

На правах рукописи

ШУЛЬГА НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В МАТЕРИАЛАХ С МАГНИТНЫМИ
И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа – 2008

Работа выполнена в лаборатории антиферромагнетиков и ферритов Института физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской Академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Дорошенко Рюрик Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Вахитов Роберт Миннисламович

кандидат физико-математических наук, с.н.с.
Виноградова Галина Игоревна

Ведущая организация: Челябинский Государственный Университет,
г. Челябинск

Защита диссертации состоится 31 октября 2008 года в 16 часов на заседании диссертационного совета ДМ 002.099.01 при Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН по адресу 450075, г. Уфа, пр. Октября, 71; телефон, факс (347)2359522.

Отзывы направлять по адресу: 450075, г. Уфа, пр. Октября, 151, ИФМК УНЦ РАН, диссертационный совет.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН.

Автореферат разослан «17» сентября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Ломакин Г.С.

Актуальность темы. В работе исследуются высокочастотные динамические свойства магнитоупорядоченных систем трех типов: магнетики с доменной структурой, материалы с неоднородностями магнитной анизотропии и многослойные магнитные плёнки. Ферромагнитный резонанс в магнетиках с доменной структурой изучается уже более пятидесяти лет, актуальными остаются задачи: точный расчёт распределения намагниченности в основном состоянии и адекватный учёт неоднородности распределения намагниченности при описании динамических свойств. Расчёт размагничивающего поля для полосовой доменной структуры в пластине конечной толщины начиная с Киттеля [2] производился на основе формул в виде рядов Фурье. В работе [3] размагничивающее поле двумерного периодического распределения намагниченности при произвольной зависимости намагниченности от всех координат выражено через аналитические функции. Расчёт ферромагнитного резонанса (ФМР) в конечном образце и при произвольном распределении намагниченности возможен только численно. Первые работы, в которых осуществлён подобный расчёт ФМР для различных магнитных структур, появились в последнее десятилетие [5,8].

Интерес к ферромагнитному резонансу в материалах с неоднородностями магнитной анизотропии обусловлен имеющимся несоответствием между результатами статических и динамических исследований и особенной чувствительностью динамических методов к неоднородности магнитной анизотропии. Представляло интерес объяснить результаты экспериментальных работ, в которых изучалось воздействие света на резонансные свойства ферромагнетика [10-12].

Многослойные магнитные плёнки широко исследуются в последнее время в связи с развитием электронных устройств на их основе. Важную роль в определении их основных характеристик играют методы, связанные с использованием ферромагнитного резонанса. Сложность в изучении подобных структур связана с необходимостью адекватного учёта условий на границе образца, особенно на внутренней границе, где необходим учёт межслойного обменного взаимодействия и неоднородности намагниченности.

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование ферромагнитного резонанса в широком классе неоднородных магнитных материалов: в ограниченной ферромагнитной пластине, обладающей доменной структурой с блоховскими и неелевскими доменными границами; в пластине с высоким фактором качества, обладающей полосовой доменной структурой с блоховскими доменными границами при учёте неоднородности размагничивающего поля; в кубическом магнетике при наличии анизотропных центров; в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке с

анизотропией слоев “легкая плоскость” и “легкая ось”. При этом решалась задача вычисления равновесного распределения намагниченности в двухслойной обменно-связанной плёнке.

Научная новизна. Изучено влияние структуры доменной границы на ФМР доменов. Впервые проведено численное исследование влияния особенностей распределения размагничивающего поля пластины с доменной структурой на ФМР в зависимости от параметров задачи: относительной толщины пластины, относительного размера доменов.

Исследовано влияние анизотропных центров, отличающихся направлением ОЛН вдоль одной из четырёх тригональных осей на ферромагнитный резонанс в кубическом магнетике.

Аналитически решена задача о распределении намагниченности в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке с анизотропией слоев “легкая плоскость” и “легкая ось”. Обобщён метод исследования ФМР в двухслойной плёнке для расчёта комбинированной магнитной анизотропии и произвольной ориентации равновесной намагниченности в слоях.

Научная и практическая ценность работы. Результаты работы расширяют наши представления о влиянии особенностей доменных границ, формы ферромагнитной пластины и неоднородности размагничивающего поля на ФМР. Аналитическое решение задачи о распределении намагниченности в двухслойной обменно-связанной пленке может быть использовано как приближенное решение при численном анализе более сложных многослойных магнитных структур. Обобщённая модель ФМР в двухслойной обменно-связанной пленке позволяет интерпретировать экспериментальные данные реальных образцов с комбинированной анизотропией: объяснять спектры ФМР в многослойных пленках, толщина слоёв в которых больше ширины неоднородности намагниченности.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Различие в зависимости частоты ферромагнитного резонанса от магнитного поля в пластинах с доменной структурой с неелевскими и блоховскими доменными границами, ярко проявляемое в тонких пластинах.
- 2) Результаты численного моделирования ФМР в пластине с высоким фактором качества, обладающей полосовой доменной структурой с блоховскими доменными границами: появление дополнительных пиков в спектре ФМР, смещение основных мод и дополнительных пиков, а также изменение их амплитуды при различных толщинах пластины и соотношении ширины доменов, обусловленное соответствующими неоднородностями размагничивающего поля.
- 3) Расчёт неоднородного распределения намагниченности и ФМР в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке конечной

толщины в магнитном поле при наличии комбинированной анизотропии в слоях.

Достоверность результатов обеспечивается корректностью математической постановки задачи, качественным и количественным соответствием ряда полученных результатов экспериментальным данным. В предельных случаях они соответствуют результатам ранее опубликованных работ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись на региональной конференции «Резонансные и нелинейные явления в конденсированных средах» (Уфа, 1999г.); конференции для студентов, аспирантов и молодых учёных по математике и физике (Уфа, 2001г., 2003г.); Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» «Eastmag-2001» (Екатеринбург, 2001г.); школе-семинаре "Новые магнитные материалы микроэлектроники" (г. Москва, 2002г., 2004г. и 2006г.); Moscow International Symposium of Magnetism "MISM-2008" (г. Москва, 2008г.).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 11 работах.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и насчитывает 108 страниц, включая 34 рисунка и 90 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование темы диссертации, показана актуальность решаемых задач, их научная новизна и практическая ценность, перечислены выносимые на защиту положения.

В первой главе вводятся основные понятия и определения, необходимые для описания ферромагнитного резонанса. Рассмотрены виды неоднородных магнитных материалов. Приведён обзор литературы, посвящённой теории ферромагнитного резонанса в материалах с доменной структурой и многослойных магнитных материалах, современным методам численного расчёта ФМР.

Во второй главе приведены результаты изучения ФМР в ограниченной во всех направлениях ферромагнитной пластине (110) прямоугольной формы кубического ферромагнетика с осями легкого намагничивания вдоль тригональных направлений в магнитном поле $[-110]$. Ферромагнитный резонанс рассчитан для предложенной в [9] вычислительной модели, в которой магнитостатическая энергия образца записывается в виде линейной комбинации энергий пластин, соответствующих трем перпендикулярным граням образца. Частота ФМР определялась из условия разрешимости линеаризованной системы уравнений Эйлера-Лагранжа, в соответствии с методикой работы [1].

Для доменных структур с границами неелевского и блоховского типов построены зависимости частоты ФМР от внешнего магнитного поля. Одновременный расчёт энергии доменной структуры и частот ФМР позволил установить соответствие между типом доменной структуры, параметрами пластины и картиной ферромагнитного резонанса. Например, для тонкой пластины (рис. 1) можно наблюдать визуальное различие в зависимостях частоты ФМР для блоховской и неелевской структур. В более толстых пластинах эти кривые сливаются. Различие между частотами для доменных структур разных типов больше у образцов с низким фактором качества Q (кривые 0.05N и 0.05B на рисунках).

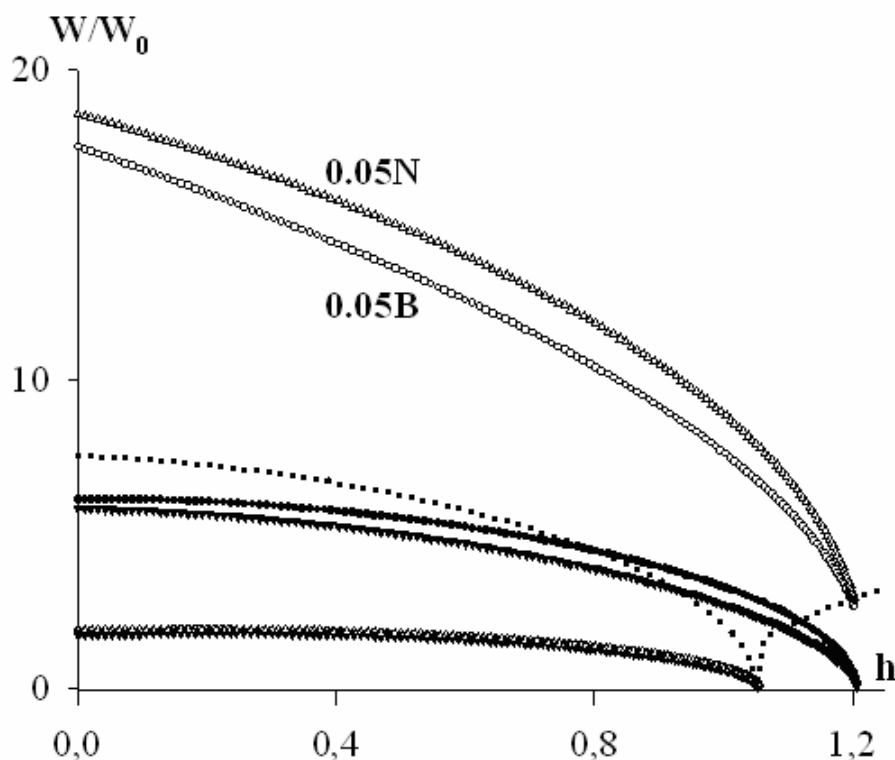


Рис. 1. Зависимость приведенной частоты ферромагнитного резонанса W/W_0 от приведённого магнитного поля $h=H/H_a$. Соотношение ширины s и толщины L пластины: $s/L = 220$. Обозначения: N соответствует неелевской, B блоховской доменной границе, цифры у кривых – величины фактора качества Q . $W_0 = \gamma H_a$, H_a – поле анизотропии, γ – гиромагнитное отношение. Кривым, проведённым пунктиром, отвечает однородное состояние магнетика.

Форма пластины в исследуемой модели оказывает значительное влияние на поведение резонансных частот. Для тонкой и широкой пластины они смещаются в область низких полей. Меняется и характер зависимости для обеих ветвей: максимальное значение частоты наблюдается при нулевом поле и с увеличением поля частота монотонно уменьшается, тогда как для куба с низким фактором качества для низкочастотной ветви начальная и конечная точки существования доменной структуры во внешнем поле отмечаются частотами близкими к нулю (см. рис. 2). Последний эффект уже не

определяется равновесными свойствами структуры, он обусловлен влиянием магнитостатики образца непосредственно на прецессию намагниченности.

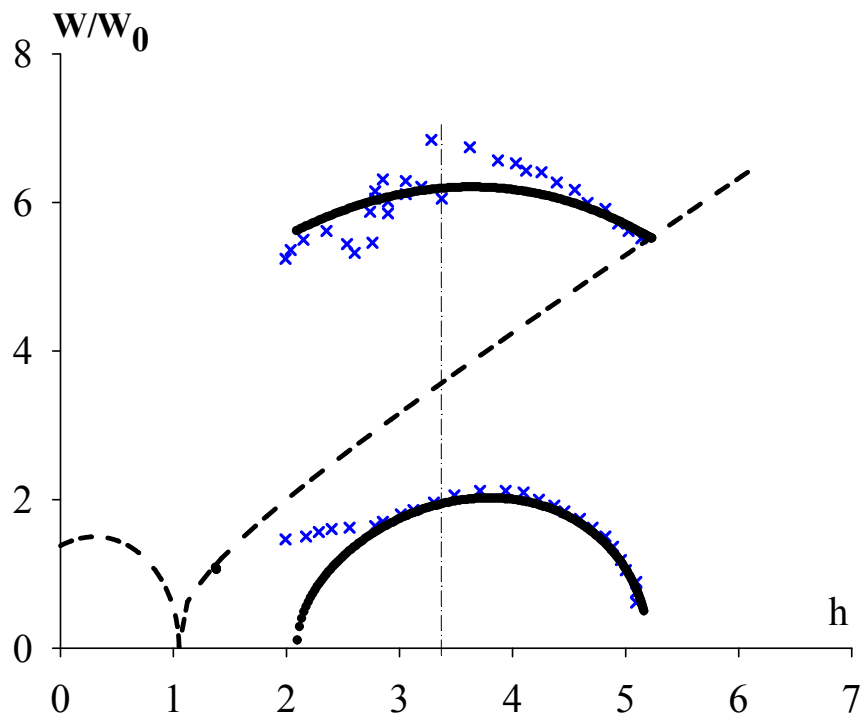


Рис. 2. Зависимость приведенной частоты ферромагнитного резонанса W/W_0 от магнитного поля h . Здесь $s=L$, $Q=0,16$. Символами x обозначены экспериментальные точки работы [4]. Вертикальная штрихпунктирная линия обозначает границу области устойчивости доменной структуры.

Проверялось соответствие полученных результатов экспериментальным данным. На рис. 2 сравниваются частотные зависимости, полученные для образца в форме куба с фактором качества 0,16 и экспериментальные результаты работы [4], в которой изучались образцы никелевого феррита в форме шара с тем же фактором качества. С уменьшением поля в таком образце помимо рассматриваемой доменной структуры возникают домены, намагниченность в которых лежит вдоль второй пары тригональных осей кристалла – происходит потеря устойчивости ДС, что обозначено на рисунке вертикальной штрихпунктирной линией. Видно, что вплоть до полей, при которых происходит потеря устойчивости доменной структуры для нижней ветви ФМР имеется хорошее соответствие между расчетной кривой и экспериментальными точками. Для верхней ветви это соответствие несколько хуже, что объясняется несоответствием формы образца, с которым производился эксперимент (шар) и формой, принятой при расчёте (пластина в форме куба).

В третьей главе описаны особенности распределения собственного магнитного поля ограниченной пластины, разбитой на два домена и пластины с высоким фактором качества, обладающей полосовой доменной структурой с блоховскими доменными границами. Приведены результаты численного

моделирования ферромагнитного резонанса в последней в отсутствии внешнего магнитного поля. Расчёт осуществлён в соответствии с методикой, предложенной в [5, 8]: решая дискретизированное на двумерной сетке уравнение Ландау-Лившица, определяется динамический ответ $\delta\mathbf{m}$ магнитной системы на малое однородное возбуждающее внешнее магнитное поле $\delta\mathbf{h}$, затем вычисляется скалярная динамическая восприимчивость:

$$\chi = \frac{1}{n_x n_z} \sum_{i=1}^{n_x n_z} \frac{\delta\mathbf{m}_i \delta\mathbf{h}}{|\delta\mathbf{h}|^2}. \text{ Численная реализация осуществлялась для сетки с числом}$$

узлов $n_x=22$, $n_z=11$. ФМР доменной границы не изучался, сетка строилась только внутри доменов.

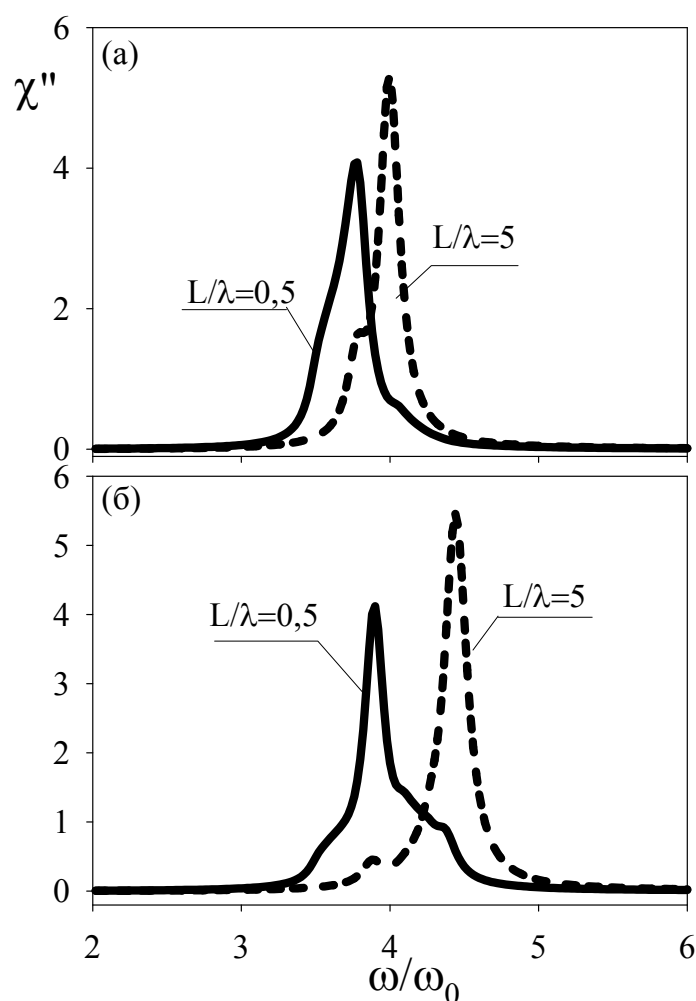


Рис. 3 Зависимость мнимой части восприимчивости χ'' от приведённой частоты ω/ω_0 для различных значений толщины пластины L , отнесённой к периоду доменной структуры λ : L/λ . На рисунке а) поле $\delta\mathbf{h}$ перпендикулярно доменной стенке; б) – поле $\delta\mathbf{h}$ параллельно доменной стенке, домены равны. Здесь $Q=4$, $\omega_0 = 4\pi\gamma M$, M - намагниченность насыщения.

Показано, что учет неоднородности собственного размагничивающего поля пластины с доменной структурой приводит к появлению дополнительных пиков в спектре ФМР. С уменьшением толщины пластины происходит смещение пиков резонансной кривой в область низких частот (рис.3).

Этот эффект обусловлен тем, что размагничивающее поле с уменьшением относительной толщины пластины становится неоднородным во все большем объеме образца. Соответственно эффективное поле, действующее на намагниченности каждого домена, уменьшается и происходит смещение резонансной кривой в область низких частот.

Кроме того, в более тонких пластинах могут появляться дополнительные пики на резонансной кривой. Уширение кривой и появление дополнительных пиков также объясняется возрастанием неоднородности поля в пластине внутри доменов.

Увеличение размера одного из доменов за счет другого приводит к возрастанию амплитуды восприимчивости низкочастотной моды ферромагнитного резонанса и смещению ее в область низких частот (рис.4). Цифрами 1 и 2 на рисунке 4 обозначены низкочастотная и высокочастотная моды соответственно. Когда оба домена равны, на рисунки (а1, б1) видны соответственно две основные моды ФМР и несколько дополнительных пиков, обусловленных неоднородностью собственного размагничивающего поля вблизи поверхности образца. Внутри образца нормальная к плоскости пластины составляющая размагничивающего поля близка к нулю. Когда относительный размер одного из доменов в периоде начинает уменьшаться, нормальная составляющая размагничивающего поля становится меньше нуля. Поэтому намагниченность в больших доменах прецессирует в меньшем эффективном поле, что приводит к появлению дополнительного пика (обозначен 1') на зависимостях (б), на частоте, соответствующей низкочастотной моде и смещению этого дополнительного пика и низкочастотной моды в область низких частот (рис. 4, а2-а4 и б2-б4). Соответственно намагниченность в меньших доменах прецессирует в большем эффективном поле, что проявляется в появлении дополнительного пика (обозначен 2') на зависимостях (а), на частоте, соответствующей высокочастотной моде и смещению этого дополнительного пика и высокочастотной моды в область высоких частот. Поскольку объем занимаемый одним из доменов уменьшается, величина высокочастотной моды также уменьшается, что в пределе приводит к картине ФМР однородно намагниченной пластины.

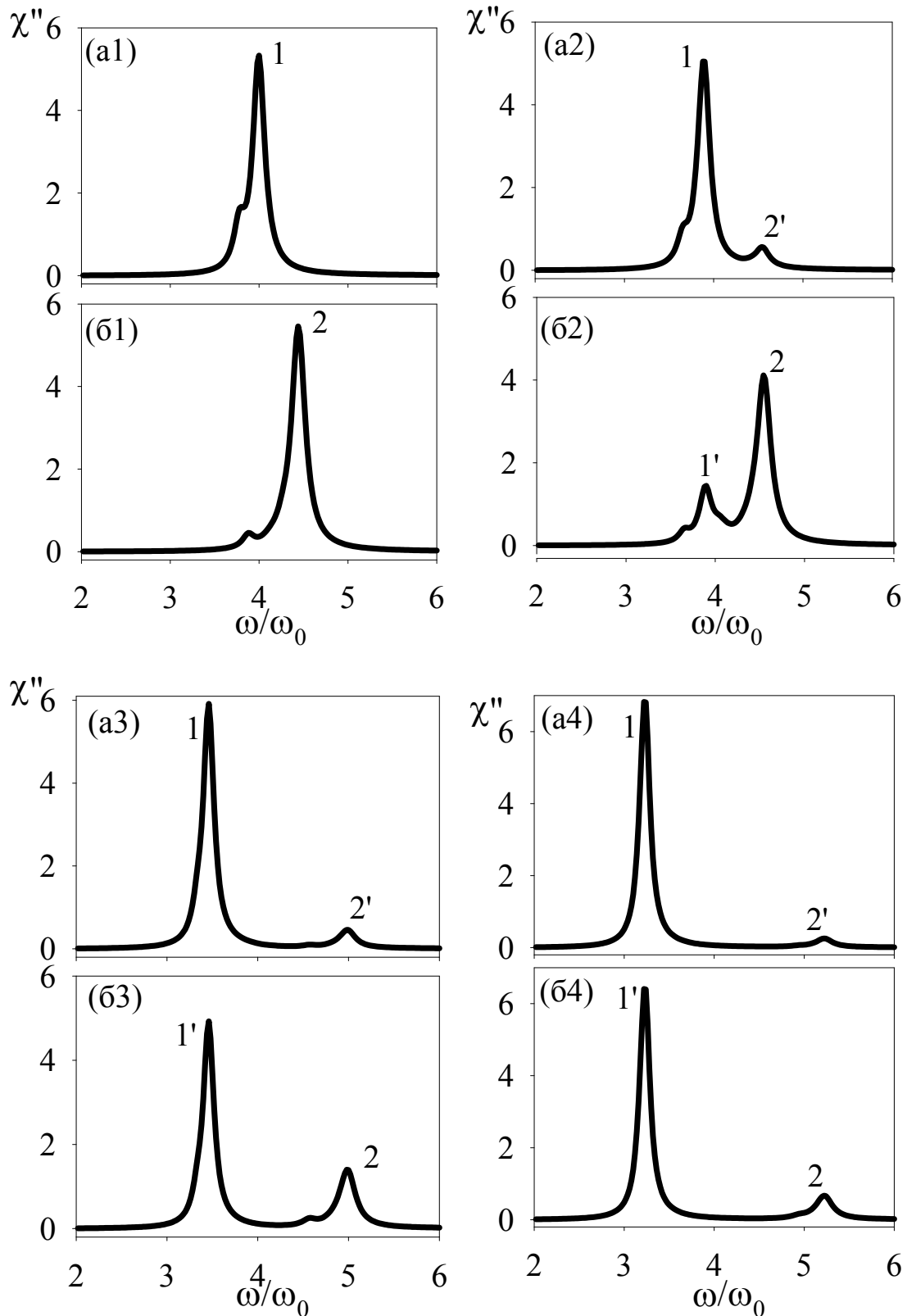


Рис. 4 Зависимость мнимой части восприимчивости χ'' от приведённой частоты ω/ω_0 при значениях относительного размера домена в периоде d/λ : 0.5 - (a1, б1); 0.4 - (a2, б2); 0.2 - (a3, б3); 0.1 - (a4, б4). На рисунках (a1-a4) поле $\delta \mathbf{h}$ перпендикулярно доменной стенке; (б1- б4) – поле $\delta \mathbf{h}$ параллельно доменной стенке. Параметры пластины: $Q=4$, $L = 5\lambda$.

Нужно отметить, что в данной модели основные параметры системы: фактор качества, толщина пластины, период доменной структуры и др. независимы друг от друга. В действительности, рассмотренная доменная структура существует только при определенных соотношениях фактора качества и толщины пластины, что может быть учтено при точном расчете основного состояния, а также учете внешнего магнитного поля при изменении ширины доменов. Это должно учитываться при сравнении описанных результатов с результатами других работ. Так, при точном расчете основного состояния, как это сделано в работе [8] для пластины с низким фактором качества, появляются дополнительные пики в зависимости восприимчивости, ассоциируемые с колебаниями различных типов неоднородностей в тонкой структуре доменной границы. Впрочем, как отмечается в [8], с увеличением фактора качества при неизменной толщине пластины число пиков уменьшается и тонкая структура исчезает.

В четвёртой главе описано влияние на ферромагнитный резонанс в кубическом магнетике анизотропных центров, отличающихся направлением осей лёгкого намагничивания (ОЛН) вдоль одной из четырёх тригональных осей. Суммарно центры с одинаковой осью лёгкого намагничивания описываются как отдельные области. Для изучения ФМР в неоднородном магнетике были применены два метода: метод интегральной восприимчивости при расчёте резонанса при условии отсутствия взаимодействия между анизотропными центрами и метод эффективного поля для учёта взаимодействия между ними. Нормированное значение внешнего магнитного поля в расчётах принимается равным $H/M=10$. Равновесные значения углов, определяющих направление намагниченности образца определялись путём минимизации энергии системы и при выбранных параметрах анизотропии направление намагниченности совпадает с направлением внешнего поля.

В методе интегральной восприимчивости обычным образом [14] вычислялась динамическая восприимчивость каждой области: $\chi_s = \chi_s' - i\chi_s''$. Предполагая, что появление анизотропного центра равновероятно в каждой из тригональных позиций, определялась восприимчивость образца как среднее арифметическое функций восприимчивости отдельных областей. Из полученной таким образом зависимости восприимчивости магнетика от частоты можно получить резонансную частоту магнетика как целого. Для учёта взаимодействия между областями использован метод эффективного поля [13].

Показано, что вне зависимости от использованного метода, при учёте в анизотропных центрах одноосной анизотропии второго порядка, оси которой направлены вдоль четырёх тригональных направлений, происходит аддитивное смещение резонансной кривой в область высоких частот (рис.5).

Такого рода изменения наблюдаются и в экспериментах по воздействию света на ферромагнетик, находящийся в многодоменном состоянии [10-12].

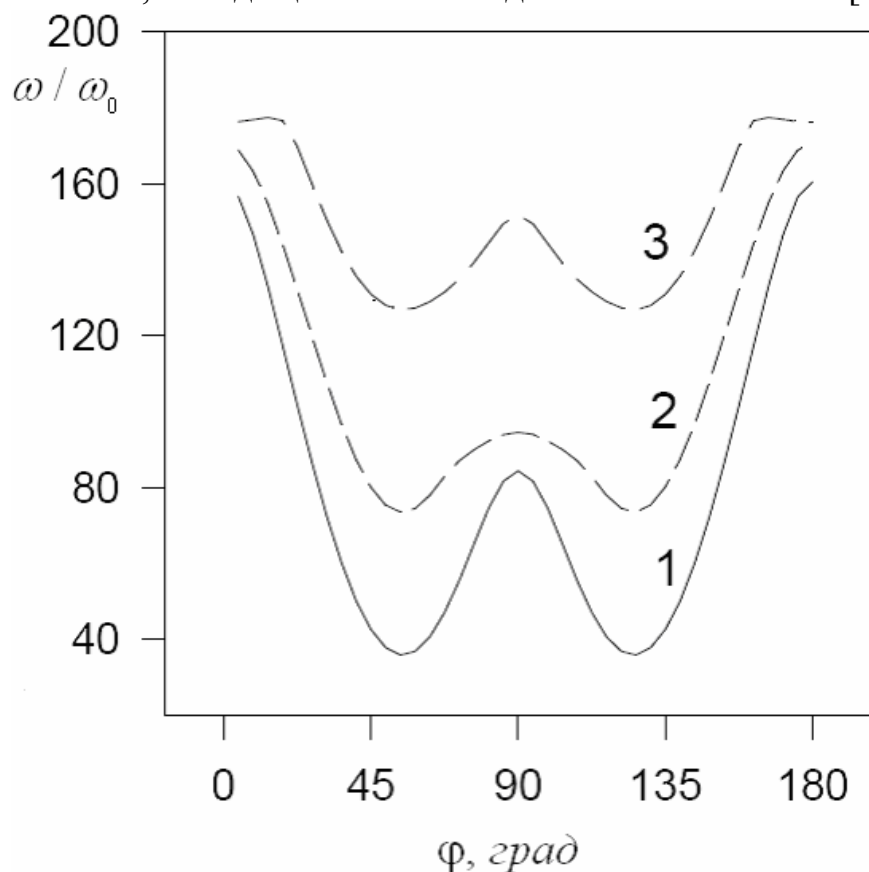


Рис. 5. Зависимости ω/ω_0 от угла между намагниченностью и осью [001] в плоскости $(\bar{1}10)$ для однородного образца (кривая 1), для неоднородных образцов (кривые 2,3). Параметры кубической и одноосной анизотропии (в единицах M^2): 1 - K_1-2 , $K_{u1}=0$, в анизотропных центрах; 2 - K_1-2 , $K_{u1}=-3$; 3 - K_1-2 , $K_{u1}>3$. Здесь $\omega_0=\gamma M$.

Учёт четвёртой степени одноосной анизотропии не приводит к аддитивному смещению кривых, происходит зависящее от направления внешнего поля и знака постоянной одноосной анизотропии усиление, либо ослабление кубической анизотропии, проявление ромбической составляющей анизотропии.

В пятой главе приведено аналитическое решение задачи о распределении намагниченности в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке с анизотропией слоев “легкая плоскость” и “легкая ось” при наличии внешнего магнитного поля нормального к плоскости пленки. Изучены процессы намагничивания такой системы при различных толщинах ферромагнитных слоев. Изучено влияние толщины слоев на вид кривой намагничивания и величину коэрцитивной силы (рис.6). Наблюдается соответствие с решением, полученным в работе [6] для модели пленки конечной толщины на бесконечном слое.

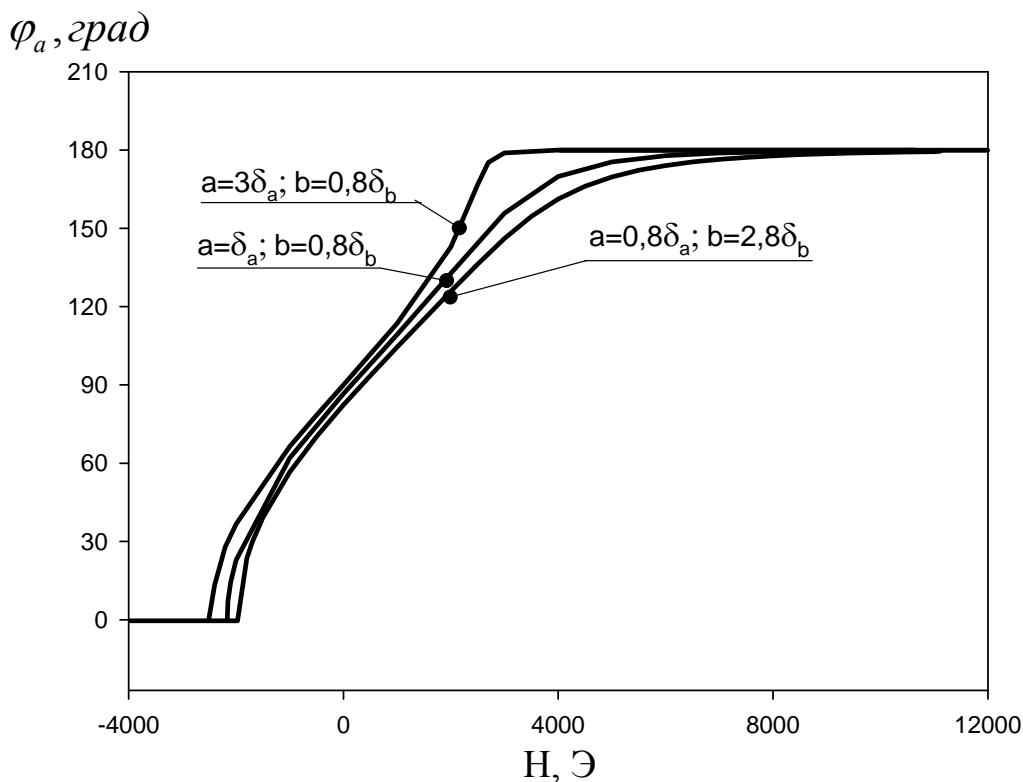


Рис.6 Зависимость угла φ_a на внешней границе плёнки с анизотропией типа «лёгкая плоскость» от внешнего магнитного поля. Здесь параметр межслойного обменного взаимодействия $J \rightarrow \infty$, толщины слоёв указаны на рисунке, они выражены через величины $\delta_a = \sqrt{\alpha_1 / K_1^u}$, $\delta_b = \sqrt{\alpha_2 / K_2^u}$. Параметры намагниченности, обмена и одноосной анизотропии для первого и второго слоёв соответственно: $M_1=200$ ед. СГСЭ/м³, $\alpha_1=10^{-7}$ эрг/см, $K_1^u=0.25 \times 10^6$ эрг/см³, $M_2=90$ ед. СГСЭ/м³, $\alpha_2=2 \times 10^{-7}$ эрг/см, $K_2^u=2 \times 10^6$ эрг/см³.

Также показано, что при уменьшении межслойного обменного взаимодействия коэрцитивная сила возрастает (рис.7).

Численное исследование поведения этой структуры в касательном магнитном поле показало, что даже в достаточно сильных полях двухслойная плёнка оказывается намагниченной неоднородно, что необходимо учитывать при расчёте ФМР и интерпретации экспериментальных данных. Кроме того, изучаемые в эксперименте многослойные структуры могут обладать не только одноосной анизотропией, которая обычно учитывается при теоретическом их изучении [7], но и другими видами анизотропии, например кубической для феррит-гранатовых плёнок. Последнее привело к необходимости обобщить

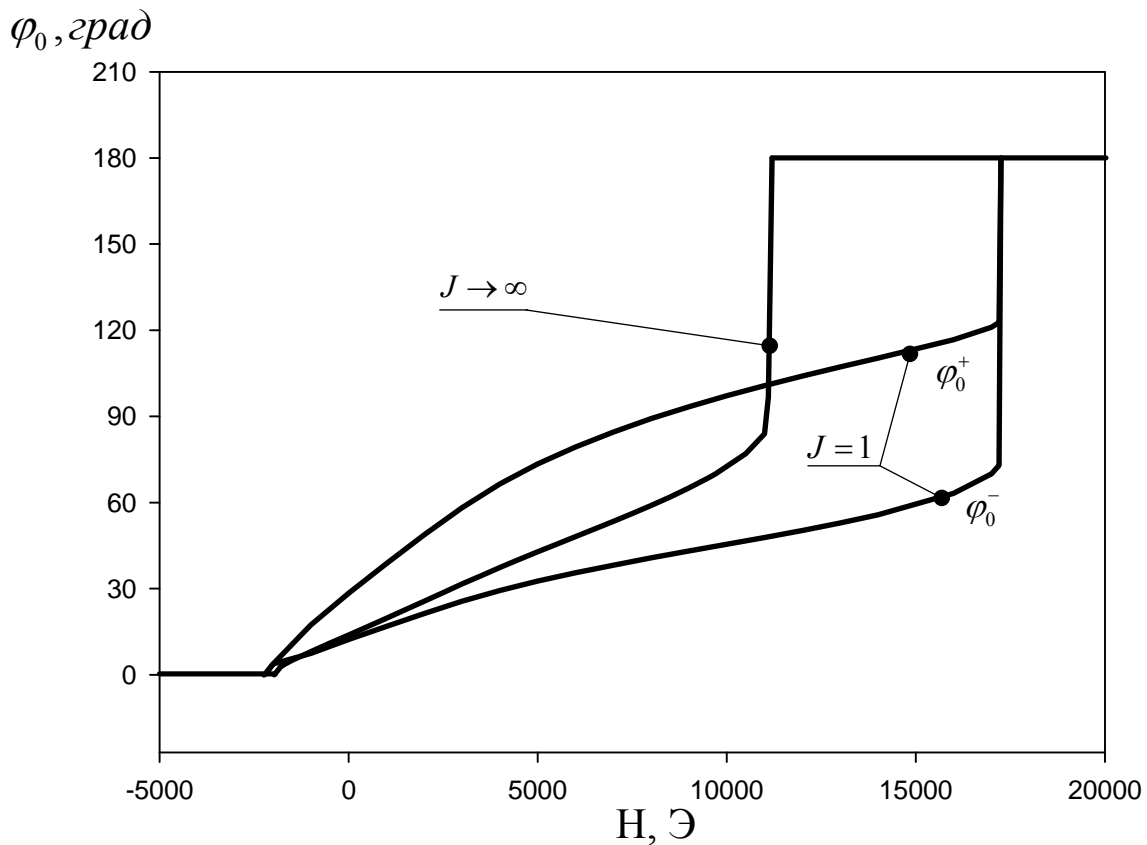


Рис.7 Зависимость углов на границе раздела слоёв от внешнего магнитного поля. Здесь $a=0.8\delta_a$, $b=2.8\delta_b$, остальные параметры те же, что и для рис. 6.

метод исследования ФМР в двухслойной плёнке [7] таким образом, что стало возможно проводить расчёты для всех типов магнитной анизотропии и любой ориентации равновесной намагниченности в слоях. Приведены результаты исследования резонансных свойств двухслойной плёнки с комбинированной кубической и одноосной анизотропией при изменении параметров анизотропии, толщин слоёв и направлении внешнего магнитного поля. Основные выводы согласуются с результатами предыдущих работ: существуют две резонансные моды, между которыми имеется область запрещённых значений, в которой ФМР не наблюдается ни при каком направлении внешнего магнитного поля. Учёт кубической анизотропии приводит к неравномерному сдвигу кривой зависимости резонансного поля (или частоты) направление которого определяется знаком кубической анизотропии и направлением внешнего магнитного поля.

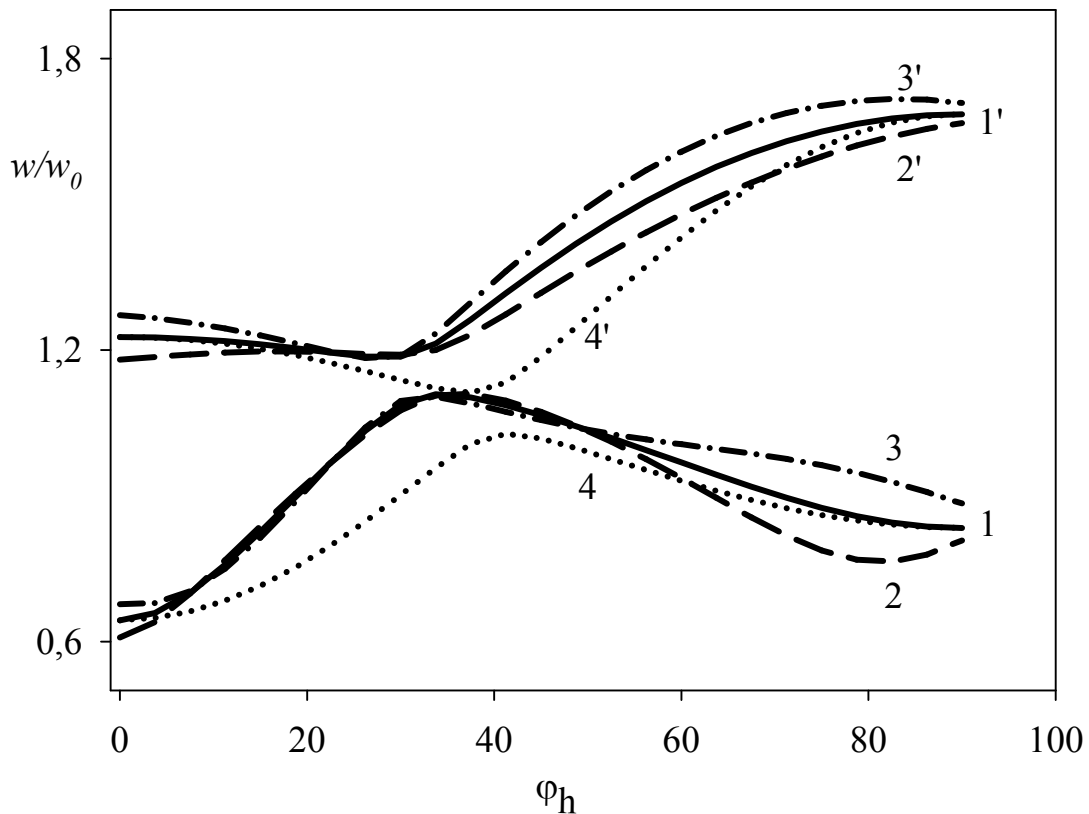


Рис. 8 Зависимость приведённой частоты ω/ω_0 от угла φ_h между внешним полем и нормалью к плёнке, которая совпадает с осью $\langle 111 \rangle$ кубического кристалла (внешнее магнитное поле изменяется в плоскости нормальной к плоскости плёнки). Намагниченность имеет различные направления в слоях с учётом неоднородности, параметры кубической анизотропии: (1, 1') - $K_i^1 = 0$; (2, 2') - $K_i^1 = 10^4$ эрг/см³; (3, 3') - $K_i^1 = -10^4$ эрг/см³; (4, 4') - намагниченность в слоях направлена однородно по полю и $K_i^1 = 0$. Параметры одноосной анизотропии первого и второго слоёв: $K_1^u = 18264$ эрг/см³, $K_2^u = -70000$ эрг/см³. Величина внешнего поля равна $H = 4000$ Э, $w_0 = 2\pi \cdot 7,92$ ГГц. Остальные параметры те же, что и в [7].

Сравнение двух методик расчёта резонансной частоты, отличающихся предположением относительно направления намагниченности слоёв в основном состоянии: однородно по полю в целом или при различных направлениях намагниченности в слоях с учётом неоднородности на межслойной границе показало, что разница между ними проявляется в смещении угловой зависимости ФМР (рис.8).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

- 1) Изучен ферромагнитный резонанс полосовой доменной структуры пластины конечных во всех направлениях размеров. Одновременный

расчёт энергии доменной структуры и частот ФМР позволил установить соответствие между типом доменной структуры, параметрами пластины и картиной ферромагнитного резонанса. Впервые показано, как различие в типе доменной структуры (ДС с неелевскими и блоховскими доменными границами) сказывается на зависимости частоты ферромагнитного резонанса от магнитного поля. Особенно наглядно это различие можно проследить для тонких и широких пластин. Таким образом, если в образце одновременно присутствуют оба типа доменной структуры, то должно наблюдаться расщепление верхней и нижней ветвей ФМР. Описана зависимость частоты ФМР от фактора качества и формы образца. Последняя оказывает значительное влияние на поведение резонансных частот. Для тонкой и широкой пластины они смещаются в область низких полей. Меняется и характер зависимости как для низкочастотной, так и для высокочастотной ветви: максимальное значение частоты наблюдается при нулевом поле и с увеличением поля частота монотонно уменьшается, тогда как для куба с низким фактором качества для низкочастотной ветви начальная и конечная точки существования доменной структуры во внешнем поле характеризуются частотами близкими к нулю.

- 2) Проведено численное моделирование ферромагнитного резонанса в отсутствие внешнего магнитного поля в пластине с высоким фактором качества, обладающей полосовой доменной структурой с блоховскими ДГ. Показано, что в результате учета неоднородности собственного размагничивающего поля пластины с доменной структурой помимо основных высокочастотной и низкочастотной мод появляются дополнительные пики в спектре ФМР. С уменьшением толщины пластины происходит смещение пиков резонансной кривой в область низких частот. Увеличение размера одного из доменов за счет другого приводит к возрастанию амплитуды восприимчивости низкочастотной моды ферромагнитного резонанса и смещению ее в область низких частот. Соответственно амплитуда восприимчивости высокочастотной моды уменьшается и происходит ее смещение в область высоких частот. Кроме того, при резонансе в пластине с неравными доменами пик резонансной кривой, соответствующий высокочастотной моде наблюдается и при возбуждении колебаний внешним переменным полем перпендикулярным плоскости ДГ а низкочастотной – переменным полем параллельным плоскости ДГ.
- 3) Изучен ФМР в кубическом магнетике с анизотропными центрами, анизотропия которых различается направлением ОЛН вдоль одного из четырёх тригональных осей кристалла. Центры распределены по тригональным положениям равновероятно. Расчет проведён как с учётом

взаимодействия между анизотропными центрами, так и в предположении, что они не взаимодействуют. Показано, что при учёте одноосной анизотропии второго порядка анизотропных центров, происходит смещение резонансной кривой в область высоких частот. Учёт четвёртой степени одноосной анизотропии приводит к неаддитивному увеличению или уменьшению частоты ФМР, в зависимости от знака постоянной одноосной анизотропии, однако этот вклад оказывается меньше, чем в образце с комбинированной анизотропией без учёта пространственного разнесения анизотропных центров.

- 4) Найдено аналитическое решение задачи о распределении намагниченности в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке с анизотропией слоев “легкая плоскость” и “легкая ось” при наличии перпендикулярного к плоскости плёнки внешнего магнитного поля. Изучены процессы намагничивания такой пленки при различных толщинах ферромагнитных слоев. В пределе наблюдается соответствие с решением, полученным в работе [6] для модели пленки конечной толщины на бесконечном слое. Учёт конечности второго слоя приводит к видимому смещению кривой намагничивания в область более низких полей. Также показано, что при уменьшении межслойного обменного взаимодействия коэрцитивная сила возрастает.
- 5) Исследованы резонансные свойства двухслойной плёнки от направления внешнего магнитного поля при изменении магнитных и немагнитных параметров: кубической и одноосной анизотропии, толщины слоёв, параметра межслойного обменного взаимодействия. Учёт кубической анизотропии приводит к неравномерному сдвигу кривой зависимости резонансного поля (или частоты), направление сдвига определяется знаком кубической анизотропии и зависит от направления внешнего магнитного поля. Сравнение двух методик расчёта резонансной частоты, отличающихся предположением относительно направления намагниченности слоёв в основном состоянии: однородно по полю в целом или при различных направлениях намагниченности в слоях с учётом неоднородности на межслойной границе показало, что разница между ними проявляется в существенном смещении угловой зависимости ФМР.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- А.1 Шульга Н.В., Дорошенко Р.А. ФМР в кубических магнетиках с пространственно разделёнными локальными компонентами анизотропии вдоль тригональных осей // «Структурные, магнитоупругие и динамические

- эффекты в упорядоченных средах» (Сб. Научных трудов). Уфа 1997 С. 125-131.
- A.2 Shulga N.V., Doroshenko R. A. FMR in a two-layer film with combined magnetic anisotropy // *The Phys. Metals and Metallogr.* 2001. V.91. Suppl. 1. P.65-68.
- A.3 Мальгинова С.Д., Шульга Н.В., Дорошенко Р.А. . Полосовая доменная структура пластины конечных размеров. 2. Ферромагнитный резонанс. // В книге «Физика в Башкортостане» выпуск 2. Изд. Гилем. Уфа 2001. С.43-46.
- A.4 Мальгинова С.Д., Дорошенко Р.А., Шульга Н.В. Влияние магнитостатической энергии на свойства доменной структуры пластины конечных размеров в магнитном поле // Сб. Трудов XVIII международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Москва, 24-28 июня 2002 г. С. 389-391.
- A.5 Мальгинова С. Д., Шульга Н. В., Дорошенко Р. А. Ферромагнитный резонанс в пластине конечных размеров с полосовой доменной структурой // “Исследовано в России”. 2002. (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/artiles/2002/149.pdf>)
- A.6 Мальгинова С.Д., Дорошенко Р.А., Шульга Н.В., Владимирова Р.С. Полосовая доменная структура в пластине конечных размеров. Статические свойства и ферромагнитный резонанс // Сборник трудов XIX международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". г.Москва, 28 июня – 2 июля 2004г. С.804–806.
- A.7 Шульга Н.В., Дорошенко Р.А. Перемагничивание двухслойной обменно-связанной ферромагнитной плёнки. // Сборник трудов XX международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". г.Москва, 12 июня – 16 июня 2006г. С. 416–418.
- A.8 Мальгинова С.Д., Дорошенко Р.А., Шульга Н.В., Владимирова Р.С. Расчеты магнитостатических полей тонких пластин с полосовой доменной структурой. // Сборник трудов XX международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". г. Москва, 12 июня – 16 июня 2006г. С.441–443.
- A.9 Mal'ginova S.D., Doroshenko R.A., Shul'ga N.V. Static and high-frequency magnetic properties of stripe domain structure in a plate of finite sizes. // *JMMM.* 2006. V. 296. P. 13-24.
- A.10 Шульга Н. В., Дорошенко Р. А. Перемагничивание двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленки // *ФММ.* 2006. Т.102. №5. С. 507-510.
- A.11 Мальгинова С. Д., Дорошенко Р. А., Шульга Н. В., Владимирова Р. С. Особенности магнитостатического поля тонкой пластины с полосовой доменной структурой. // *ФММ.* 2007. Т.103. №5. С. 364-366.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Власов К.Б., Власов К.Б., Оноприенко Л.Г. Резонансные явления в магнитоодноосных монокристаллах ферродиелектриков, обладающих доменной структурой // ФММ. 1963. Т. 15. № 1. С. 45-54.
2. Kittel C. Physical theory ferromagnetic domain // Rev. Mod. Phys. 1949. V. 21. P. 541-601.
3. Мальгинова С.Д. Решение статических уравнений Максвелла в пластине с периодическим распределением намагниченности // ФММ. 1998. Т. 85. № 5. С. 21-27.
4. Киров С.А. Лебедева Е.В. Устойчивость пластинчатой доменной структуры в кубическом ферромагнетике, намагниченном вдоль $\langle 110 \rangle$ // ФТТ. 1978. Т. 20. № 4. С.1042-1044.
5. Labbe S., Bertin P.-Y. Microwave polarizability of ferrite particles with non-uniform magnetization // J. Magn. Mater. 1999. V. 206. P. 93-105.
6. Hu X., Kawazoe Y. Theory of the capping effect in magnetic double-film system // Phys. Rev. B 1994. V. 49. № 5. P. 3294-3299.
7. Сукстанский А.Л., Ямпольская Г.И. Динамическая магнитная восприимчивость двухслойной плёнки в сильном магнитном поле // ФТТ 2000. Т. 42, № 5, С. 866-872.
8. Vukadinovic N., Labrune M., Ben Youssef J., Marty A., Toussaint J. C., Le Gall H. Ferromagnetic resonance spectra in a weak stripe domain structure // Phys. Rev. B 2001. V. 65. P. 054403-1 - 054403-10.
9. Мальгинова С.В., Дорошенко Р.А. Полосовая доменная структура ограниченной пластины (110) в магнитном поле // ФММ. 2004. Т.97. №5. С.18-21.
10. Жуковский А.В., Куц П.С. Совместное исследование фотоиндуцированной анизотропии и эффекта спиновой переориентации в монокристалле ЖИГ // УФЖ. 1985. Т.30. №11. С. 1733-1737.
11. Hiroyuki O., Kenichi U. Photoinduced decrease of ferromagnetic resonance field in YIG single crystals // Jap. J. Appl. Phys. 1980. V.19. №12. P.2513-2514.
12. Дорошенко Р.А., Серегин С.В. Фотоиндуцированное изменение динамического магнитоупругого взаимодействия в иттриевом феррите-гранате. // ФТТ. 1997. Т.39, №6. С. 1081-1083.
13. Смарт Дж. Эффективное поле в теории магнетизма М. Мир. 1968. 271 с.
14. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках М. Наука. 1973. 591 с.