

На правах рукописи

УСПЕНСКАЯ Людмила Сергеевна

ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ
В СВЕРХПРОВОДНИКАХ И МАГНЕТИКАХ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Черноголовка – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт физики твердого тела Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник Физического Факультета МГУ им. Ломоносова
Ганьшина Елена Александровна

Доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель директора ИФ СО РАН
Овчинников Сергей Геннадиевич

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией ИФТТ РАН
Рязанов Валерий Владимирович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
микроструктур Российской академии наук

Защита состоится « 26 » июня 2012г. в 10 часов на заседании диссертационного совета
Д 002.100.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт
физики твердого тела РАН по адресу: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул.
Академика Осипьяна, д. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Российской академии наук Институт физики твердого тела
РАН

Автореферат разослан « ____ » мая 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук
профессор

Зверев В.Н

© Успенская Л.С. 2012
© ИФТТ РАН 2012
© ИПХФ РАН 2012

Общая характеристика работы

Образование пространственно неоднородной магнитной структуры характерно для большинства магнитоактивных сред. Примерами таких структур могут служить домены в ферромагнетиках, промежуточное состояние в сверхпроводниках первого рода или смешанное состояние в сверхпроводниках второго рода. Важным классом физических явлений, наблюдаемых в таких магнитоактивных средах являются макроскопические динамические эффекты. Их изучение интересно с точки зрения физики, а также различных приложений, в которых в настоящее время широко используются ферромагнитные материалы и сверхпроводники.

Хорошо известно, что спонтанная магнитная доменная структура возникает в ферромагнетиках вследствие магнитостатических взаимодействий, а конкретный вид доменной структуры определяется балансом обменной, магнитостатической, магнитоупругой энергий и энергии кристаллографической анизотропии [L1,L2]. Однако в динамике, в процессе быстрого перемагничивания, в ферромагнетиках могут формироваться состояния, принципиально отличные от тех, что возникают в квазистатических условиях. Например, в тонких магнитных плёнках наблюдается переориентация полюсовых магнитных доменов [L3], возникают фрактальные магнитные доменные структуры [L4], происходит плавление решётки цилиндрических доменов [L5], возникает не совпадающая по частоте с возбуждающим магнитным полем квазипериодическая генерация доменов [L6,L7] и т.д. Такие преобразования магнитных структур изменяют макроскопические характеристики материала, приводят к скачкам намагниченности, усилению шумов и т.п.

Вихревые структуры в сверхпроводниках второго рода также могут испытывать неустойчивости различной природы. Самой известной из них является термомагнитная неустойчивость, ограничивающая токонесущую способность технических сверхпроводников [L8]. Причиной термомагнитных неустойчивостей, наблюдаемых в сверхпроводниках во внешнем магнитном поле, является связь тепловых и электромагнитных процессов, а также существенная зависимость плотности сверхпроводящего тока от температуры. Несколько менее известными являются макротурбулентность

[L9], развивающаяся на фронте перемагничивания пластин сверхпроводников второго рода, или „твистерные“ структуры [L10], формирующиеся в таких же пластинах при качании магнитного поля.

Сложное динамическое поведение, формирование самоорганизующихся нелинейных магнитных структур в сверхпроводниках второго рода обусловлено существованием целого набора сил, действующих на вихри Абрикосова [L11]. Любой протекающий по сверхпроводнику ток действует на вихри и приводит их в движение. Кроме того, вихри взаимодействуют друг с другом, с поверхностью образца, с дефектами кристаллической решетки. И наконец, в образцах с большим размагничивающим фактором (например, в плёнках в поперечном магнитном поле) существенное значение приобретает распределение магнитного поля в окружающем пространстве [L12]. Другими словами, магнитостатическая энергия рассеянных магнитных полей оказывается важной в общем балансе энергий, определяющих равновесное состояние системы. Это обстоятельство является общим для сверхпроводников и ферромагнетиков, в которых именно магнитостатическая энергия определяет формирование доменной структуры.

Вообще говоря, изучение магнитных структур в сверхпроводниках и магнетиках ведется на протяжении десятков лет. Наиболее плодотворными методами исследования оказались методы прямого наблюдения: декорирование, магнитооптической визуализация. Именно методом декорирования было подтверждено существование вихрей в сверхпроводниках и магнитных доменов в ферромагнетиках. А применение магнитооптических методов визуализации, основанных на эффектах Керра, Фарадея и Коттона-Муттона, дало возможность напрямую наблюдать изменение этих структур под внешними воздействиями.

Прямые наблюдения динамики доменов в ферромагнетиках в переменном поле и изучение проникновения магнитного потока в сверхпроводники второго рода под действием переменного магнитного поля показало, что визуально некоторые эффекты в ферромагнетиках удивительно похожи на динамические процессы в сверхпроводниках. Например, упоминавшиеся ранее квазипериодическая генерация доменов в тонкой магнитной плёнке и твистерные структуры, плавление решётки цилиндрических доменов и

плавление вихревой решетки, фрактальные магнитные доменные структуры и структуры нормальной фазы в сверхпроводниках первого рода, изгибная неустойчивость полосовых доменов и турбулентность на фронте перемагничивания в пластинах сверхпроводника. Эта визуальная аналогия означает, что, возможно, в основе этих эффектов лежат общие физические механизмы.

Цели работы

Принимая во внимание академический интерес и практическую значимость исследования нелинейных возбуждений магнитных структур в переменных магнитных полях, сформулированы следующие основные цели работы: используя магнитооптические методы визуализации распределения индукции

1. определить основные факторы, определяющие динамический отклик магнетиков на изменение внешнего магнитного поля;
2. изучить факторы, определяющие динамическое распределение магнитного потока в сверхпроводниках второго рода;
3. исследовать основные закономерности нелинейного отклика магнетиков и сверхпроводников на переменное магнитное поле и выяснить механизмы формирования макроскопических динамических неравновесных магнитных структур в сверхпроводниках и магнетиках под действием переменного магнитного поля;
4. изучить влияние нелинейных возбуждений на макроскопические характеристики материалов.

Актуальность работы

В последние годы широкое развитие получило новое направление исследований - спинтроника (спиновая электроника), которая включает в себя манипуляцию спиновыми степенями свободы в твёрдотельных системах, т.е. генерацию спин-поляризованных электронов, спиновую динамику, спин-поляризованный транспорт и магниторезистивные эффекты. При этом в качестве рабочих материалов подразумеваются либо материалы с сильной спиновой поляризацией (материалы с эффектом ко-

лоссального магнитосопротивления, такие как разбавленные манганиты лантана), либо гетероструктуры типа ферромагнетик-антиферромагнетик, ферромагнетик-сверхпроводник. Управлять проводящими свойствами таких структур можно с помощью электрического или магнитного полей. Для успешного развития данного направления необходимы детальные знания об отклике гетероструктур в целом и составляющих их частей на внешние воздействия электрическим или магнитным полем. В том числе, необходимы знания о магнитной доменной структуре, о её устойчивости или трансформации под действием тока, постоянных и переменных магнитных полей и т.д. Необходимы знания о поведении вихревой материи в сверхпроводниках при возбуждении переменным магнитным полем. Данная работа посвящена решению одной составной части этой актуальной задачи – исследованию кинетики перемагничивания сверхпроводников, ферромагнетиков и гетерофазных наноструктур под действием постоянных и переменных магнитных полей, изучению условий линейного отклика системы и условий формирования неравновесных динамических структур, возникающих под действием переменного магнитного поля, изучению влияния сформировавшихся структур на макроскопические характеристики материала.

Научная новизна работы

В результате проведённых экспериментальных исследований был обнаружен ряд новых, не наблюдавшихся ранее и не предсказанных теоретически эффектов самоорганизации неравновесных динамических структур в магнитно-упорядоченных магнитоактивных системах (вихревая система в сверхпроводниках, магнитная доменная структура в ферромагнетиках) под действием относительно слабого нерезонансного переменного магнитного поля. Это динамические изменения типа доменной структуры в пластинах магнитного диэлектрика, возбуждение автоколебательной моды движения намагниченности, формирование макроскопических капель магнитного потока в пластинах сверхпроводника. Обнаруженные эффекты были всесторонне изучены, определены необходимые и достаточные условия для их проявления. Было показано, что возникновение нового типа структур влияет на макроскопические характеристики материалов, приводит к измене-

нию диссипации энергии, появлению скачков магнитной проницаемости.

Была изучена релаксация магнитоупорядоченных состояний в пластинах высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и ферромагнетиков и определены определяющие её факторы. В частности, было установлено, что пиннинг вихрей в текстурированных плавлением керамиках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) в области низких температур определяется их закреплением на точечных дефектах, а в области высоких температур – взаимодействием с планарными дефектами. Это приводит к тому, что анизотропия критического тока в текстурированном материале возрастает с повышением температуры, в отличие от анизотропии тока в монокристаллах, понижающейся с повышением температуры. Было обнаружено, что именно релаксация тока, текущего по слабым связям, определяет быструю релаксацию захваченного потока в текстурированном материале. Были найдены дополнительные факторы, влияющие на релаксацию потока и в монокристаллах, и в текстурированном материале: геометрический фактор, наклон поля, конфигурация магнитного потока. Была обнаружена трёхмерная корреляция вихрей в области низких температур в слоистом сверхпроводнике $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO) и показано, что эта корреляция обуславливает повышенный пиннинг вихрей, исчезающий при разрушении 3D корреляций.

Обнаружено двойное влияние нелинейных возбуждений в структуре доменных границ на их подвижность в плёнках и пластинках $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (ИЖГ): подавление подвижности в совершенных материалах и увеличение подвижности в материалах с магнитным последствием.

При экспериментальном исследовании кинетики перемагничивания поликристаллических ферромагнитных плёнок $\text{Co}_x\text{Ni}_{100-x}$ была обнаружена сингулярность на зависимостях коэрцитивности и остаточной намагниченности от концентрации Co. Было установлено, что эта сингулярность коррелирует с качественным изменением механизма перемагничивания плёнок с неоднородного вращения намагниченности, имеющего место при малых концентрациях Co, на процесс зарождения и движения доменных границ, развивающийся при больших концентрациях Co. Учёт усиления обменного взаимодействия между зёрнами при возрастании концентрации Co позво-

лил объяснить наблюдаемый эффект.

Особенность на зависимости коэрцитивности от температуры была обнаружена в ультратонких плёнках манганита лантана. В результате проведенных исследований удалось показать, что эта особенность также связана с изменением кинетики перемагничивания и изменением типа доменных границ. Было установлено, что изменение типа границ (от зигзагообразных, типичных для дефектных плёнок с высокой коэрцитивностью, к диффузным), обусловлено нарастающими напряжениями на интерфейсе плёнка-подложка, приводящими к изменению анизотропии. В этих же плёнках была обнаружена бистабильность магнитной доменной структуры, также обусловленная напряжениями на интерфейсе.

Была изучена кинетика перемагничивания и динамические характеристики процесса в гибридных плёнках пермаллой-антиферромагнетик. Обнаружено подавление подвижности доменных границ пермаллоя в гибридной структуре и возрастание коэрцитивности по сравнению с теми же характеристиками в изолированном слое пермаллоя, а также существенная асимметрия динамических свойств при перемагничивании вдоль и против направления обменно-наведенной анизотропии.

Новизну и значимость полученных результатов подтверждает их опубликование в ведущих отечественных и международных журналах, таких как „Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики“, „Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики“, „Physical Review Letters“, „Physical Review B“, „Journal of Applied Physics“ и других рецензируемых журналах, см. стр. 31.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы определяется тем, что в работе получены новые результаты, представляющие широкий интерес для специалистов, занимающихся физикой магнитных явлений. Обнаруженные эффекты динамической самоорганизации в сверхпроводниках и магнетиках значительно расширили существующие представления о многообразии нелинейных возбуждений в магнитных средах и стимулировали теоретическое рассмотрение проблемы.

Полученные результаты представляют интерес и для разработчиков приборов с использованием магнитных материалов, поскольку проясняют потенциальные источники диссипации энергии и нелинейного отклика материалов на слабые внешние возбуждения.

Обнаруженные эффекты динамических преобразований доменной структуры могут быть использованы для управления магнитной проницаемостью кристаллов, для создания перестраиваемых дифракционных решёток и модуляторов света.

Результаты, касающиеся релаксации магнитного потока и критического тока в текстурированных плавлением керамиках высокотемпературных сверхпроводников, изменения характера релаксации при ограничении размеров материала, несомненно, должны быть учтены при разработке новых электрических машин на основе объёмных сверхпроводящих материалов.

Предложенный и использованный в работе простой метод разделения внутризёренных и межзёренных токов, позволивший соотнести релаксации токов, протекающих в объёме кристаллитов и через слабые связи, может с успехом быть использован для быстрой характеристики качества соединения (спайки) деталей, изготовленных из объёмных высокотемпературных сверхпроводников.

Основные результаты, выносимые на защиту

Являются новыми и выносятся на защиту следующие основные результаты:

1. Обнаружено формирование макроскопических магнитных структур в магнитоупорядоченных диссипативных средах (ферромагнетиках и сверхпроводниках второго рода) под действием низкочастотного магнитного поля: образование макроскопических капель магнитного потока в ВТСП и автогенерация магнитных доменов и линий Блоха в ферромагнетиках. Изучены условия формирования этих структур, их эволюция и влияние на диссипацию энергии и магнитную проницаемость.

2. Установлено, что макроскопические капли магнитного потока формируются в пластинах слоистого сверхпроводника BSCCO на двумерных линейных дефектах. Показано, что их зарождение происходит в ограничен-

ном диапазоне температур, амплитуд и частот магнитного поля. Предложена модель, описывающая формирование таких капель. Показано, что явление возникает при условии, что на слабой связи имеется локальная область с пониженными сверхпроводящими свойствами, релаксация потока вдоль слабой связи происходит быстрее, чем в других направлениях, и время перехода к равновесному состоянию мало или сравнимо с периодом возбуждающего поля. Выяснено, что магнитостатические взаимодействия между областями (каплями) с противоположным направлением индукции способствуют образованию капель и стабилизируют образовавшуюся структуру.

3. Подробно исследовано формирование вихревых динамических структур – твистеров (макроскопических протяженных областей знакопеременного магнитного потока), возникающих в тонких монокристаллических пластинах YBCO в качающихся магнитных полях. Показано, что возможность формирования твистерных структур и их вид (периодичность и ширина твистерных полос) определяются величиной плоскостного поля, амплитудой и частотой переменного поля, соотношением геометрических размеров образцов и температурой. На основании полученных данных сделан вывод, что природа образования твистерных вихревых структур в YBCO аналогична природе образования макроскопических капель магнитного потока в монокристаллах BSCCO, а их стабильность также определяется магнитостатическими взаимодействиями.

4. Показано, что формирование динамических вихревых структур (и макроскопических вихревых капель, и твистеров) приводит к изменению характера релаксации в системе, делает релаксацию пространственно неоднородной, неравномерной во времени.

5. Установлено, что автогенерация магнитных доменов и линий Блоха в пластинках иттриевого феррограната возникает пороговым по амплитуде поля образом, в широком диапазоне частот поля, при любом направлении поля относительно осей легкого намагничивания. Центрами зарождения новых границ и линий являются дефекты реальной структуры кристаллов и края пластин. Впервые прямыми наблюдениями показано, что нелинейные возбуждения тонкой структуры доменных границ (генерация и движение блоховских линий) действительно определяют динамику доменных

границ. Установлено, что в совершенных монокристаллических плёнках ИЖГ эти возбуждения приводят к ограничению подвижности границ, как и предсказывалось теорией, но в материалах разбавленных гранатов, обладающих эффектом магнитного последствия, обуславливают увеличение подвижности границ. Найдены способы управления автогенерацией с помощью постоянных и переменных подмагничивающих полей.

6. Обнаружены эффекты динамического преобразования доменной структуры магнитного диэлектрика ИЖГ в переменном магнитном поле, заключающиеся в изменении периода доменной структуры и в качественном изменении типа структуры. Определены области амплитуд и частот возбуждающих полей, при которых трансформация структуры имеет место. Показано, что изменения периода доменной структуры однозначно связаны с возникновением нелинейных возбуждений в доменных границах, усиливающих диссипацию в системе, а качественные преобразования обусловлены возбуждением упругих резонансов.

7. Показано, что и преобразования доменной структуры, и возбуждение генерации границ в пластинах и плёнках ИЖГ приводят к временной нестабильности магнитной проницаемости.

8. Изучены основные факторы, определяющие кинетику перемагничивания тонких обменно-связанных поли- и монокристаллических ферромагнитных плёнок. Показано, что в поликристаллических плёнках $\text{Co}_x\text{Ni}_{100-x}$ при $x = 50 \%$ происходит смена механизма перемагничивания, сопровождающаяся кроссовером зависимости коэрцитивности и остаточной намагниченности от концентрации Co . Показано, что эти изменения объясняются изменением соотношения магнитостатической и обменной энергий с вариацией концентрации Co .

9. Обнаружено, что в бислойных магнитных структурах обменное взаимодействие между слоями, наряду с изменением квазистатических характеристик процесса перемагничивания магнитомягкого слоя (обменного смещения и расширения петель гистерезиса), обуславливает изменение динамических характеристик (времен зарождения и скоростей движения границ), и приводит к появлению новых типов асимметрии. В частности, в бислойных структурах FeNi/FeMn времена зарождения границ и ско-

рости их движения различаются на порядки, а активационные объёмы в несколько раз при движении границ по и против эффективной оси лёгкого намагничивания. Эффекты качественно объяснены неоднородностью потенциального рельефа для движения доменных границ из-за вариации направления обменно-наведённой анизотропии на шероховатостях интерфейса ферромагнетик-антиферромагнетик.

10. В ультратонких плёнках манганита лантана, выращенных на подложках лантан-алюминиевого граната, обнаружена бистабильность магнитной доменной структуры, обусловленная напряжениями несоответствия между параметрами решётки плёнки и подложки, которые изменяют магнитное упорядочение манганита лантана вблизи интерфейса. Показано, что движение границ в таких плёнках, как и в бислойных плёнках FeNi/FeMn, носит термоактивационный характер. В широком диапазоне температур определены скорости движения границ, активационные объёмы, магнитная вязкость, коэрцитивность. Обнаружена сингулярность на зависимости коэрцитивности от температуры в окрестности 200 К, связанная, как показано, с изменением кинетики перемагничивания.

11. Изучена кинетика перемагничивания монокристаллических и текстурированных пластин ВТСП и определены факторы, влияющие на релаксационные процессы. Установлено, что в текстурированной плавлением керамике YBCO, как и в тонких плёнках, границы между кристаллитами с углом разориентации больше 10° обладают пониженными проводящими свойствами, т.е. ведут себя как слабые связи. Определены температурные зависимости критических токов, текущих в базовой плоскости и поперек базовой плоскости. Выяснено, что в области низких температур характер изменения тока описывается моделью коллективного пиннинга на точечных дефектах, а при высоких температурах - пиннингом на протяжённых дефектах.

12. На основании экспериментальных данных определена анизотропия критического тока. Обнаружено, что анизотропия критического тока в текстурированном материале резко возрастает при повышении температуры выше 80 К в отличие от анизотропии тока в монокристаллах, понижающейся с повышением температуры. Показано, что такое отличие связано

со свойствами границ между кристаллитами, образующими текстурированные домены, на которых при температуре около 80 К происходит размораживание слабых связей, что приводит к резкому уменьшению тока поперёк кристаллитов. Изучена релаксация внутризёренных и межзёренных критических токов. Обнаружено, что релаксация тока по слабым связям идёт в несколько раз быстрее, чем внутризёренного тока. Таким образом, впервые напрямую показано, что роль слабых связей в материале не сводится только к уменьшению захвата потока или ограничению протекающего тока, наличие слабых связей определяет диссипацию в системе.

13. Изучено проникновение наклонного поля и его релаксация в пластинах текстурированной керамики YBCO, монокристаллах YBCO и анизотропных монокристаллах BSCCO, допированных свинцом (BSCCO:Pb). Обнаружено, что во всех типах пластин наличие плоскостного поля приводит к появлению анизотропии проникновения потока: увеличению глубины проникновения потока вдоль плоскостной компоненты поля и одновременному уменьшению глубины проникновения потока в направлении поперек плоскостного поля. Обнаружено изменение релаксации экранирующего тока: усиление крипа тока, текущего поперёк плоскостного поля, и существенное замедление релаксации (практически остановка релаксации) тока, текущего вдоль плоскостного поля.

14. Изучено влияние геометрического фактора на характер релаксации магнитного потока в пластинах сверхпроводника. Обнаружено, что при частичном проникновении потока в толстых пластинах релаксация происходит за счёт крипа тока на внутреннем и внешнем фронтах перематнивания, что приводит к уменьшению захвата с одновременной диффузией потока вглубь образца, а в тонких пластинах релаксация идёт главным образом за счёт уменьшения экранирующего тока на внешнем фронте потока, без его продвижения вглубь образца. Таким образом, показано, что релаксация потока зависит от формы образца, и её можно минимизировать.

15. Обнаружено существование сильных трёхмерных корреляций между панкейками, составляющими вихри в высокоанизотропном кристалле BSCCO:Pb при $T < T_m = 54$ К. Показано, что корреляции скачкообразно исчезают при $T > T_m$. На основании выполненных теоретических оценок

сделан вывод, что $T = T_m$ является точкой 3D-2D фазового перехода в вихревой системе. Сделан вывод, что именно 3D корреляции определяют усиленный пиннинг при $T < T_m$ и его скачкообразное исчезновение при $T > T_m$.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Магнитооптические методы прямой визуализации процессов, использованные в диссертационной работе, являются одними из наиболее плодотворных для изучения макроскопических динамических эффектов в магнитоактивных средах. Предложенные в работе модификации этих методов позволили не только производить визуальные наблюдения, но и исследовать динамику процессов, определять макроскопические и локальные характеристики. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью на разных образцах, на разных установках. Результаты, полученные с помощью магнитооптических наблюдений, подтверждены независимыми индукционными измерениями и измерениями с помощью датчиков Холла. Обоснованность выводов о природе обнаруженных эффектов подтверждена теоретическими оценками и расчётами, выполненными автором и соавторами работ.

Личный вклад автора

В проведённых исследованиях автору принадлежит решающий вклад в постановке задачи, разработке методики экспериментов, проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов. Расчёт совместно продуманных моделей, описывающих роль магнитного последствия в эффекте увеличения подвижности доменных границ в плёнках феррограната и объяснивших изменение свойств поликристаллических плёнок $\text{Co}_x\text{Ni}_{100-x}$ при изменении концентрации Co, проведён А.Ф. Хапиковым. Расчёт, показавший потенциальную возможность формирования макроскопических вихревых капель на линейных дефектах в монокристаллах BSCCO, после совместного обсуждения концепции и постановки задачи, выполнен А.Л. Рахмановым.

Апробация работы

Euro-Asian Symposium "Magnetism on a Nanoscale" (*Казань, 2007, Екатеринбург, 2010*); 1,2,3 и 4 Международная конференция "Фундаментальные проблемы сверхпроводимости" (*Звенигород 2004, 2006, 2008, 2011*); Joint European Magnetic Symposium (*Krakow, Poland, 2010*); 14ый международный симпозиум "Нанозифика и электроника" (*Нижний Новгород, 2010*); XXXIII и XXXIV Совецания по физике низких температур (*Екатеринбург, 2003, Сочи, 2006*); 25th international conference on Low Temperature Physics - LT25 (*Amsterdam, August 6-13, 2008*); Workshop on Spin Momentum Transfer (*Krakow, 3-5 September 2008*); International conference "Functional materials" (*Крым, Украина, 2005, 2007, 2009*); 7, 8 и 9 European Conferences on Applied Superconductivity (*Vienna, Austria, 2005, Brussels, Belgium, 2007, Dresden, Germany, 2009*); International Conference on Magnetism (*Karlsruhe, Germany, 2009*); Moscow International Symposium on Magnetism (*Москва, 2008*); Международный междисциплинарный симпозиум "Порядок, беспорядок и свойства оксидов" (*Ростов-Дон - Лоо, ОДРО-8, 2005, ОДРО-9, 2006 г., ОДРО-11, 2008*); Международный междисциплинарный симпозиум "Среды со структурным и магнитным упорядочиванием" (*Ростов на Дону - Лоо, Multiferroic-1, 2007, Multiferroic-2, 2009*); International Scientific Workshop Oxide Materials for Electronic Engineering - fabrication, properties and application - OMEE-2009 (*Lviv, Ukraine, 2009*); 2nd and 3rd International conferences on physics of magnetic materials (*Warsaw, Poland, 1984, 1986*); 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity - High Temperature Superconductors - M2S-HTSC VIII (*Dresden, Germany, 2006*); 6-ой международный семинар "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении" (*Астрахань, 2006*); Школа по прикладной сверхпроводимости (*Протвино, 2001, 2002, 2003*); International Conference on Magnetism - ICM'2003 (*Rome, Italy, 2003*); NATO Advanced Research Workshop on Magneto-Optical Imaging (*Øystese, Norway, 2003*); International workshop in processing and applications of superconducting (RE)BCO large grain materials - PASREG (*Jena, Germany, 2003*); Конференция по Электронной микроскопии (*Черноголовка, 2002*); 15th International Symposium on

Superconductivity -ISS (*Yokohama, Japan, 2002*); Conference on Applied Superconductivity - ASC 2000 (*Virginia Beach, USA, 2000*); International symposium on magneto-optics (*Kharkov, Ukraine, 1991*); Всесоюзный семинар по магнитоэлектронике (*Алушта, Украина, 1991*); 12,15,16,17,19 Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений (*Баку, 1975; Пермь, 1981, Тула, 1983 Донецк, 1985; Ташкент, 1991*); 8,9,10,12,13 школа-семинар "Новые магнитные материалы для микроэлектроники" (*Донецк, 1982; Саранск, 1984; Рига, 1986; Новгород, 1990; Астрахань, 1992*);

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав с 10 разделами и заключения. Работа изложена на 329 страницах, содержит 158 рисунков и список литературы из 502 наименований.

Содержание работы

Во введении даётся общая характеристика работы, сформулированы цели, задачи работы, обоснована актуальность исследований, новизна полученных результатов. Приводится информация об апробации результатов и даётся список публикаций основных результатов работы (48 статей в реферируемых журналах, из них 45 входят в список ВАК).

В главе „Экспериментальные методы“ обсуждаются магнитооптические методы наблюдения магнитной доменной структуры в прозрачных и непрозрачных в видимом диапазоне света материалах и возможность извлечения локальных и усреднённых, макроскопических, характеристик сверхпроводников и магнетиков. В частности, обсуждается предложенный автором способ визуализации тонкой структуры магнитных доменных границ в ферромагнитных плёнках с перпендикулярной анизотропией – метод анизотропной темнопольной дифракции [37], позволивший не только увидеть вертикальные линии Блоха, разделяющие границы на сегменты с противоположным разворотом намагниченности, но и исследовать их поведение при приложении постоянных и переменных магнитных полей, а также изучить влияние движения линий на подвижность доменных границ (см.

работы [33-37]). Проанализированы особенности магнитооптической визуализации распределения магнитной индукции в непрозрачных материалах с помощью плёнок иттрий-железистого граната (МОИГ) [29]: обсуждены вопросы трактовки изображений распределения магнитного потока в сверхпроводниках и артефакты визуализации, рассмотрены возможности извлечения локальных и макроскопических количественных характеристик сверхпроводников, предложен способ определения локального критического тока в объёмных сверхпроводниках, использованный в [25] для изучения корреляций в распределении включений и критического тока, и объяснена возможность наблюдения неоднородностей состава магнитного материала с помощью МОИГ. В конце главы описаны вспомогательные методы исследования, применённые в работе, в частности, предложенный автором метод разделения внутризёренных и межзёренных токов в объёмных сверхпроводниках с помощью измерений магнитной индукции датчиком Холла в двух точках над сверхпроводником [27], успешно использованный в работе для изучения релаксации критического тока, текущего через слабые связи, и позволивший показать, что именно эта релаксация определяет релаксацию захваченного магнитного потока в текстурированной плавлением керамике $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO).

2-я глава диссертации, „Кинетика перемагничивания ферромагнетиков“, посвящена экспериментальному исследованию процессов перемагничивания тонких ферромагнитных плёнок и пластин, выяснению факторов, определяющих кинетику перемагничивания монокристаллических и поликристаллических плёнок, изучению влияния дефектной структуры плёнок на кинетику перемагничивания. Особое внимание уделено эффектам динамического преобразования магнитной доменной структуры и структуры доменных границ, обнаруженным автором в тонких монокристаллических пластинах ИЖГ.

В разделе 2.1 этой главы обсуждаются литературные данные, касающиеся энергетики доменной структуры, предполагаемой кинетики квазистатического и низкочастотного перемагничивания, ожидаемых изменений магнитной доменной структуры при высокочастотном возбуждении. В кон-

це раздела ставится задача исследования.

Раздел 2.2 посвящён выяснению факторов, лимитирующих скорость перемещения монокристаллических и поликристаллических материалов.

В § 2.2.1 и § 2.2.2 рассмотрены возбуждения движения блоховских линий под действием магнитных полей различных ориентаций, и описывается двоякое влияние движения блоховских линий на подвижность доменных границ в монокристаллических пластинах и плёнках ИЖГ, [33-37, 48]. Магнитная доменная структура и тонкая структура доменных границ в пластинках ИЖГ, вырезанных в плоскости (112), т.е. имеющих одну ось лёгкого намагничивания в плоскости пластин и домены 180-ти градусного соседства, наблюдались в проходящем поляризованном свете за счёт эффектов вращения плоскости поляризации света и дупреломления. Тонкая структура границ в кристаллах с перпендикулярной направлением оси лёгкого намагничивания выявлялась с помощью метода анизотропной темнопольной дифракции.

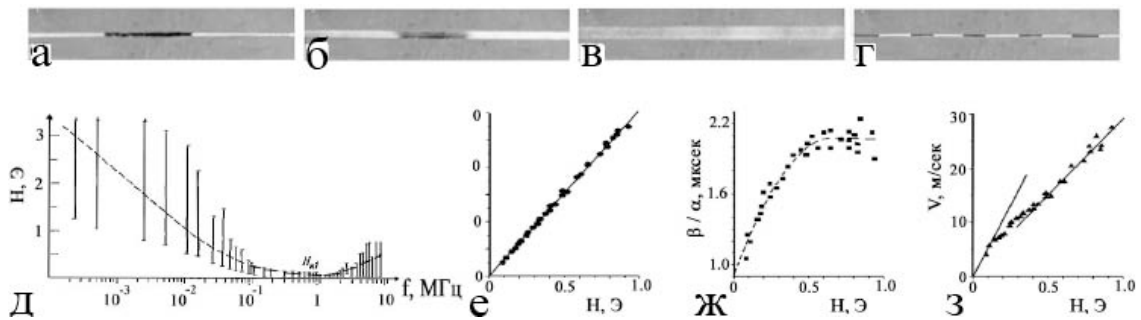


Рис. 1: Изменения тонкой структуры границы под действием переменного поля, направленного вдоль оси лёгкого намагничивания (в плоскости образца, параллельно границе). (а) – исходная структура, (б) – при движении границы со скоростью 6 м/сек, (в) – при скорости 15 м/сек и (г) – после выключения поля. Пороговое поле, выше которого возбуждается движение линий, в зависимости от его частоты – (д). Зависимость амплитуды колебания границ, магнитной вязкости и скорости границ от амплитуды поля – (е, ж, з).

Впервые прямым наблюдением за поведением тонкой структуры доменных границ было показано, что под действием переменного магнитного поля, пороговым по амплитуде поля образом, в широком диапазоне частот поля в границах возбуждается процесс непрерывной генерации и движения вертикальных блоховских линий, рис.1(а-д).

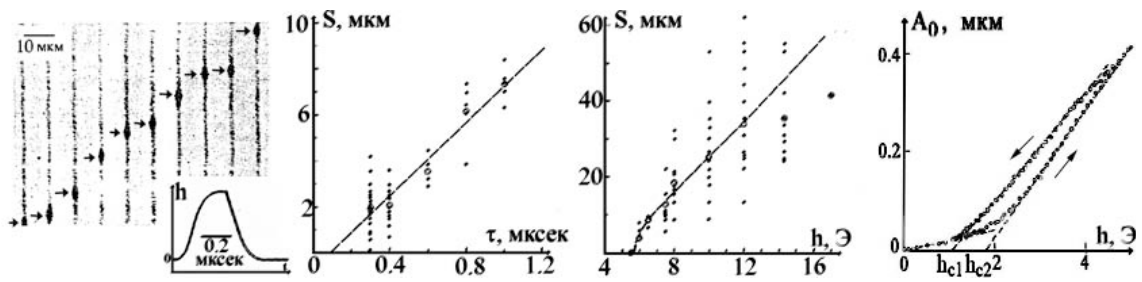


Рис. 2: (а) – смещение вертикальной линии Блоха в плёнке с перпендикулярной анизотропией (отмечена стрелкой) под действием последовательно прикладываемых импульсов поля, направленного в плоскости плёнки вдоль доменной границы (дано 10 темнопольных изображений одного того же участка границы, снятых последовательно после приложения одиночных импульсов поля, форма которых показана на вставке (фото получены при освещении красным лазерным светом, под углом 38° к плоскости границы, апертура объектива - 0.19)); (б) – вариация смещения S блоховских линий при изменении длительности τ импульсов поля ($h_x = 9$ Э); (в) – $S(h_x)$ при $\tau \simeq 0.6$ мксек. Точки - экспериментальные данные, кружки - усредненные значения, штриховая линия - расчёт. (г) – зависимость амплитуды колебания границ от амплитуды поля ($f=50$ кГц) при увеличении и уменьшении амплитуды поля; h_{c2} и h_{c1} - коэрцитивности границы при неподвижных линиях Блоха и при их движении.

Было установлено, что генерация линий и их движение происходят при любых направлениях магнитного поля, как в плоскости образцов, так и в перпендикулярном направлении, как в пластинках гранатов, так и в тонких плёнках. Генерация линий происходит не синхронно с изменением поля, за много циклов его колебаний. Такого же типа явления имеют место в системе доменных границ. Более того, аналогичные эффекты – формирование макроскопических магнитных вихревых структур – наблюдалось в пластинах ВТСП. То есть, это явление достаточно общее для магнитоупорядоченных систем и, по-видимому, имеет общую природу.

Было показано, что в пластинках ИЖГ с плоскостной намагниченностью процесс генерации линий приводит к ограничению подвижности доменных границ, рис.1(е-з), что связано с диссипацией энергии движущимися линиями. В образцах с эффектом магнитного последействия, например, в плёнках разбавленных гранатов, возбуждение движения линий приводит к увеличению амплитуды колебания границ, т.е. к увеличению подвижности границ, и к уменьшению коэрцитивности, рис.2. Эффект объяснён в рамках представления о размытии созданного точечными дефектами потенциального рельефа движущимися линиями.

В § 2.2.3 и § 2.2.4 исследовано влияние обменного взаимодействия на

кинетику перемагничивания ансамбля обменно-связанных зёрен (§ 2.2.3) [31] и обменно-связанных слоёв (§ 2.2.4) [2,3]. Рассмотрим наиболее значимый результат: влияние обменного взаимодействия на динамические характеристики процесса перемагничивания гибридных структур ферромагнетик-антиферромагнетик.

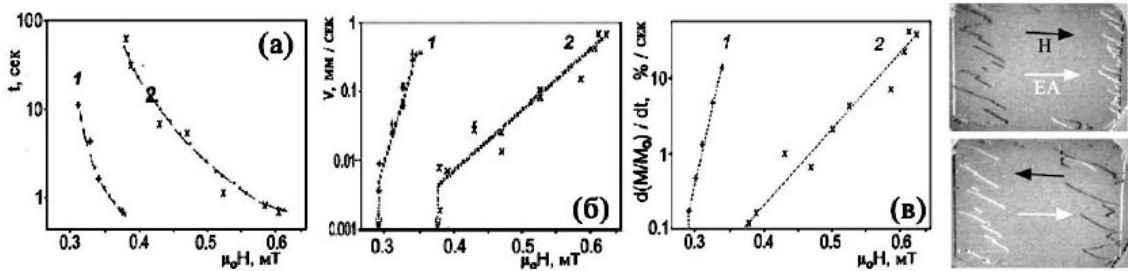


Рис. 3: (а) – зависимость времени зарождения границ от величины поля при его направлении вдоль и против оси однонаправленной анизотропии; (б) – зависимость скорости движения границ от величины поля; (в) – изменение скорости перемагничивания всего образца в поле, параллельном и антипараллельном направлению однонаправленной анизотропии; (г,д) – зигзагообразные доменные границы, сформировавшиеся при перемагничивании бислойной плёнки FeNi-FeMn в направлении вдоль и против оси легкого намагничивания. Масштаб каждого изображения – 3×2 мм. Белая стрелка - направление лёгкой оси, чёрная - направление поля.

Эксперименты проводились на двуслойных структурах FeNi-FeMn, выращенных магнетронным распылением в присутствии плоскостного магнитного поля, что обеспечило небольшую однонаправленную анизотропию слоя FeNi и его однодоменность в размагниченном состоянии. Было установлено, что свойства обменно-связанного FeNi принципиально отличаются от свойств уединенного слоя FeNi. Во-первых, коэрцитивность бислойных плёнок на порядок превышала коэрцитивность однослойных плёнок. Во вторых, движение доменных границ, за счёт зарождения и смещения которых осуществлялось перемагничивание плёнок, носило в бислойных плёнках термоактивированный характер. Максимальная скорость движения границ без их развала в неоднородную волну намагниченности не превышала 1 мм/сек. И самое главное, несмотря на слабую сформированную в процессе роста однонаправленную анизотропию, и времена зарождения границ, и скорости их движения отличались в десятки раз при направлении поля вдоль и против оси лёгкого намагничивания, рис.3. Активационные объёмы для перемагничивания вдоль и против лёгкой оси отличались в

4 раза, и в сумме давали объём, примерно равный кубу толщины ферромагнитного слоя, т.е. примерно размер зерна поликристаллического слоя FeNi. На основании экспериментальных результатов сделан вывод о том, что шероховатости интерфейса FeNi-FeMn обуславливают вариацию обменного взаимодействия между слоями, и это, в свою очередь, обуславливает шероховатый рельеф для движущихся границ, изменяя тем самым динамические магнитные характеристики FeNi.

В § 2.2.5 исследована кинетика перемагничивания монокристаллических плёнок манганита лантана, в которых напряжения несоответствия параметров решетки плёнка-подложка приводят к формированию дефектного слоя вблизи интерфейса; магнитные свойства этого слоя отличны от свойств основного слоя, и это диктует специфику процесса перемагничивания манганита лантана [1,4–8,11–13]. Было установлено, что магнитная доменная структура плёнок бистабильна: при охлаждении от температуры Кюри это лабиринтная доменная структура с перпендикулярным магнитным моментом M_s в доменах. Но устойчивым является направление M_s в плоскости плёнок вдоль направления типа $\langle 110 \rangle$. Было показано, что перемагничивание происходит за счёт зигзагообразных доменных границ, аналогичных показанным на рис.3(г-д) для пермаллоя, а движение границ, как и в пермаллое, носит термоактивированный характер. И подвижность границ, и магнитная вязкость критическим образом зависят от температуры, изменяясь на порядок при вариации температуры на $\pm 5^\circ$. И наконец, был обнаружен кроссовер на зависимости коэрцитивности от температуры, и было показано, что он соответствует изменению типа доменных границ, за счёт которых происходит перемагничивание: зигзагообразные границы спрямляются с понижением температуры, а затем распадаются на волну неоднородной намагниченности, закипающей перед подходящей границей и стираемой проходящей границей. Подобного типа границы наблюдались ранее в плёнках феррогранатов при импульсном перемагничивании и связывались с возбуждением спиновых волн границей, движущейся с предельной скоростью. Однако в данном случае диффузная граница впервые наблюдалась при квазистатически медленном перемагничивании.

В разделе 2.3 рассмотрены обнаруженные автором нелинейные возбуж-

дения магнитной доменной структуры, возникающие под действием низкочастотных магнитных полей различной ориентации: в § 2.3.1 обсуждаются резонансные преобразования доменной структуры в пластинках ИЖГ, связанные с возбуждением упругих резонансов при движении доменных границ, и их влияние на стабильность магнитной проницаемости кристаллов [47,46]; в § 2.3.2 описаны условия формирования уединённой волны намагниченности под действием переменного магнитного поля [43]; далее в §§ 2.3.3 – 2.3.6 изложены эффекты динамических изменений периода доменной структуры, возбуждения автоколебательных мод генерации и движения доменных границ [39-42, 44-45]. Показано, что все виды нелинейных возбуждений доменной структуры влияют на диссипацию энергии магнитного поля и приводят к скачкам магнитной проницаемости.

Эксперименты проводились на совершенных монокристаллических пластинках ИЖГ толщиной от 10 до 100 мкм. Использовались образцы как произвольной формы, так и прямоугольной, отношение ширины к длине которых варьировалось от 1:10 до 10:1 при линейных размерах от 0.5 до 10 мм. Исходная доменная структура - домены 180-ти градусного соседства с M_s , лежащим в плоскости пластин.

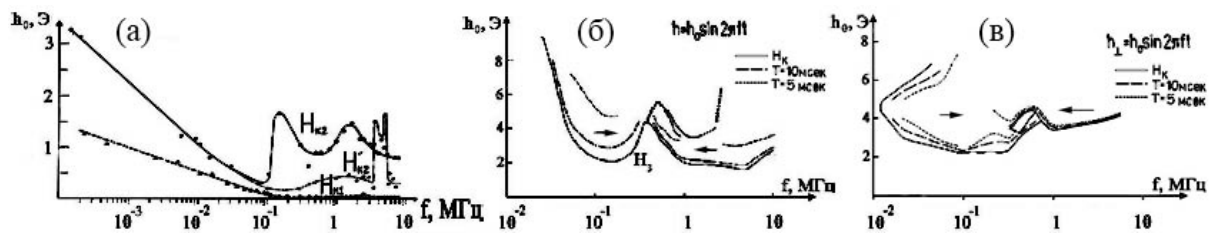


Рис. 4: Критические поля, при амплитуде выше которых происходят (а) – возбуждение генерации линий Блоха (H_{k1}) и необратимые изменения периода доменной структуры (H_{k2} при начальном числе границ 22 и H'_{k2} при начальном числе границ 28, (б) – генерация доменных границ – H_{k3} (показаны также линии, выше которых происходит генерация границ с периодом ниже 10 и 5 мсек) в поле, приложенном в плоскости пластин вдоль границ и (в) – то же в поле, перпендикулярном границам. Стрелки условно показывают, что направление дрейфа границ слева и справа от локального максимума изменяется на противоположное, т.е. работают разные источники генерации.

Было установлено, что при приложении к таким образцам низкочастотного магнитного поля, направленного в плоскости пластин, наблюдается иерархия возбуждений магнитной доменной структуры: (1) – возбуждение

непрерывной генерации линий Блоха в границах, (2) – начало неустойчивой генерации границ, приводящей к изменению их числа в образце, и (3) – начало непрерывной генерации границ. Области амплитуд и частот полей, при которых наблюдаются описанные эффекты в одной из пластин прямоугольной формы, показаны на рис.4. Надо отметить, что конкретные величины полей и частот слегка варьируются от образца к образцу, но последовательность возбуждений при развертке поля всегда одна и та же. И эти возбуждения имеют место во всех исследованных образцах ИЖГ, независимо от их формы и размеров. Частота генерации доменов, как и

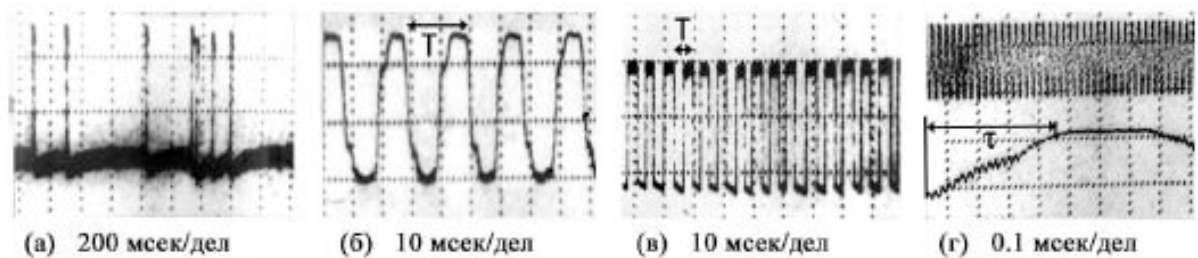


Рис. 5: Изменения магнитооптического сигнала, связанные с непрерывной генерацией доменных границ под действием синусоидального возбуждающего поля: (а) – $f = 150$ кГц, $h_0 = 2$ Э, (б) – $f = 150$ кГц, $h_0 = 2.5$ Э (ступеньки на фронтах соответствуют прохождению границ через область, выделенную широкой диафрагмой, затем – через закрытую для света область между двумя диафрагмами, а затем – через соседнюю область, выделенную узкой диафрагмой; такие ступеньки есть на всех фронтах магнитооптического сигнала, они позволяют определить направление движения границ), (в) – $f = 150$ кГц, $h_0 = 4.2$ Э, (г) – $f = 50$ кГц, $h_0 = 8.4$ Э (верхняя осциллограмма – изменение поля во времени, нижняя – магнитооптический сигнал; для удобства кривые смещены по вертикали).

частота генерации линий, зависит от параметров возбуждающего поля: амплитуды, частоты, направления, рис.5. Но генерация возникает при любом направлении поля, причём нерезонансным образом.

В заключении главы 2, в *разделе 2.4* суммируются выводы всех разделов.

В главе 3 „Проникновение магнитного потока в сверхпроводники второго рода и его релаксация“ исследуется проникновение магнитного потока в пластины высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) при намагничивании постоянным магнитным полем и при возбуждении переменным магнитным полем, а также изучается последующая релаксация

проникшего потока и факторы, влияющие на скорость релаксации.

В разделе 3.1 этой главы обсуждаются литературные данные о динамике магнитного потока в пластинах сверхпроводников при квазистатическом перемагничивании, о факторах, влияющих на распределение и релаксацию потока. Подробно рассмотрены динамические вихревые структуры, формирующиеся в переменном магнитном поле. Обсуждаются аналогии между динамическими процессами в сверхпроводниках и магнетиках. На основании обсуждения литературных данных формулируются задачи исследования.

В разделе 3.2 описаны результаты экспериментального исследования квазистатических конфигураций магнитного потока в тонких пластинах и объёмных ВТСП, изучены факторы, влияющие на пиннинг вихрей и релаксацию проникшего магнитного потока [16-20,24,25,27,32].

В §§ 3.2.1, 3.2.2 изучены природа пиннинга и факторы, определяющие анизотропию критического тока в текстурированных плавлением керамиках YBCO. На основании экспериментальных данных, рис.6(а), делается вывод, что пиннинг в керамиках при $T < T_k = 80$ К определяется распределением включений, пор и точечных дефектов, а при более высокой температуре – закреплением вихрей на плоских и линейных дефектах. Установлено, что границы между кристаллитами, формирующими макроскопические зёрна в текстурированной керамике, выступают в роли слабых связей при углах разориентации между кристаллитами больше 10° . Показано, что обнаруженная смена механизма пиннинга при $T = T_k$ определяет аномальную для YBCO зависимость анизотропии критического тока от температуры: резкое возрастание анизотропии с ростом температуры выше $T = T_k$, рис.6(б).

В § 3.2.3 изучено влияние слабых связей на скорость релаксации проникшего и захваченного магнитного потока в кольцах, вырезанных из текстурированного YBCO. Установлено, что при наличии слабых связей величина захваченного потока является нелинейной функцией приложенного поля, рис.6(в). До тех пор, пока поле не превышает величину поля полного проникновения потока в кольцо по слабой связи – захваченный поток увеличивается пропорционально полю. Дальнейшее увеличение поля не толь-

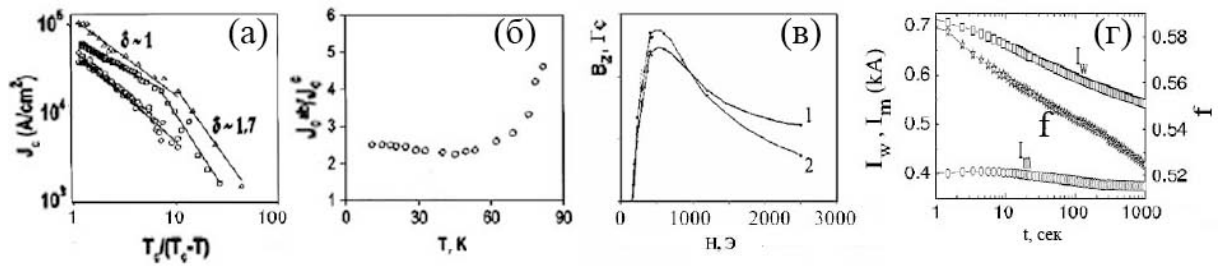


Рис. 6: (а) – изменение критического тока с температурой в трёх зёрнах плавленной керамики, (б) – анизотропия токов, (в) – изменение захвата потока в зависимости от величины приложенного поля (1-весь поток, 2-поток в центре), (г) – релаксация тока по слабой связи, внутризёрненного тока и их отношение - f .

ко не приводит к увеличению захвата, а даже его уменьшает, поскольку сверхпроводимость по слабой связи разрушается сильным полем, и поток успевает выйти из кольца за время выключения поля. Установлено, что скорость релаксации потока, захваченного после охлаждения в поле выше, чем после импульсного намагничивания кольца полем той же величины. Установлено, что релаксация по слабым связям происходит значительно быстрее, чем в объёме материала, рис.6(г).

В § 3.2.4 изучено влияние конфигурации магнитного потока и формы образцов на скорость релаксации. Показано и обосновано численным расчётом, что в тонких пластинках релаксация при частичном проникновении потока происходит неоднородно по образцу: крип экранирующего тока происходит только на внешнем фронте потока. В толстых пластинах распад тока одинаков по всему образцу. При полном проникновении потока крип (после выключения поля) начинается с меньшей задержкой по времени и идёт с большей скоростью, чем при частичном проникновении.

В § 3.2.5 изучена специфика перемагничивания и релаксации магнитного потока в пластинах BSCCO:Рь. Установлено, что при $T < T_m = 54$ К в ab -плоскости имеется небольшая анизотропия тока, не превышающая 2, но в наклонном поле, как и в пластинах YBCO, появляется значительная анизотропия проникновения, величина которой зависит от температуры и от величины плоскостного поля, рис.7. Поток вдоль плоскостного поля H_{ab} распространяется на большую глубину, чем поперёк него. Релаксация экранирующего тока также становится анизотропной. Релаксация экранирующего

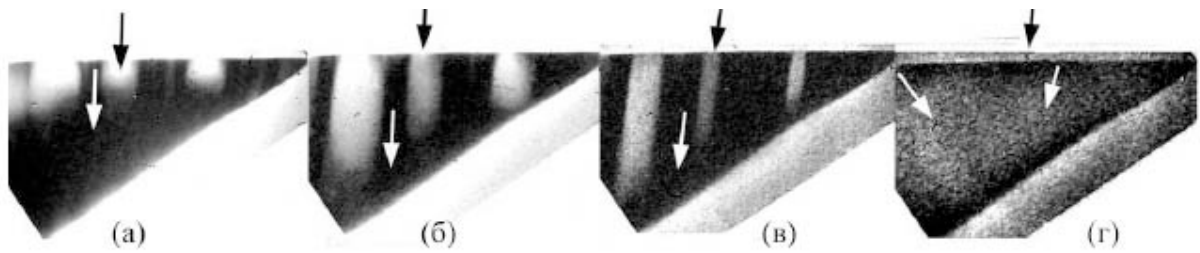


Рис. 7: Проникновение наклонного поля в пластинку монокристалла BSCCO:Pb через слабые точки на краю кристалла при $H_{ab} = 1800$ Э и (а) – $T = 17$ К, $H_z = 302$ Э, (б) – $T = 29$ К, $H_z = 154$ Э, (в) – $T = 56$ К, $H_z = 54$ Э, (г) – $T = 56$ К, $H_z = 402$ Э.

щего тока, текущего вдоль H_{ab} , замедляется с увеличением H_{ab} вплоть до полной остановки. Поперечный ток релаксирует тем быстрее, чем больше H_{ab} . Однако при $T \geq T_m$ любая корреляция с плоскостным полем исчезает. Поток прорывается в кристалл в одной из слабых точек на краю и устремляется к центру кристалла, постепенно заполняя кристалл до краев. На основании проведенных расчётов делается вывод, что T_m является точкой фазового перехода, связанного с резким снижением корреляций в положении вихрей в различных CuO плоскостях, т.е. с переходом от трёхмерного поведения вихрей к двумерному.

В разделе 3.3 исследуются неравновесные вихревые конфигурации магнитного потока, формирующиеся в переменных магнитных полях, и их влияние на релаксацию. В конце главы на основании полученных результатов делается заключение о природе и роли нелинейных возбуждений в сверхпроводниках.

В § 3.3.1 обсуждаются условия формирования обнаруженных автором макроскопических капель магнитного потока в пластинах BSCCO. Формирование капель вихрей (или бризеров) наблюдается при накачке перпендикулярного низкочастотного магнитного поля в точках пересечения планарных дефектов. Магнитный поток в каплях и размер капель возрастают по мере накачки поля постоянной амплитуды. Когда поток в капле достигает некоторой критической величины, капля теряет свою стабильность, теряет часть захваченного потока и смещается вдоль планарного дефекта. В той же дефектной точке начинает формироваться новая капля, несущая поток противоположного знака, и так далее. В результате формируется це-

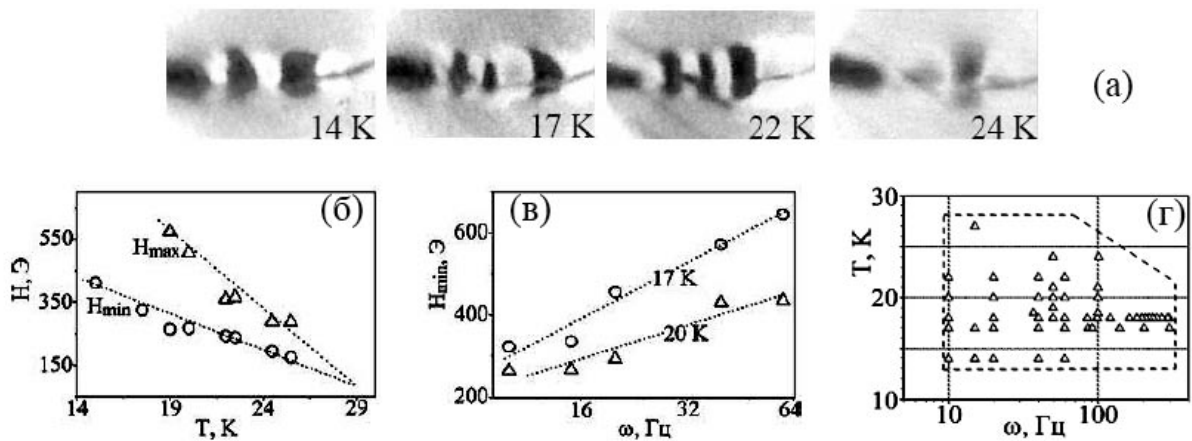


Рис. 8: Макроскопические капли вихрей, сформировавшиеся на одном и том же дефекте, при различных температурах и условия формирования капель: максимальная и минимальная амплитуды поля от температуры и от частоты, а также область температур и частот (обведена пунктиром). $H_{ab} = 1800$ Э, (а) – $T = 17$ К, $H_z = 302$ Э, (б) – $T = 29$ К, $H_z = 154$ Э, (в) – $T = 56$ К, $H_z = 54$ Э, (г) – $T = 56$ К, $H_z = 402$ Э.

почка капель, как бы нанизанных на планарный дефект, рис.8. Эффект и визуально, и по сути аналогичен генерации блоховских линий в доменной границе, описанный в § 3.3.1. Эффект формирования капель рассмотрен теоретически, и показано, что капли возникают при условии, что на слабой связи имеется локальная область с пониженными сверхпроводящими свойствами, релаксация потока вдоль слабой связи происходит быстрее, чем в других направлениях, и время перехода к равновесному состоянию мало или сравнимо с периодом возбуждающего поля. Прямые линии на рис.8(б,в)– результат расчёта.

В § 3.3.2 изучены условия формирования твистеров – макроскопических знакопеременных полос потока, входящего в пластинки YBCO при качании плоскостного магнитного поля. Изучены зависимость размера и формы структур от величины плоскостного поля, от угла качания, от размера и формы пластин. Показано, что природа образования твистерных вихревых структур в YBCO аналогична природе образования макроскопических капель магнитного потока в монокристаллах BSCCO, а их стабильность также определяется магнитостатическими взаимодействиями. Эффект также родственен генерации доменов в пластинке ИЖГ.

В Заключении суммируются основные выводы работы:

1. В процессе выполнения работы предложено два новых метода исследования: метод анизотропной темнопольной диффракции наблюдения тонкой структуры доменных границ в ферромагнитных плёнках с перпендикулярной анизотропией и метод определения внутригранульных и межгранульных токов в текстурированных керамиках.

2. Проведено экспериментальное изучение кинетики перемагничивания и поведения доменной структуры ферромагнетиков в тонких монокристаллических пластинах и плёнках. Выявлены основные факторы, влияющие на динамический отклик магнетиков на изменение внешнего поля.

а. Впервые прямыми наблюдениями показано, что динамика доменных границ даже при низкой частоте колебания и при скорости движения много меньше предельной определяется нелинейными возбуждениями тонкой структуры доменных границ - генерацией и движением блоховских линий. Установлено, что в совершенных монокристаллических плёнках эти возбуждения приводят к ограничению подвижности границ, как и предсказывалось теорией, но в кристаллах с эффектом магнитного последействия возбуждение движения блоховских линий приводит к увеличению подвижности границ.

б. Обнаружены эффекты динамического преобразования доменной структуры магнитного диэлектрика в переменном магнитном поле, заключающиеся в изменении периода доменной структуры и в качественном изменении типа структуры. Определены области амплитуд-частот возбуждающих полей, при которых трансформация структуры имеет место. Показано, что эффект однозначно связан с возникновением нелинейных возбуждений в доменных границах. Качественные преобразования структуры, возникающие в достаточно больших переменных магнитных полях, обусловлены возбуждением упругих резонансов.

в. Обнаружено, что под действием переменного магнитного поля, приложенного в любом направлении в плоскости пластин, в широком диапазоне частот переменного поля, пороговым по амплитуде поля образом, возбуж-

дается процесс непрерывной генерации границ.

г. Изучено влияние динамических изменений состояния доменной структуры на магнитную проницаемость. Показано, что и преобразования структуры, и возбуждение генерации границ приводит к временной нестабильности магнитных характеристик кристаллов.

3. Выполнено экспериментальное исследование кинетики перемагничивания поликристаллических тонких и ультратонких двухфазных магнитных плёнок. Показано, что и кинетика перемагничивания таких плёнок, и динамические характеристики процесса в значительной мере определяются межзерненным обменным взаимодействием или вариацией обменного взаимодействия вблизи поверхности пленки.

а. Экспериментально показано и теоретически подтверждено, что обменное взаимодействие между зёрнами определяет механизм перемагничивания поликристаллических плёнок: при слабом обмене перемагничивание происходит за счет неоднородного вращения намагниченности, при достаточно сильном, как и в монокристаллических пленках – за счет зарождения и движения доменных границ с последующим доворотом магнитных моментов к направлению поля. В пленках $\text{Co}_x\text{Ni}_{100-x}$ смена механизма перемагничивания приводит к немонотонной зависимости коэрцитивности и остаточной намагниченности от x .

б. Экспериментально изучено влияние близости антиферромагнитного слоя на кинетику перемагничивания поликристаллического нанослоя пермаллоя. Обнаружено, что динамические характеристики процесса перемагничивания магнитомягкого слоя изменяются критическим образом по сравнению с таким же нанослоем пермаллоя без обменной связи с антиферромагнетиком. На порядки увеличиваются времена зарождения доменных границ, замедляется скорость движения границ, появляется асимметрия динамических характеристик при перемагничивании в направлении однонаправленной анизотропии и против неё.

в. Обнаружена бистабильность магнитной доменной структуры ультратонких плёнок манганита лантана, выращенных на подложках LAO. Показано, что движение границ в таких плёнках носит термоактивационный

характер. Определены скорости движения границ, активационные объёмы, магнитная вязкость и их изменение с температурой. При понижении температуры ниже 220 К обнаружено появление границ диффузного типа, которые ранее в магнетиках наблюдались лишь при сверхбыстром перемагничивании.

4. Проведено экспериментальное исследование кинетики перемагничивания сверхпроводников второго рода (монокристаллов и текстурированных материалов) в медленно изменяющихся магнитных полях, и выявлены основные факторы, влияющие на их отклик при изменении внешнего магнитного поля.

а. В текстурированной плавлением керамике YBCO в широком диапазоне температур изучена кинетика перемагничивания и захвата потока. Установлено, что в объемном текстурированном материале границы между кристаллитами с углом разориентации больше 10° обладают пониженными проводящими свойствами. Установлено, что в области низких температур пиннинг вихрей описывается моделью коллективного пиннинга на точечных дефектах, а при высоких температурах - пиннингом на протяженных дефектах.

б. В текстурированных керамиках обнаружено аномальное изменение анизотропии критических токов с температурой. Показано, что возрастание анизотропии при приближении к T_c связано со свойствами границ между кристаллитами, образующими текстурированные домены. Обнаружено, что релаксация тока по слабым связям идет в несколько раз быстрее, чем внутризеренного тока. Таким образом, впервые напрямую показано, что роль слабых связей в материале не сводится только к уменьшению захвата потока или ограничению протекающего тока, наличие слабых связей определяет диссипацию в системе.

в. Установлено, что релаксация потока зависит от его конфигурации. Показано, что варьируя форму сверхпроводников, можно оптимизировать релаксацию захваченного потока.

г. Изучено проникновение наклонного поля и его релаксация в пластинах текстурированной керамики YBCO, монокристаллов YBCO и анизо-

тропных монокристаллов BSCCO, допированных свинцом. Обнаружено, что во всех типах пластин наблюдаются не только анизотропия проникновения потока, пропорциональная углу наклона поля, но и анизотропия релаксации потока и экранирующего тока. Наблюдается усиление крипа тока, текущего поперек плоскостной компоненты поля, и практически остановка релаксации тока, текущего вдоль плоскостного поля.

д. Показано, что в монокристаллах BSCCO:Pb при $T < T_m = 54$ К имеет место сильная межплоскостная корреляция вихрей, которая исчезает при $T \geq T_m$. На основании выполненных теоретических оценок сделан вывод о наблюдении 3D-2D фазового перехода в вихревой системе при $T = T_m$.

5. Исследована кинетика перемагничивания тонких монокристаллических пластин сверхпроводников 2-го рода в переменных магнитных полях.

а. Подробно исследовано формирование вихревых динамических структур - твистеров в качающихся магнитных полях, наблюдаемое в тонких монокристаллических пластинах YBCO. На основании полученных данных сделан вывод о природе динамической самоорганизации.

б. Обнаружен и всесторонне изучен новый тип самоорганизации вихревой материи – формирование макроскопических капель магнитного потока под действием переменного магнитного поля в монокристаллах BSCCO. Показана определяющая роль магнитостатических полей рассеяния в формировании и стабильности структуры.

в. Показано, что формирование вихревых динамических структур приводит к изменению характера релаксации в системе, делает релаксацию пространственно неоднородной, неравномерной во времени.

6. Основной результат работы - обнаружение и исследование неравновесных макроскопических динамических структур в диссипативных магнитно-упорядоченных магнитоактивных системах (вихревая система в сверхпроводниках второго рода, магнитная доменная структура в ферромагнетиках) под действием переменного магнитного поля.

а. Как показано в диссертационной работе, все виды самоорганизации неравновесных метастабильных структур, изменяют диссипативные свой-

ства системы и проявляются в скачках магнитной проницаемости, влияют на скорость релаксации к основному состоянию.

б. В работе обращается внимание на тот факт, что между динамическими процессами при перемагничивании ферромагнетиков и сверхпроводников существуют аналогии. Так, определенная аналогия существует между такими эффектами в ферромагнетиках, как нерезонансная генерация блоховских линий в плёнках и тонких пластинках, с одной стороны, и генерацией вихревых капель на дефектах в ВТСП, с другой. Ещё одна аналогия – явления в скрещенных магнитных полях: твистеры в пластинках ВТСП и генерация доменных границ в пластинках феррограната с плоскостной анизотропией. Эти аналогии могут быть полезны для более глубокого понимания описанных выше непростых и важных эффектов, влияющих на макроскопические характеристики магнитоактивных сред.

Литература

- L1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. К теории дисперсии магнитной проницаемости. - В кн. Ландау Л.Д., Сб. трудов, М., Наука, 1969, т.1., с. 128-143.
- L2. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. - М., Л., Гостехиздат. 1948г. 816 с.
- L3. Дикштейн И.Е., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Тарасенко В.В. Типы неустойчивостей в упорядоченных доменных структурах. *ЖЭТФ* **100**, 205-223 (1991).
- L4. Bao-Shan Han, Dan Li, De-Juan Zheng, Yan Zhou. Fractal study of magnetic domain patterns. *Phys. Rev. B* **66**, 014433-1 – 014433-5, (2002).
- L5. Babcock K.L., Westervelt R.M. Topological "melting" of cellular domain lattices in magnetic garnet films. *Phys. Rev. Lett.* **63**, 175, (1989).
- L6. Dötsch H. Stability and dynamics of microwave generated ring domains. *AIP Conf. Proc.*, **29**, 78-84, (1976).
- L7. Кандаурова Г.С. Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов. *УФН* **172**, 1165-1187, (2001).
- L8. Mints R.G., Rakhmanov A.L. Critical state stability in type-II superconductors and superconducting-normal-metal composites. *Rev. Mod. Phys.* **53**, 551-592 (1981).

L9. Vlasko-Vlasov V.K., Nikitenko V.I., Polyanskii A.A., Crabtree G.W., Welp U., Weal B.V. Macroturbulence in high-Tc superconductors. *Physica C*, **222**, 361 (1994).

L10. Indenbom M.V., van der Beek C.J., Berseth V., Benoit W., D'Anna G., Erb A., Walker E., Flükiger R. Magneto-optical observation of twisted vortices in type-II superconductors. *Nature* **385**, 702-705 (1997).

L11. Feinberg D. Vortex lines in layered superconductors. I. From 3D to 2D behaviour. *J. Phys III (France)*, **4**, 169-208 (1994).

L12. Mikitik G.P., Brandt E.H. Asymmetry of magnetic-field profiles in superconducting strips. *Phys. Rev. B* **72**, 064506 (2005).

Список публикаций основных результатов диссертационной работы

1. Uspenskaya L.S., Tikhomirov O.A., Nurgaliev T. Transformations of head-to-head domain walls in (La,Sr)MnO₃ thin films. *Journ. Appl. Phys.* **109**, 113901 (2011).

2. Успенская Л.С., Рахманов А.Л. Динамические магнитные структуры в сверхпроводниках и ферромагнетиках. *УФН* **155** в.5 (2012) (обзор принят к публикации 21 сентября 2011 г.);

3. Успенская Л.С. Асимметричная кинетика перемагничивания тонких обменно-связанных пленок ферромагнетика. *ФТТ* **52** 2131 (2010);

4. Успенская Л.С. Асимметричная динамика доменных границ в тонких обменно-связанных пленках ферромагнетика. *Известия РАН, сер. физич.* **74** 744 (2010);

5. Uspenskaya L.S., Nurgaliev T., Miteva S. Temperature dependence of magnetization reversal of thin manganite film. *Acta Phys. Pol. A* **117** No.1 207 (2010);

6. Nurgaliev T., Mateev E., Blagoev B., Miteva S., Neshkov L., Strbik V., Uspenskaya L.S., Benacka S., Chromik S., Nedkov I. YBCO and LSMO nano-films and sandwiches prepared by magnetron sputtering. *J.Phys.: Conf.Ser.* **234** 012029 (2010);

7. Uspenskaya L.S., Nurgaliev T., Miteva S. Finite size effects on magnetic flux penetration into YBCO/LSMO hybrids. *J.Phys.: Conf.Ser.* **234** 012046

(2010);

8. Blagoev B., Mateev E., Strbik V., Nurgaliev T., Uspenskaya L.S. Magnetron sputtering of polycrystalline LSMO/YBCO structures on sapphire substrates. *J.Phys: Conf.Ser.* **223** 012015 (2010);

9. Uspenskaya L.S., Nurgaliev T., Miteva S. Domain wall dynamics in ultra thin manganite film. *J.Phys: Conf. Ser.* **200** 042025 (2010);

10. Uspenskaya L.S., Rakhmanov A.L. Self-organized structure of vortex droplets in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystals induced by ac magnetic field. *Phys. Rev. B* **79** 144524 (2009);

11. Uspenskaya L.S., Nurgaliev T., Miteva S. Magnetization reversal of thin $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganite films grown on LaAlO_3 . *J. Phys. D* **42** 185006 (2009);

12. Успенская Л.С., Курбатова И.В., Нургалиев Т., Митева С. Кинетика перемагничивания тонкой пленки манганита $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. *Известия РАН, сер. физич.* **73** 1172 (2009);

13. Успенская Л.С., Нургалиев Т., Благоев Б., Дончев Т., Митева С. Особенности перемагничивания гетероструктур LSMO/YBCO. *Известия РАН, сер. физич.* **72** 572 (2008);

14. Uspenskaya L.S., Rakhmanov A.L. Macroscopic vortex droplets in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ crystal pumped by AC magnetic field. *Phys. Rev. Lett.* **100** 137002 (2008);

15. Uspenskaya L.S., Kontuganov D.N. Twisting waves in bulk YBCO. *Physica C* **460-462** 1288 (2007);

16. Успенская Л.С., Контуганов Д.Н., Кулаков А.Б. Особенности релаксации знакопеременного потока в пластинах YBCO. *Известия РАН, сер. физ.* **71** 1171 (2007);

17. Uspenskaya L., Korolev K., Kontuganov D. Peculiarity of magnetization relaxation in finite size superconductors (II). *J.Phys: Conf.Ser.* **43** 599 (2006);

18. Успенская Л.С. Релаксация критического состояния в сверхпроводниках второго рода. *Сверхпроводимость: исследования и разработки*, **12** 59 (2006);

19. Prikhna T.A., Gawalek W., Novikov N.V., Moshchil V.E., Sverdun V.B., Sergienko N.V., Surzhenko A.B., Uspenskaya L.S., Vznichenko R., Kordyuk

A.A., Litzkendorf D., Habisreuther T., Krachunovska S., Vlasenko V. Formation of superconducting junctions in MT-YBCO. *Supercond. Sci. Technol.* **18** S153-S157 (2005);

20. Uspenskaya L., Korolev K., Yarykin P.N. Peculiarity of magnetization relaxation in finite size superconductors (I). *Physica C* **423** 181 (2005);

21. Uspenskaya L.S., Kulakov A.B., Rakhmanov A.L. Strong 3D Correlations in the Vortex System of Bi2212:Pb?, *Nato Science Series II* **142** 103 (2004); Kluwer publisher;

22. Uspenskaya L.S., Kulakov A.B., Rakhmanov A.L. Anisotropic flux creep in Bi2212:Pb single crystal in crossed magnetic fields. *Physica C* **402** 136 (2004); arXiv:cond-mat/0309451 v1, 2003;

23. Uspenskaya L.S., Kulakov A.B., Rakhmanov A.L. Crossover in magnetization behavior of Bi2212:Pb single crystal. *Journ. Magn. Magn. Mat.* **272-276** E1089 (2004);

24. Prikhna T.A., Gawalek W., Moshchil V.E., Uspenskaya L.S., Voznichenko R., Sergienko N.V., Kordyuk A.A., Sverdun V.B., Surzhenko A.B., Litzkendorf D., Habisreuther T., Vlasenko V. Superconducting joining of MT-YBCO. *Physica C* **392-396** 432 (2003);

25. Uspenskaya L.S., Naumenko I.G., Emelchenko G.A., Boguslavskii Yu.B., Zver'kov S.A., Yakimov E.B., Litzkendorf D., Gawalek W., Caplin A.D. Effect of mesoscopic inhomogeneities on the critical current of bulk melt-textured YBaCuO. *Physica C* **390/2** 127 (2003); arXiv:cond-mat/0303296, (2003);

26. Uspenskaya L.S., Kulakov A.B., Rakhmanov A.L. Strong three-dimensional correlations in the vortex system for $(\text{Bi}_{0.7}\text{Pb}_{0.3})_{2.2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$. *Phys. Rev. B* **68** 104506 (2003); arXiv:cond-mat/0303103 v1, (2003);

27. Surzhenko A.B., Zeisberger M., Gawalek W., Uspenskaya L.S. Inter- and intra-grain currents in bulk melt-grown YBaCuO rings. *Phys. Rev. B* **68** 64504 (2003); arXiv:cond-mat/0212533 v1, (2002);

28. Успенская Л.С., Кулаков А.Б., Рахманов А.Л. Фазовый переход в системе вихрей монокристалла Bi2212:Pb. *Письма ЖЭТФ* **76** 214 (2002);

29. Indenbom M.V., Uspenskaya L.S., van der Beek C.J., Konczykowski M.. Visualization of magnetic structures in superconductors and magnetic materials using magneto-optical garnet films. *Trans. Magn. Soc. Japan* **2** No.4 244-247

(2002);

30. Khapikov A., Uspenskaya L., Bdikin I., Mukovskii Ya., Karabashev S., Shulyaev D., Arsenov A. Magnetic Domains and Twin Structure of the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ single crystal. *Appl. Phys. Lett.* **77** 2376 (2000);

31. Khapikov A., Uspenskaya L., Ebothe J., Vilain S. Change of the magnetization reversal mechanism of polycrystalline Ni-Co thin films. *Phys. Rev. B* **57** 14990 (1998);

32. Uspenskaya L., Vlasko-Vlasov V., Nikitenko V., Johanson T. Magneto-optical Study of Melt Processed YBaCuO . *Phys. Rev. B* **56** 11979 (1997);

33. Khapikov A., Uspenskaya L., Vlasko-Vlasov V. Diffusion-damped Bloch lines motion and their influence on the domain wall relaxation. *Journ. Magn. Magn. Mat.* **140-144** 1865 (1995);

34. Власко-Власов В.К., Успенская Л.С., Хапиков А.Ф. Влияние тонкой структуры доменных границ на их стабилизацию, определяемую эффектами магнитного последствия. *ФТТ* **36** 2253 (1994);

35. Власко-Власов В.К., Успенская Л.С. Изучение движения вертикальных блоховских линий методом магнитооптической дифракции. *ЖЭТФ* **101** 944 (1992);

36. Vlasko-Vlasov V., Uspenskaya L. Magneto-optic diffraction study of the Bloch line behaviour in bubble films. *ФНТ* **18** S365 (1992);

37. Власко-Власов В.К., Успенская Л.С. Дифракционное изображение тонкой структуры доменных границ в одноосной магнитной пленке. *Кристаллография* **35** 1261 (1990);

38. Vlasko-Vlasov V.K., Nikitenko V.I., Tikhomirov O.A., Uspenskaia L.S. On the possibility of operation with 180-degree domain walls lattice using ac-fields. *IEEE Trans. on Magn.* **23** 168 (1987);

39. Власко-Власов В.К., Успенская Л.С. Автоколебательный режим генерации доменных границ в ферримагнетике. *ЖЭТФ* **91** 1483 (1986);

40. Власко-Власов В.К., Успенская Л.С. Динамические преобразования доменной структуры ферромагнетика в переменных магнитных полях. *ЖЭТФ* **90** 1755 (1986);

41. Vlasko-Vlasov V.K., Dedukh L.M., Nikitenko V.I., Uspenskaia L.S. Generation of domain walls in ferrimagnetic. *Acta Phys. Pol. A* **68** 53 (1985);

42. Vlasko-Vlasov V., Uspenskaya L. Dynamic behavior of domain structure in a magnetodielectric under ac-field. *Journ. Magn. Magn. Mat.* **44** 269 (1984);
43. Vlasko-Vlasov V., Uspenskaya L. Direct experimental observation of a localized wave of magnetization in a ferrimagnetic. *Phys. Stat. Sol.(b)* **120** K1 (1983);
44. Vlasko-Vlasov V., Uspenskaya L. Dynamic changes of the domain structure period in magnetic dielectric. *Phys. Stat. Sol.(a)* **75** K125 (1983);
45. Власко-Власов В.К., Дедух Л.М., Никитенко В.И., Успенская Л.С. Динамические изменения периода доменной структуры в пластинках иттриевого феррограната. *ФТТ* **24** 1255 (1982);
46. Власко-Власов В.К., Дедух Л.М., Никитенко В.И., Успенская Л.С. Динамическая резонансная перестройка доменной структуры иттриевого феррограната в переменном магнитном поле. *Письма ЖТФ* **8** 146 (1982);
47. Vlasko-Vlasov V.K., Dedukh L.M., Nikitenko V.I., Uspenskaia L.S. Dynamic Resonant Domain Structure in YIG Single Crystals. *Phys. Stat. Sol.(a)* **67** K107 (1981);
48. Дедух Л.М., Никитенко В.И., Полянский А.А., Успенская Л.С. Прямое исследование влияния динамического изменения структуры блоховской стенки на ее подвижность. *Письма ЖЭТФ* **26** 452 (1977).