёночных образцов. Определение конфигурационных и динамических параметров выделенных доменных фаз. Рассмотрение фазовых переходов между ними.

2. С использованием метода микровидеосъёмки с последующей компьютерной обработкой массива экспериментальных результатов, изучение эволюции и взаимодействия между собой динамических спиральных доменов (СД) от момента их возникновения и до разрушения. Аналогичное исследование структур типа "ведущий центр" (ВЦ). Получение новых данных о механизмах формирования тех и других динамических структур.

3. Подробные исследования влияния постоянного поля смещения на реализацию ангерных состояний в плёнках. Установление закономерной связи между характеристиками упорядоченных ДДС (типа СД и ВЦ) и управляющими параметрами: частотой, амплитудой переменного поля и напряжённостью поля смещения.

**Научная новизна** работы заключается в следующих результатах, выносимых на защиту:

1. Впервые в широкой области частот  $f$  и амплитуд  $H_0$  переменного пространственно однородного, непрерывно действующего магнитного поля построены и рассмотрены полные динамические доменные фазовые диаграммы плёнок. В различных областях диаграмм наблюдаются совершенно разные картины доменов. На гра-

ницах этих областей реализуются как постепенные, так и скачкообразные фазовые переходы.

2. В ограниченной области частот переменного поля на высокоанизотропных плёнках обнаружено состояние *динамической однодоменности*. Удалось непосредственно наблюдать, как в этом состоянии образцы перестают откликаться на переменное поле, оставаясь намагниченными в одном направлении.

3. Впервые с использованием микровидео съёмки продемонстрирован характер движения отдельных спиралей в АС плёнки. Получены данные об эволюции индивидуальных СД за время жизни каждого из них (от момента появления до разрушения). Установлены некоторые особенности во взаимодействии спиральных доменов. Обнаружен новый механизм выхода системы из АС.

4. Обнаружено явление индуцированного постоянным магнитным полем смещения ангерного состояния многодоменной магнитной среды АС(и). Показано, что свойства спиралей в этом состоянии существенно отличаются от свойств ранее изученных СД. Введены и экспериментально оценены новые динамические параметры: время формирования и время разрушения спиралей.

5. Впервые построены трёхмерные области существования АС(и). Определены конфигурационные и динамические параметры СД во всех областях АС(и) в пространстве трёх управляющих параметров: частота переменного поля, его амплитуда и напряжённость постоянного поля смещения.

6. Впервые для характеристики благоприятных условий формирования динамических СД введён и разумно оправдан количественный параметр, связанный со скоростью движения доменных стенок и «рыхлостью» динамического массива доменов.

**Практическая значимость работы** заключается в существенном расширении представлений о природе, динамическом поведении, свойствах и эволюции различных ДДС в плёнках при воздействии на них переменных и постоянных подмагничивающих магнитных полей. Обнаружение новых свойств динамических доменов будет способствовать более глубокому пониманию процессов намагничивания, природы гистерезисных свойств и потерь энергии магнитных материалов в низкочастотных переменных магнитных полях. Определение вида доменных структур на фазовой диаграмме даёт возможность правильной интерпретации процессов перемагничивания в динамических условиях.

Если учесть, что плёнки являются важным и перспективным магнитным материалом [14], то новые результаты о динамических свойствах доменных структур, могут быть использованы при проектировании, создании и совершенствовании различных магнитооптических, оптоэлектронных и логических доменных устройств в микроэлектронике, прикладной магнитооптике и сенсорной технике. Особенно интересным с точки зрения практики может оказаться тот факт, что при определённых условиях накачки может реализовываться состояние динамической однодоменности.

**Апробация работы.** Результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на: Первой объединённой конференции по магнитоэлектронике (Москва, 1995); XV Всероссийской и XVI Международной школах-семинарах "Новые магнитные материалы микроэлектроники" (Москва, 1996, Москва, 1998, Москва, 2000), 3-м Международном симпозиуме по магнитным материалам ISPMM-95 (Сеул, 1995); 6-й Европейской конференции по магнитным материалам EMMA-95 (Вена, 1995); Симпозиуме по магнитооптической записи MORIS-96 (Нидерланды, 1996); Международной конференции по магнетизму ICM-97 (Австралия, 1997); Региональной 1-й и 2-й школах-семинарах по физике конденсированного состояния (Екатеринбург, 1997, 1998); Второй объединённой конференции по магнитоэлектронике (международная) ОКМЭ-2000 (Екатеринбург, 2000), Евро-Азиатском Симпозиуме "Прогресс в магнетизме" EASTMAG-2001 (Екатеринбург 2001).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 25 печатных работах и 3 электронных сообщениях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Она изложена на 174 страницах, включая 62 рисунка. Список цитированной литературы содержит 90 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы. Дана краткая характеристика структуры и содержания диссертации, полученных в ней результатов. Приводятся сведения об их научной новизне и практической значимости, перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор большого цикла теоретических и экспериментальных работ по избранной тематике. Рассмотрены основные представления о доменной структуре тонких одноосных кристаллов, динамике доменных границ и их внутренней структуре. Проведён обзор публикаций по импульсному перемагничиванию плёнок и низкочастотной динамике доменов. Так же рассмотрены попытки теоретического описания упорядоченных динамических структур в тонких магнитных плёнках.

**Вторая глава** посвящена описанию методик наблюдения и регистрации ДДС плёнок, методикам измерения и расчёта их основных параметров. Описана экспериментальная установка для изучения поведения доменной структуры в переменных и постоянных магнитных полях. Приведены характеристики исследуемых образцов.

Плёночные образцы с перпендикулярной анизотропией, имеющие различные параметры, помещались внутрь катушки, которая создавала пространственно-однородное переменное магнитное поле  $H_x = H_0 \sin 2\pi f t$ . Частота  $f$  и амплитуда поля  $H_0$  варьировались в диапазоне:  $f = 0,01 - 140$  кГц,  $H_0 = 0 - 130$  Э. Наблюдение различных ДДС проводилось при помощи магнитооптического эффекта Фарадея. Изучение эволюции наблюдаемых ДДС производилось с помощью методики микровидеосъёмки с последующей компьютерной обработкой данных.

**Третья глава** содержит изложение итогов исследования различных ДДС в ангерном состоянии плёнок. Описаны результаты экспериментов по определению различных параметров, динамического поведения, свойств и эволюции упорядоченных ДДС. Построены зависимости параметров доменных структур от частоты и амплитуды поля накачки. Приведены данные о влиянии постоянного подмагничивающего поля смещения на изучаемые структуры.

Первые наблюдения доменной структуры плёнок в низкочастотном ( $10^2 - 10^4$  Гц) переменном магнитном поле выявили ограниченные по частоте  $f$  и амплитуде  $H_0$  области существования устойчивых упорядоченных ДДС в виде кольцевых и спиральных доменов. Это области АС многодоменной магнитной среды. На границах областей реализуются переходы неупорядоченная (хаотическая) ДДС  $\leftrightarrow$  упорядоченная ДДС. Дальнейшие исследования плёнок показали большое разнообразие ДДС.

Однако испытания проводились на разных образцах и в не-большом интервале частот  $f$  и амплитуд  $H_0$  переменного поля. При этом рассматривались одна-две ( $H_0 - f$ ) области упорядоченных ДДС и не обращалось внимание на окружающее их ( $H_0 - f$ ) пространство, в частности, на области с неупорядоченными (хаотическими) ДДС. Последние, судя по остаточным картинам, после воздействия на образец переменным полем, могут быть в динамике существенно разными.

В данной работе, используя термин "динамические доменные фазы" для обозначения различных видов ДДС, построены и изучены полные динамические доменные фазовые диаграммы (ДФД) для целого ряда плёнок в указанных выше интервалах  $f$  и  $H_0$  переменного магнитного поля.

Часть полученных результатов продемонстрирована на примере плёнки  $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ , обладающей следующими параметрами: толщина  $L = 9,1$  мкм, период полосовых доменов в исходной лабиринтной структуре  $P_0 = 32$  мкм, намагничённость насыщения  $J_s = 7,5$  Гс, статическое поле насыщения  $H_s = 36$  Э, фактор качества  $Q = 53$  (параметры приведённых образцов взяты из [13]). Температура образца поддерживалась на уровне  $30^\circ\text{C}$ .

На рис.1 приведён большой фрагмент ДФД, построенной на основании непосредственных визуальных наблюдений ДДС. Левая часть диаграммы относится к малым частотам  $f = 0 - 0,5$  кГц, правая – к  $f = 1 - 80$  кГц. Заштрихованы по-разному однофазные или многофазные области, в которых вид и поведение ДДС чётко различались.

Выделены следующие области на ДФД. В (1) наблюдается лабиринтная ДДС типа "мозаики". Блоки мозаики состоят из параллельных полосовых доменов. С увеличением  $H_0$  блоки мозаики двигаются всё более и более интенсивно и в области (2), домены становятся неразличимыми. Заметна лишь мелькающая, расплывчатая картина хаотических ДДС. В (3) видны контрастные нитеобразные домены, закручивающиеся в спирали. Это область ангерного состояния (АС). Здесь образуются маловитковые (2 – 3 витка), короткоживущие (менее 1 сек.) динамические спиральные домены, размером до 1,5 мм и большим ядром (до 0,9 мм). При малых частотах  $f < 200$  Гц и амплитудах  $H_0 > H_s$  в области (4) видны белые или тёмные хаотически движущиеся нитевидные домены на фоне лабиринтной структуры. Наконец в области (5) визуально обнаруживается лишь серый фон.



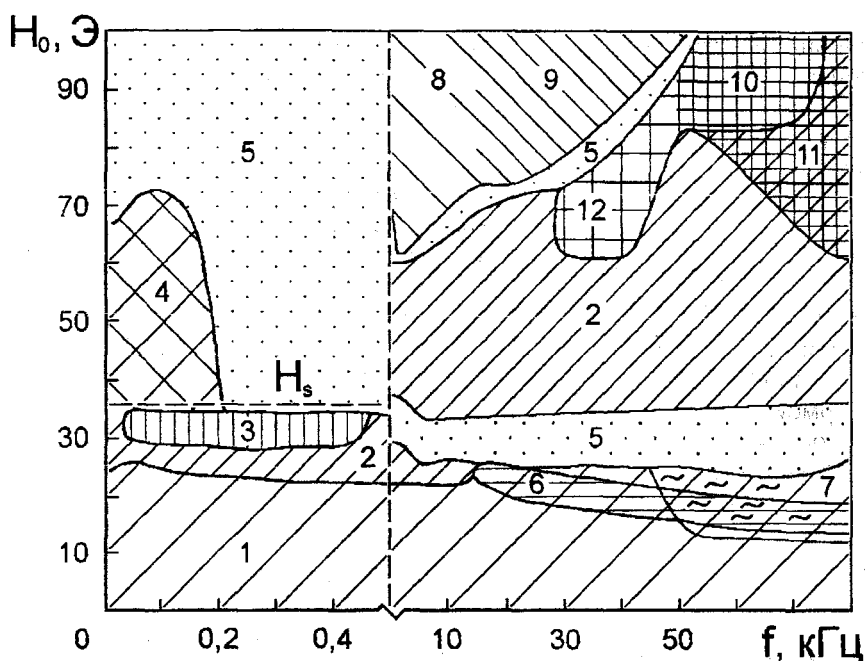


Рис.1. Динамическая доменная фазовая диаграмма.

Области доменного хаоса (2) и (5) имеются и в правой части ДФД. Однако подчеркнём, фотографирование ДДС в разных точках этих областей, с экспозицией ~ 1 мс, выявляет весьма разнообразные структуры. Так при  $f = 0,1 - 1$  кГц и  $H_0 > H_s$  видна радиальная (лучевая) ДДС – тонкие полосовые домены радиально исходят из некоторых точек в образце. Это центры возникновения доменных структур, связанные с локализованными дефектами. С ростом  $f$  лучевая ДДС трансформируется в систему изогнутых полосовых доменов с длинными боковыми отростками. Наблюдаемая картина таких "мохнатых" динамических доменов совершенно необычна и не имеет аналога в статике. При больших частотах формируется ДДС, похожая на известную статическую лабиринтную доменную структуру с короткими боковыми отростками.

Что касается других областей в правой части ДФД, то выделим следующие из них. Так (6) – двухфазная область, здесь сосуществуют полосовые домены с островками разнополярных решёток

цилиндрических магнитных доменов (ЦМД), источниками которых являются дефекты и края образца. При частотах от 40 кГц и вплоть до 140 кГц на блоках параллельных полосовых доменов возникают синусоидальные искажения, в итоге видна картина "бегущих волн" (область 7).

При увеличении частоты  $f$  от 5 до 70 кГц и сохранении амплитуды на уровне 90 Э наблюдается целый ряд фазовых переходов. В области (8) образец однородно намагничен, виден лишь тёмный фон. Это область "динамической однодоменности". Здесь в переменном поле образец перестаёт перемагничиваться. Затем скачком возникают огромные по размеру (в сравнении с исходной структурой) плавающие светлые пятна. Это "гигантская" ДДС с гребенчатой формой границ [13]. Область её существования обозначена как (9). С ростом  $f$  эта ДДС измельчается, домены двигаются всё более интенсивно и в области (5) становятся неразличимыми. Затем формируется однополярная подвижная динамическая решётка ЦМД. Она существует в области (10). При ещё больших  $f$  решётка ЦМД начинает разрушаться и появляются полосовые домены разной длины, которые постепенно с ростом  $f$  занимает всё большую площадь. Смешанное двухфазное состояние из этих структур имеет место в области (11). Здесь на краю образца "работают" источники, испускающие "островки" однополярных ЦМД. Особо выделим область (12), где формируется неподвижная решётка ЦМД из более крупных, чем в (10) доменов.

Подчеркнём, что фазовые диаграммы оказались очень сложными и разными для различных образцов. Они содержат как скачкообразные переходы между доменными фазами, так и плавные. Некоторые переходы происходят с большим гистерезисом. Однако общим для рассмотренных ДФД образцов является следующее: до амплитуд порядка  $0,7H_s$  при любых рассматриваемых частотах видна подвижная лабиринтная ДДС; в области малых частот  $f = 10 \text{--} 100 \text{ Гц}$  и  $H_0 = H_s \text{--} 2H_s$  наблюдаются радиальные структуры; при амплитудах порядка  $0,5H_s$  в интервале частот от 2 до 100 кГц "работают" источники динамических доменов; бегущие синусоидальные волны на границах полосовых доменов хорошо видны в интервалах частот  $f = 50 \text{--} 140 \text{ кГц}$  и амплитуд  $H_0 = (0,4 \text{--} 1,2)H_s$ ; динамическая однодоменность реализуется при частотах  $f \sim 1 \text{ кГц}$  ( $H_0 \sim 2,5H_s$ ) и при увеличении частоты, при фиксированной амплитуде, переходит в фазу, где возникают гигантские ДДС с гребенчатой формой границ; решётки ЦМД наблюдаются при  $f = 20 \text{--} 100 \text{ кГц}$  и  $H_0 = 2H_s \text{--} 3H_s$ .

Несомненно, каждая ДФД образца даёт более полную картину состояний динамической системы магнитных доменов, чем отдельные её области. Экспериментальное и теоретическое изучение ДФД с привлечением высокоскоростной съёмки и компьютерной техники является задачей дальнейших исследований. Можно ожидать, что динамические фазовые диаграммы станут столь же необходимыми и полезными в физике динамических магнитных доменов, как диаграммы состояний сплавов в физике металлов или диаграммы магнитных фазовых переходов в физике магнитных (атомных) структур.

На основании анализа нескольких сот кадров микровидеофильма, для образца плёнки  $(\text{YLuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  с исходной лабиринтной доменной структурой (рис.2а) и параметрами:  $L = 9,5$  мкм,  $P_0 = 33$  мкм,  $J_s = 11$  Гс,  $H_g = 50$  Э,  $Q = 96$ , построены общие картины изменения динамических и геометрических параметров спиральных доменов (СД) в области АС (рис.2б). В этой области при фиксированных  $f$  и  $H_0$  непрерывно возникают, "живут" и разрушаются динамические СД. На рис.2в,г показаны картины ДДС возникающих в одном и том же месте образца через некоторый промежуток времени при неизменных внешних условиях. Выявлены определённые закономерности. Например, движение СД похоже на движение броуновской частицы, их траектории представляют собой ломаные линии. Образец траектории одного из СД показан на рис.3а. Внешний диаметр  $D$  спиралей в течение их времени жизни  $T_g$  так же меняется скачками (рис.3б). Установлены зависимости  $T_g$  – среднего времени жизни СД от амплитуды  $H_0$  и частоты  $f$  переменного поля (рис.3в). При переходе от нижней границы ( $H_0 - f$ ) области АС к верхней (т.е. при повышении  $H_0$ ), время  $T_g$  монотонно растёт, увеличиваясь в несколько раз. В нижней части области существования СД при  $H_0 = 40$  Э образуется большое количество мелких, короткоживущих спиралей, а при  $H_0 = 46$  Э возникают редкие, крупные с  $N \sim 25$  витков и размером  $D \sim 2,5$  мкм, долгоживущие СД (время жизни некоторых достигает 5–6 с). Наиболее долгоживущие СД, рассматриваемого типа, наблюдаются в левой-верхней части ( $H_0 - f$ ) области их существования (т.е. при наибольших  $H_0$  и наименьших  $f$ , рис.2б).

На рис.3г показана, усреднённая по многим спиральям, зависимость времени ожидания  $T_w$  от  $H_0$  для трёх частот. Время ожидания  $T_w$  – это время между исчезновением последнего СД и появлением нового первого СД на контролируемом участке образца (здесь  $6 \text{ мм}^2$ ).

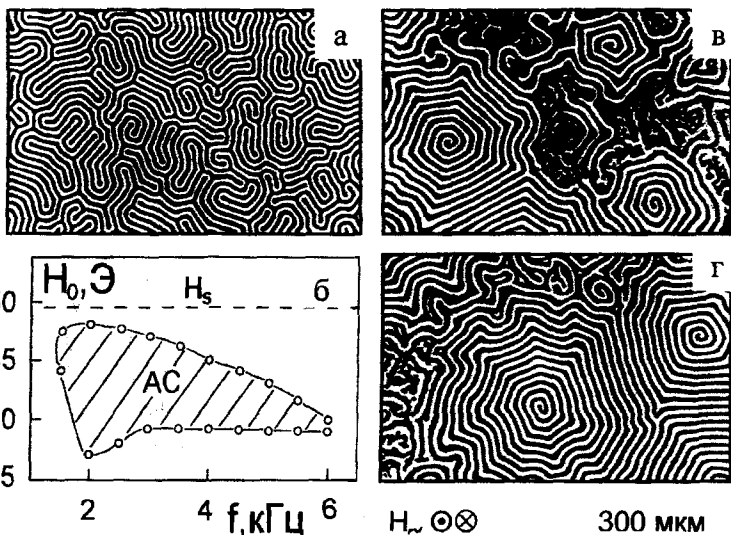


Рис.2.

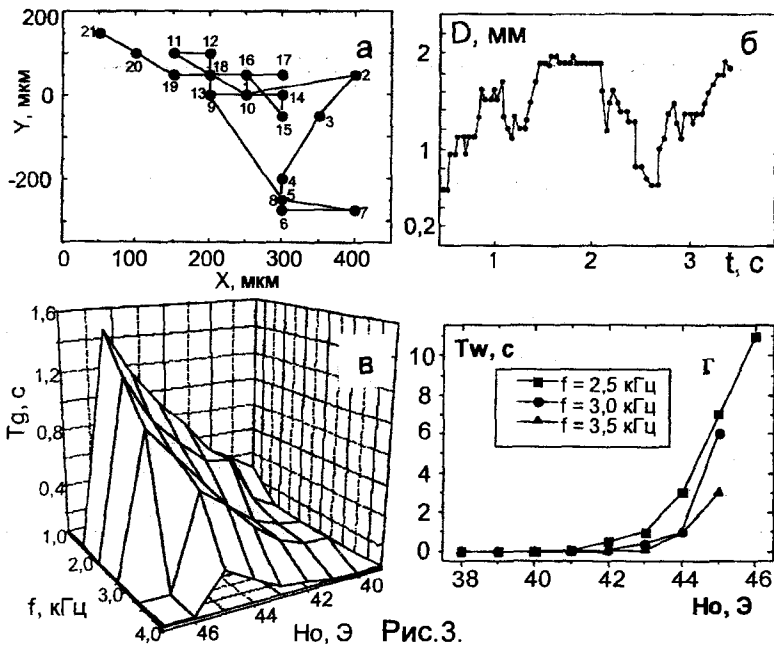


Рис.3.

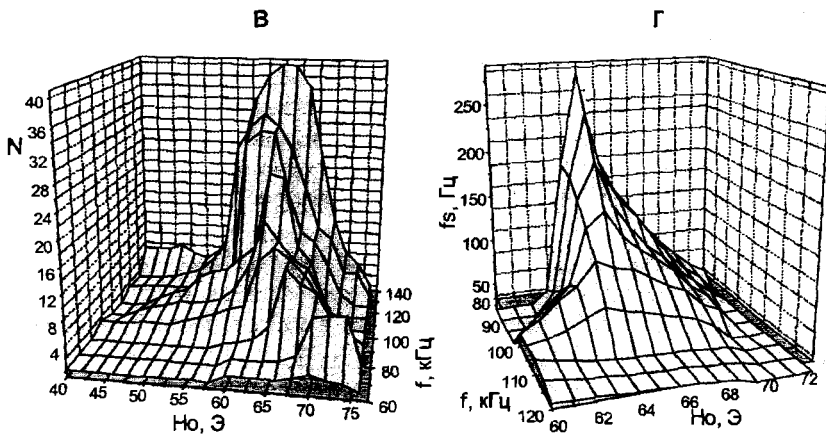
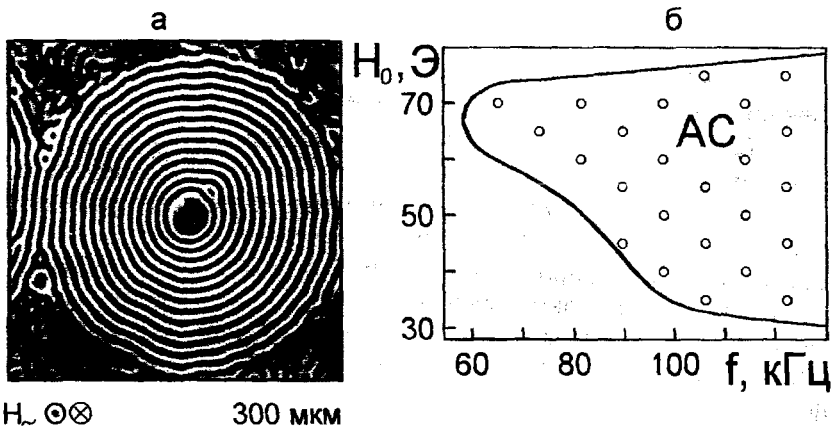


Рис.4. Динамическая доменная структура типа "ведущий центр" (а) и его область существования (б). Зависимости числа кольцевых доменов (в) и частоты рождения колец (г) у ВЦ от амплитуды  $H_0$  и частоты  $f$  переменного поля  $H_0$ .

Видно, что в интервале  $H_0 = 40 - 43$  Э время  $T_w$  очень мало, а при дальнейшем увеличении  $H_0$  и приближении к верхней границе области АС  $T_w$  резко растёт, превышая в некоторых случаях 10 с. Время ожидания  $T_w$  появления СД растёт гораздо резче, чем  $T_g$ . Если при  $H_0 = 46$  Э спирали крупные и долгоживущие, то при  $H_0 = 46,5$  Э они уже не наблюдаются, т.е. либо их  $T_g$  намного меньше временного расстояния между кадрами (40 мс), либо в этом поле СД не образуются вовсе. Этот результат заслуживает особого внимания, так как указывает на новый механизм разрушения АС. (Ранее [13] отмечалось, что выход из АС происходит путём уменьшения времени жизни СД до нуля.) Можно, по-видимому, полагать, что при приближении к верхней границе области АС время  $T_w$  стремится к бесконечности.

На одном из образцов, фазовая диаграмма которого приведена на рис.1, алмазным индентором были нанесены искусственные дефекты. При определённых значениях  $f$  и  $H_0$  дефекты становятся центрами-источниками ДДС типа "ведущего центра" (ВЦ). Последний представляет из себя систему концентрических кольцевых динамических доменов возникающих с частотой  $f_s$  на локальном дефекте в центре и распространяющихся от него к периферии (рис.4а). Область существования данного АС показана на рис.4б. Геометрические размеры ВЦ существенно зависят от условий внешней энергетической накачки. Зависимость числа колец  $N$  от  $f$  и  $H_0$  представлена на рис.4в. Покадровый просмотр микровидеофильма позволил определить частоту рождения колец  $f_s$  и построить зависимость  $f_s(f, H_0)$  (рис.4г). Максимальное значение  $f_s = 280$  Гц наблюдается при  $f = 80$  кГц и  $H_0 = 65$  Э.

Далеко не во всех образцах наблюдается АС и однозначного критерия его существования на сегодняшний день нет. При проведении исследований выяснилось, что большие поля смещения  $H_b$ , сравнимые или в несколько раз превышающие амплитуду переменного поля  $H_0$ , могут вызывать формирование СД, поведение которых свидетельствует о возникновении АС, даже в тех образцах, в которых в отсутствие  $H_b$  АС не реализуется. Мы назвали его *индуцированным ангармоническим состоянием* АС(и). На рис.5 приведены трёхмерные ( $H_0$ - $f$ - $H_b$ ) области существования АС(и) для образца двумерная область АС которого приведена на рис.2б.

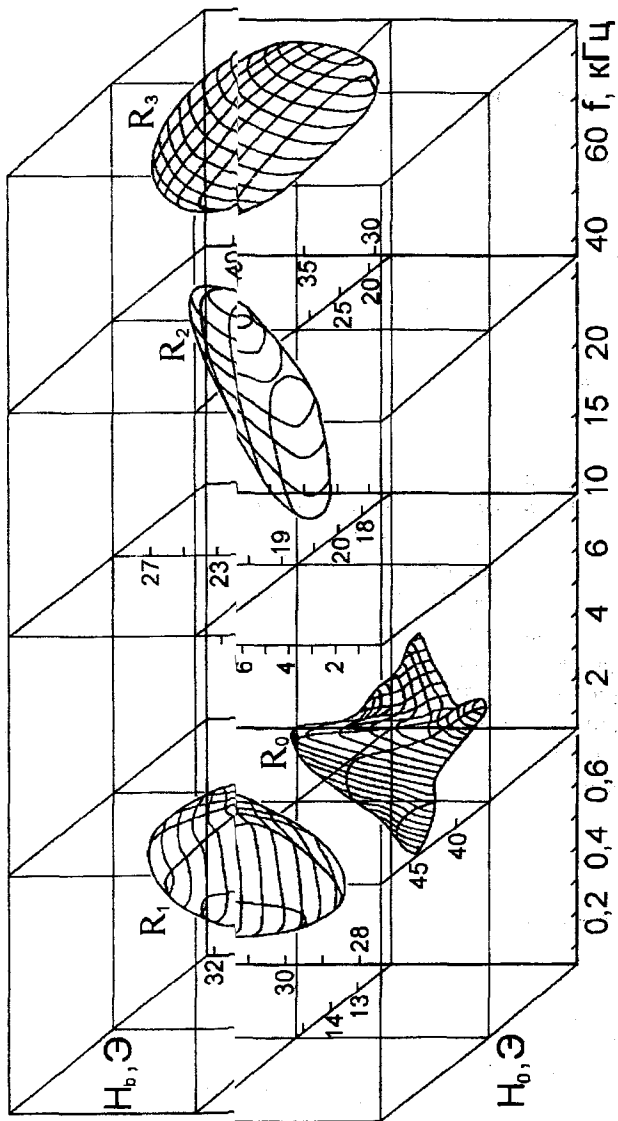


Рис. 5. Трёхмерная диаграмма областей существования СД.

Окружены эти области неупорядоченными структурами, а внутри областей реализуются переходы хаос←порядок, возникают СД, "живут" некоторое время  $T_g$ , исчезают, снова формируются и так до тех пор, пока действует поле накачки и остаётся постоянной температура. Эти области, обозначенные на рис.5 как  $R_0, R_1, R_2, R_3$ , значительно разнесены по шкале частот. В случае отрицательных полей смещения ( $-H_b$ ) наблюдается картина подобная рис.5, но зеркально отражённая относительно плоскости  $H_b = 0$ . Таким образом, с учётом обоих знаков поля  $H_b$ , имеем для данного образца семь областей АС. Только в одной из них –  $R_0$  АС существует в отсутствие поля смещения, в других –  $R_1, R_2$  и  $R_3$  лишь в присутствии поля  $H_b$ . Поэтому первое естественно назвать основным АС, а остальные – индуцированными.

По конфигурации и динамическому поведению СД в областях  $R_0, R_1, R_2, R_3$  весьма различны. На рис.6а,б,в показаны фотографии СД, типичных для областей  $R_1, R_2, R_3$  соответственно. Примеры СД из области  $R_0$  приведены на рис.2в,г. Отметим, что при резком выключении переменного поля СД сохраняются в постоянном поле  $H_b$ , а с изменением этого поля ведут себя как обычные статические СД. Таким образом, напряжённость постоянного поля смещения  $H_b$  наряду с частотой и амплитудой переменного поля является третьим управляющим параметром АС многодоменных магнитных плёнок.

Анализируя результаты наблюдений можно сделать некоторые выводы об условиях формирования СД. Известно [3,13], что СД существуют в полях  $(0,7 - 0,9)H_s$ . На движущуюся со скоростью  $V$  "головку" полосового домена действует гиротропная сила  $F_g = J_s[G \cdot V]/\gamma$ , где  $G$  результирующий гиротропный вектор,  $\gamma$  гиромагнитное отношение [15]. Величина  $G$  зависит от внутренней структуры доменных границ. Можно предположить, что СД формируются именно из "жёстких" ЦМД содержащих блоховские линии и имеющие большое значение вектора  $G$ . Такой домен находится в метастабильном состоянии и при снижении поля начинает переходить в полосовой домен раньше, чем "мягкие" ЦМД.

Если частота  $f$  поля не слишком велика, то разумно допустить, что стенка следует за полем ( $x(t) \sim H(t)$ ), а изменение положения доменной стенки  $dx/dt$ , т.е. скорость стенки, отслеживает изменение магнитного поля  $dH/dt = V_0 \cos 2\pi ft$ . Максимальные скорости стенок, а значит и максимальные значения  $F_g$ , соответствуют моментам прохода напряжённости поля через нуль.



Однако для формирования СД это самая неблагоприятная ситуация, т.к. в этот момент в образце находится плотный массив доменов. Таким образом, для формирования многовиткового СД необходимы достаточно большая скорость  $V$  и достаточно разрежённое, "рыхлое" доменное окружение. Для количественной характеристики разрежённости ДДС возьмём её эффективный период  $P$  и будем полагать, что при изменении поля величина  $P$  в динамике изменяется так же, как при квазистатическом намагничивании [16].

В качестве количественного параметра, который бы отражал условия благоприятные для формирования СД, введена величина  $\beta = (P/P_0) \cdot (V/V_0)$ . Изменения величин  $H/H_s$ ,  $P/P_0$ ,  $V/V_0$  и  $\beta$  за один период поля проиллюстрированы на рис.7 ( $\tau$  – время приведённое к периоду переменного поля). Максимальное значение  $\beta_{\max} = 1,7$  указывает на наиболее благоприятные условия для формирования СД. Полагали, что эти условия сохраняются и в окрестности  $\beta_{\max}$ , например, при  $\beta = 1,5 - 1,7$ . Исходя из этого, был определён интервал полей благоприятный для формирования СД, который согласуются с нашими экспериментальными данными и теоретическими расчётами [11]. Если  $\beta < 1,5$ , то в результате увеличения плотности доменного массива в образце, условия для формирования СД становятся неблагоприятными.

На сегодняшний день разработана теория статических спиралей [11], но нет теории динамических СД. В работе [7] проведён расчёт лишь для малых отклонений векторов намагниченности от однородного состояния, т.е. фактически показана возможность существования в переменном поле устойчивых спиральных малоамплитудных волн намагниченности (спиральных солитонов), а не спиральных доменов.

В конце главы предлагаются возможные механизмы возникновения упорядоченных ДДС типа ВЦ. Ранее предполагалось, что кольца ВЦ образуются из растущего ЦМД, путём образования внутри его другого ЦМД с противоположной намагниченностью. При подробном исследовании эволюции ДДС типа ВЦ было обнаружено, что иногда вместо кольцевого домена на дефекте формируется спиральный домен. При исследовании всей области существования ВЦ выяснилось, что спиральные структуры на дефекте могут образовываться при любых сочетаниях частоты и амплитуды поля. Таким образом, можно предположить, что в некоторых образцах и на некоторых типах дефектов ВЦ может возникать путём образования СД имеющего 2 – 3 витка с последующим смыканием витков спирали в кольцевые домены, процесс происходит за время менее 0,04 с.

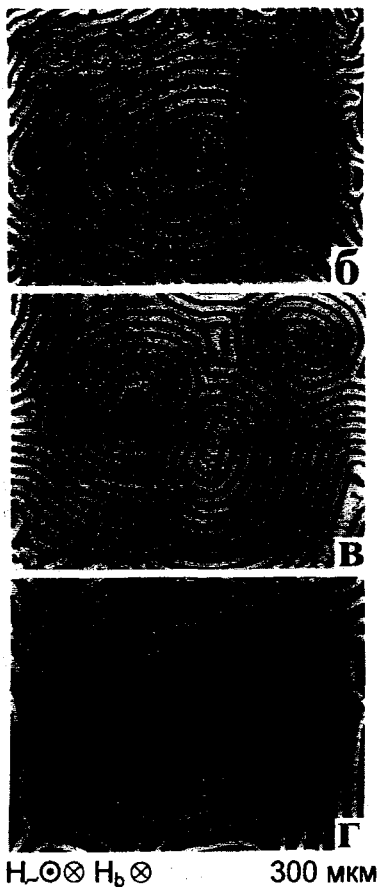


Рис.6. Спиральные динамические домены в индуцированных ангерных состояниях.

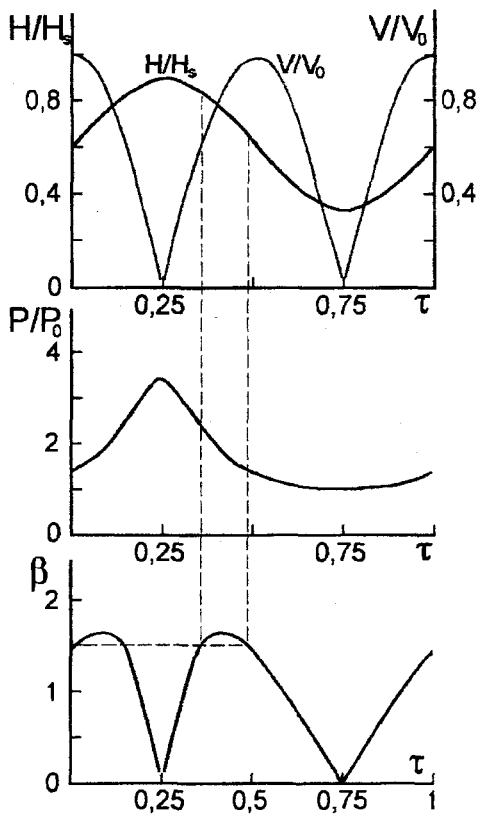


Рис.7. Изменение относительных величин  $H/H_s$ ,  $P/P_0$ ,  $V/V_0$  и параметра  $\beta$  со временем  $\tau$  за один период  $T$  переменного поля  $H_0$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

Из проведённых исследований ангерных состояний (АС) и динамических доменных структур высокоанизотропных плёнок ферритов-гранатов в гармонических переменных полях частотой  $10^1 - 10^5$  Гц, можно сделать следующие основные выводы:

1. Впервые, введено представление о полных динамических доменных фазовых диаграммах многодоменной магнитной среды. Обнаружено большое разнообразие динамических доменных фаз, т.е. доменных структур визуально чётко отличающихся по виду и динамическому поведению. Каждой динамической доменной фазе соответствует ограниченная область на плоскости частота – амплитуда переменного магнитного поля. Построены и изучены диаграммы для нескольких плёнок ферритов-гранатов. Результаты визуальных наблюдений дополнены данными, полученными при фотографировании структур. Показано, что фазовые переходы могут происходить как скачкообразно, так и плавно. Найдены целый ряд общих закономерностей в различных фазовых диаграммах.

2. Для исследования эволюции динамических доменных структур в АС впервые применён метод микровидео съёмки с последующей компьютерной обработкой массива экспериментальных данных. Изучено изменение индивидуальных динамических спиральных доменов (СД) в феррит-гранатовой плёнке от момента их возникновения до разрушения, проведены измерения различных геометрических и динамических параметров СД за время “жизни” каждого из них. Установлено, что траектории СД хаотичны, мгновенные скорости меняются скачками, как по величине, так и по направлению. Размеры СД также меняются скачкообразно, хотя заметна тенденция к увеличению их диаметра и числа витков за время жизни. Рассмотрено взаимодействие СД.

При детальном анализе кадров микровидеофильма обнаружен новый механизм выхода системы из ангерного состояния. Он заключается в том, что с увеличением амплитуды поля при постоянной частоте, увеличивается время жизни и число витков СД, но при этом время ожидания формирования СД растёт гораздо быстрее, увеличиваясь практически до бесконечности.

3. Впервые экспериментально установлена сильная зависимость динамических параметров АС (времени жизни, времени ожидания СД) от величины и направления постоянного подмагничивающего поля (поля смещения).

Показано, что поле смещения, наряду с амплитудой и частотой переменного поля, является третьим управляющим параметром, состояния динамической системы магнитных доменов.

4. Обнаружено явление индуцированного постоянным полем смещения ангерного состояния. Большие поля смещения, сравнимые или в несколько раз превышающие амплитуду переменного поля, могут вызывать АС и формирование из неупорядоченных динамических доменных структур упорядоченные СД. Построены трёхмерные области существования индуцированных АС в пространстве: частота переменного поля, его амплитуда и поле смещения. Определены зависимости геометрических и динамических параметров СД в индуцированном АС от частоты и амплитуды переменного магнитного поля. Показано, что в одном и том же образце может реализовываться несколько областей АС, причём свойства СД в этих областях существенно различаются.

5. На качественном уровне рассмотрен механизм образования динамических СД под действием гиротропной силы. В квазистатическом приближении введён и разумно оправдан количественный параметр для характеристики условий, благоприятных для возникновения СД. Этот параметр связан со скоростью движения доменных стенок и "рыхлостью" динамического массива магнитных доменов. Определена та часть периода переменного поля и соответствующий интервал напряжённости поля в которых могут формироваться СД. Полученные значения полей неплохо согласуются с экспериментальными и теоретическими данными для статических СД.

6. Введены новые динамические параметры (время жизни и время ожидания) для доменных структур, представляющих систему концентрических кольцевых доменов, которые возникают на локальном дефекте, и распространяются от центра ("ведущий центр" - ВЦ). Обнаружены новые динамические структуры, внешне похожие на ВЦ, но отличающиеся по динамическому поведению и названные "доменный центр" и "упругий центр". В первом, движение колец от центра отсутствует, а число колец меняется лишь при изменении амплитуды и частоты переменного магнитного поля. Во втором, движение колец происходит периодически, то от центра к периферии, то наоборот. (Преобразования указанных структур, формирующихся на одном и том же дефекте, могут происходить при изменении амплитуды и частоты переменного поля).

Определены зависимости динамических и геометрических параметров доменных структур типа ВЦ от частоты и амплитуды поля. Эти зависимости не являются монотонными и чрезвычайно чувствительны к изменениям характеристик переменного поля.

7. Экспериментально с помощью микровидеосъёмки обнаружен новый механизм возникновения динамической структуры типа "ведущий центр" из первоначально возникшего на локальном дефекте маловиткового спирального динамического домена.

8. Впервые исследовано влияние постоянного поля смещения на геометрические и динамические параметры доменных структур типа ВЦ. Показано, что постепенное увеличение поле смещения (при фиксированных частоте и амплитуде переменного поля) разрушает эти структуры, причём этот процесс осуществляется последовательно в две стадии: первая – распад внешних колец на цепочки цилиндрических доменов; второй – испускание из центра кластеров цилиндрических доменов.

#### **Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:**

1. Кандаурова Г.С., Русинов А.А. Фазовые диаграммы динамических систем магнитных доменов. // ДАН, 1995, т.340, N5, с.610 – 613.

2. Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х., Русинов А.А., Русинова Е.А. Эволюция спиральных динамических магнитных доменов в ангерном состоянии плёнок ферритов-гранатов. // Письма в ЖЭТФ, 1996, т.63, вып.6, с.453 – 456.

3. Кандаурова Г.С., Русинов А.А. Спиральные динамические домены в плёнках ферритов-гранатов, индуцированные полем смещения. // Письма в ЖЭТФ, 1997, т.65, вып.1, с.60 – 64.

4. Кандаурова Г.С., Русинов А.А. Трёхмерные диаграммы существования индуцированных ангерных состояний многодоменной магнитной среды. // ФТТ, 1998, т.40, вып.10, с.1865-1870.

5. Kandaurova G.S., Rusinov A.A. The formation and destruction domain structures of "Leading Centre" type. // Тез. докл. "The Third International Symposium on Physics of Magnetic Materials" ISPMM-95, Seoul, 1995, Korea, August 21 – 25, p.99 – 100.

6. Kandaurova G.S., Kipshakbaeva J.A., Rusinov A.A. Phase diagrams of dynamic system of magnetic domains. // Тез. докл. "6<sup>th</sup> European Magnetic Materials and Applications Conference", EMMA-95, Wien, 1995, Austria, September 4 – 8, p.190.

7. Русинов А.А., Кандаурова Г.С. Влияние поля смещения на время жизни спиральных динамических доменов. // Тез. докл. XV Всероссийской Школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники", НМММ-96, Москва, 1996, 18 – 21 июня, с.392 - 393.

8. Осадченко В.Х., Русинов А.А., Кандаурова Г.С., Русина Е.А. Параметры ангерного состояния плёнок ферритов-гранатов по материалам микровидеофильма. // Тез. докл. XV Всероссийской Школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники", НМММ-96, Москва, 1996, 18 – 21 июня, с.441 – 442.

9. Kandaurova G.S., Osadchenko V.Kh., Rusinov A.A., Rusinova E.A. Evolution of spiral dynamic magnetic domains in an anger-state of the ferrite-garnet films. // Тез. докл. "Magneto Optical Recording International Symposium`96", MORIS-96, 1996, April 29 – May 2, p.221 – 222.

10. Kandaurova G.S., Kipshakbaeva Zh.A., Rusinov A.A. Dynamic domain phase diagrams of ferrit-garnet films. // Тез. докл. "International Conference on Magnetism`97", ICM-97, 1997, 27 July – 1 August, Homepage: <http://www.physics.monash.edu.au/~icm97/>, G3-21.

11. Русинов А.А., Ажауров С.А. Динамические параметры спиральных доменов, индуцированных полем смещения в плёнках ферритов-гранатов. // Тез. докл. "Уральской региональной школы-семинара молодых учёных и студентов по физике конденсированного состояния", Екатеринбург, 1997, 5 – 6 декабря, Homepage: <http://www.usu.ru/win/usu/events/1997/school-seminar/thesis/Rusinov1.htm>.

12. Русинов А.А., Кандаурова Г.С. Трёхмерные динамические доменные фазовые диаграммы плёнок ферритов-гранатов. // Тез. докл. XVI Международной Школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники", НМММ-98, Москва, 1998, 23–26 июня, ч.2, с.501 - 502.

13. Русинов А.А., Кандаурова Г.С., Ажауров С.А. Ангерное состояние плёнок ферритов-гранатов, индуцированное полем смещения. // Тез. докл. XVI Международной Школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники", НМММ-98, Москва, 1998, 23 – 26 июня, ч.2, с.538 - 539.

14. Русинов А.А., Кандаурова Г.С., Белов С.В. Параметры доменных структур типа "ведущий центр". // Тез. докл. XVI Международной Школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники", НМММ-98, Москва, 1998, 23 – 26 июня, ч.2, с.540 - 541.

15. Русинов А.А., Белов С.В. Разные механизмы образования динамических систем concentрических кольцевых доменных структур. // Тез. докл. "Второй объединённой конференции по магнитоэлектронике (международная)", ОКМЭ-2000, Екатеринбург, 2000, 15 –18 февраля, с.154-155.

16. Г.С.Кандаурова, А.А.Русинов. Центры формирования упорядоченных динамических доменных структур в плёнках ферритов-гранатов. // Сборник трудов XVII международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники», НМММ-2000, Москва, 2000, 20-23 июня, с.735-736.

17. V.N.Maltsev, G.S.Kandaurova, A.A.Rusinov, I.G.Jupherova. The concentric ring domains in quazi-static magnetic fields. // Тез. докл. Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism" (EASTMAG-2001) Russia, Ekaterinburg, 2001, February 27 – March 2, p.142.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990.

2. Кандаурова Г.С., Свицерский А.Э Возбуждённое состояние и спиральная динамическая доменная структура в магнитном кристалле. // Письма в ЖЭТФ, 1988, Т.47, вып.8, С.410–412.

3. Кандаурова Г.С., Свицерский А.Э Наблюдение автоволнового состояния и устойчивых динамических структур в многодоменных магнитных плёнках. // Письма в ЖТФ, 1988, Т.14, вып.9, С.777–780.

4. Кандаурова Г.С., Свицерский А.Э Процессы самоорганизации в многодоменных магнитных средах и формирование устойчивых динамических структур. // ЖЭТФ, 1990, Т.97, вып.4, С.1218–1229.

5. Куделькин Н.Н., Рандошкин В.В. Магнитный вихрь в плёнках ферритов-гранатов. // Письма в ЖЭТФ, 1983, Т.38, вып.10, С.481–483.

6. Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачёв В.Б. Динамические доменные структуры при импульсном перемагничивании монокристаллических плёнок ферритов-гранатов. // ФТТ, 1987, Т.29, вып.8, С.2247–2254.

7. Борисов А.Б., Фейгин В.А., Филиппов Б.Н. Спиральные солитоны в ферромагнетике. // ФТТ, 1991, Т.33, №8, С.2316–2319.

8. Дикштейн И.Е., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Чижик Е.С. Формирование рефлексивных доменных структур при монополярном и циклическом намагничивании одноосных магнитных плёнок. // ЖЭТФ, 1991, Т.100, вып.5(11), С.1606–1626.

9. Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Николаева Е.Г., Николаев А.В. Динамическая самоорганизация и симметрия распределений магнитного момента в тонких плёнках. // ЖЭТФ, 1993, Т.103, вып.1, С.213–233.

10. Гобов Ю.Л., Шматов Г.А. Спиральные и ветвящиеся домены в одноосных магнитных плёнках в статическом магнитном поле. // ФММ, 1994, Т.78, вып.1, С.39–50.

11. Борисов А.Б., Ялышев Ю.И. Магнитостатическая устойчивость спирального домена. // ФММ, 1995, Т.79, вып.5, С.18–31.

12. Гальцев А.Ф., Ялышев Ю.И. Кольцевые домены в феррит-гранатовых плёнках. // ФММ, 1998, Т.85, вып.4, С.5–17.

13. Свидерский А.Э. Низкочастотная динамика доменной структуры в плёнках ферритов-гранатов. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 1994, 145с.

14. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоиздат, 1990.

15. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982.

16. Kooy S., Enz U. Experimental and theoretical study of the domain configuration in thin layers of  $BaFe_{12}O_{19}$ . // Phil. Res. Rept., 1960, V.15, N1, p.7–29.

Работа частично поддержана программой CRDF (грант № REC-005) и грантами РФФИ № 93-02-16340 и № 96-02-16119а.

Подписано в печ. 17.05.2001г. Формат 60 x 84 1/16.  
Бумага офсет. Объем 1,5 Тир. 100 Зак. № 425  
Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51. Типолаборатория УрГУ.