

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
Донецкий физико-технический институт

На правах рукописи

ДЕЛЛАЛОВ Владимир Степанович

УДК 588.27:539.216.2

МАГНИТНЫЕ РЕЗОНАНСЫ В СЛОИСТЫХ  
ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ СТРУКТУРАХ

01.04.07. - Физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Донецк 1994

ТВ 22.000

Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте АН Украины.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777816 (-)

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор Гришпин А. М.  
кандидат физико-математических наук,  
Шкарь В. Ф.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Стефановский Е. П.  
кандидат физико-математических наук,  
Герасимчук В. С.

Ведущая организация: институт металлофизики, г. Киев

Защита состоится " 12 " мая 1994 года в 14 часов 30 минут на заседании специализированного совета Д 016.32.01 Донецкого физико-технического института АН Украины (340114, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого физико-технического института АН Украины.

Автореферат разослан " 8 " апреля 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

*автор* В. Е. Соловьев

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время все больший интерес представляют многослойные эпитаксиальные феррит-гранатовые структуры. Они существенно отличаются по магнитным свойствам от однослойных. Дипольная и обменная связь между слоями приводит, в частности, к появлению новых типов колебаний в этих структурах и к особенностям их магнитных характеристик. Картина значительно богаче и сложнее когда один из слоев находится в размагниченном состоянии. Исследование таких систем представляет очень важную и интересную задачу. Очень плодотворным в этом отношении является исследование магнитного резонанса.

Однако, кроме научного интереса, такие исследования имеют важное прикладное значение, поскольку многослойные и неоднородные магнитные пленки нашли широкое применение в различных технических устройствах. Примером могут служить многослойные пермаллоевые тонкопленочные системы, используемые в запоминающих устройствах на цилиндрических магнитных доменах. Далее, наличие тонкого эпитаксиального слоя феррита-граната, с планарной намагниченностью между доменосодержащим слоем и подложкой делает двухслойные эпитаксиальные феррит-гранатовые структуры перспективным материалом для устройств на ЦМД с токовым управлением и представляет значительный интерес в связи с целым рядом их потенциальных преимуществ перед устройствами на ЦМД с полевым управлением (более высокое быстродействие, более высокая плотность информации и т.д.). Слоистые магнитные пленки применяются для создания магнитооптических пространственных модуляторов света. Широкое распространение получили пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) в связи с применением их в устройствах обработки информации на магнитоэлектронных волнах. В технике полосовых фильтров СВЧ довольно успешно используются монокристаллические сферы ЖИГ. Тем не менее применение пленок ЖИГ и здесь создает предпосылки для дальнейшего улучшения показателей технологичности, миниатюризации, энергопотребления. В свою очередь применение слоистых структур приводит к улучшению рабочих характеристик таких устройств.

Цель работы. В диссертационной работе ставится задача исследования резонансных свойств слоистых феррит-гранатовых структур. Целью данной работы является

- исследование резонансных свойств двухслойных магнитных пленок в насыщенной состоянии и в состоянии, когда один слой намагничен, а

другой разбит на домены: 1) исследование частотно-полевых зависимостей резонансов возбуждающихся в этих пленках; 2) исследование зависимости резонансных полей от ориентации внешнего магнитного поля; 3) изучение явления взаимодействия между слоями в зависимости от параметров материала; 4) выяснить как сказывается влияние полей кубической анизотропии на положение резонансных полей ФМР;

- изучение частотно-полевых зависимостей субмикронных пленок с малым фактором качества;

- исследование зависимости резонансных частот ФМР от магнитного поля в пленках с доменной структурой.

Научная новизна. В процессе работы исследовано большое количество двухслойных пленок. Впервые получена наиболее полная картина резонансов, возбуждающихся в таких материалах в насыщенном состоянии. Изучены наиболее общие закономерности, присущие двухслойным структурам. Во-первых это взаимодействие между однородными модами ФМР. В зависимости от параметров слоев взаимодействие между ними может проявиться в виде расталкивания мод. Показано, что основной вклад в расталкивание мод вносит обменное взаимодействие. С другой стороны взаимодействие между слоями может проявиться в анизотропии интенсивности линии (в одной из геометрий линия ФМР не проявляется, хотя в другой геометрии хорошо видна).

Во-вторых это спин-волновой резонанс (СВР). Серия СВР возбуждается между однородными модами ФМР разных слоев. Это объясняется тем, что закрепление спинов происходит на внутренней границе раздела слоев. Впервые показано, что причиной закрепления спинов является скин-эффект на границе раздела слоев (спиновая волна не распространяется в соседний слой и затухает на глубине скин-слоя). Экспериментально и теоретически оценена глубина скин-слоя.

Построена теория, описывающая высокочастотную восприимчивость двухслойной пленки, которая может быть использована в качестве основы для определения параметров двухслойной структуры (методика определения параметров для однослойных пленок в случае связанных слоев оказывается неприменима).

Впервые проведено подробное экспериментальное исследование двухслойных систем в ненасыщенном состоянии. Получены частотные, угловые зависимости резонансных полей. В случае, когда один слой достаточно тонкий (слой I), теоретически и экспериментально установлено, что расщепление линии ФМР тонкого слоя обусловлено

влиянием доменов соседнего слоя (полями рассеяния и обменным полем) и кубической анизотропией. Экспериментально показано, что в случае когда подслоя имеет большую толщину и большую намагниченность, двухслойная система может находиться в разных магнитных состояниях (им соответствуют разные резонансные поля и интенсивности резонансных линий и разные зависимости резонансных полей от угла наклона магнитного поля).

Впервые изучены частотно-полевые зависимости субмикронных феррит-гранатовых пленок с малым фактором качества и показано, что мода, соответствующая резонансу доменных границ, срабатывается с модой однородного ФМР в области полей насыщения пленки.

Впервые обнаружены деформации частотно-полевых зависимостей доменных мод ФМР для лабиринтной доменной структуры, которая объясняется эффектом взаимодействия мод.

Практическое значение. Полученные в диссертации результаты уточняют и дополняют физическую картину статических и резонансных свойств двухслойных феррит-гранатовых структур и могут быть использованы при дальнейшем изучении этих материалов. Так, измеряя экспериментально величину расталкивания между однородными модами ФМР разных слоев, можно определить величину энергии связи слоев, которая обуславливает многообразие свойств двухслойной структуры.

Используя то обстоятельство, что закрепление спинов обусловлено явлением "скин-эффекта" на границе раздела слоев, можно возбуждать СВР в разных слоях в зависимости от частоты. Это может быть по-видимому использовано в технических устройствах.

Теорию, описывающую восприимчивость двухслойной структуры можно использовать в качестве основы для определения параметров двухслойных пленок, т.к. методика определения параметров для однослойных пленок в случае связанных слоев оказывается неприменима.

Не менее ценным результатом является расщепление линии ФМР тонкого легкоплоскостного слоя. Резонансные поля линии ФМР частей пленки под ЦМД и под матрицей (область пленки вне ЦМД) различны, а это может служить основой для индикатора (или датчика) ЦМД.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на III советско-чехословацком семинаре "Физика магнитных доменов и магнитные фазовые переходы" (г. Донецк, 1983г.)

Объем работы. Диссертационная работа содержит 85 страниц машинопис-

ного текста, включая 19 рисунков и I таблицу; состоит из введения, пяти глав, приложения и заключения. Список цитируемой литературы включает 78 наименований.

#### Содержание работы.

Во введении обоснован выбор темы, сформулированы задачи и определен основной метод исследования, а также содержится краткий обзор диссертации, включающий основные результаты работы.

В первой главе дан краткий обзор литературы. Предоставлены необходимые сведения о явлении ферромагнитного резонанса, приведены основные уравнения и соотношения, описывающие однородную прецессию вектора намагниченности в анизотропном ферромагнетике. Рассмотрены также неоднородные колебания в пленках: во-первых колебания, обусловленные неоднородностью магнитных параметров пленки по толщине (спин-волновой резонанс); во-вторых колебания, обусловленные неоднородностью магнитной структуры (резонансы доменных границ, резонансы в доменах). Далее описаны свойства многослойных структур. Проведен анализ современного состояния экспериментальных и теоретических исследований резонансного поглощения в магнитных пленках. На основе этого анализа сформулированы задачи настоящей работы.

Во второй главе приведена блок-схема радиочастотного спектрометра сантиметрового диапазона, на котором выполнены измерения, описаны методики определения магнитных параметров пленок. Представлены необходимые сведения по кристаллографической структуре, магнитной симметрии и магнитным свойствам редкоземельных ферритов-гранатов. Обоснован выбор эпитаксиальных феррит-гранатовых структур на которых были проведены исследования. Приведена таблица основных магнитных характеристик исследованных образцов.

В третьей главе приводятся экспериментальные результаты по исследованию зависимости резонансных полей однородных ФМР от угла наклона внешнего магнитного поля в двухслойной феррит-гранатовой структуре. Вследствие взаимодействия слоев моды, соответствующие однородным ФМР разных слоев, в точках пересечения их резонансных полей расталкиваются (см рис. I). Экспериментально установлено, что величина расталкивания  $\delta H$  зависит от величины магнитного поля и от того, насколько сильно отличается анизотропия слоев. Так как, величина угла между намагниченностями слоев  $\Delta\theta$  зависит от величины магнитного поля и разности полей анизотропии слоев так же, как и  $\delta H$ , то можно предположить, что  $\delta H$  пропорцио-

Таблица

№ обр.	С о с т а в	d мкм	$4\pi M_{\text{в}}$ Гс	$K_{\text{л}}$ эрг/см <sup>3</sup>	q	$\gamma \cdot 10^{-7}$ (сек·э) <sup>-1</sup>	$\alpha$	$K_1$ эрг/см <sup>3</sup>	$\Lambda$ эрг/см
I.	(Y, Gd, La) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	0,18	1200	0		1,7	$6 \cdot 10^{-3}$	---	$3,5 \cdot 10^{-7}$
I.	(Y, Eu, Tm, Ca) <sub>3</sub> (Fe, Ge) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	3	460	$2,7 \cdot 10^4$	3,2	1,25	$2,5 \cdot 10^{-2}$	---	$2,9 \cdot 10^{-7}$
2.	(Y, Gd, La) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	0,06	380	0		1,76	$8 \cdot 10^{-3}$	$-1,8 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
2.	(Y, Eu, Tm, Lu) <sub>3</sub> (Fe, Mn, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	2,88	148	$7,7 \cdot 10^3$	8,8	1,47	$2 \cdot 10^{-2}$	$-4,2 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^{-7}$
3.	(Y, Bi, Lu) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	0,1	340	0		1,69	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$-1,5 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^{-7}$
3.	(Y, Bi, Lu) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	4,9	171	$1,1 \cdot 10^4$	9,6	1,5	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$-4 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^{-7}$
4.	(Y, Sm, Lu, Bi, Gd) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	0,73	620	$5,8 \cdot 10^4$	1,2	1,6	$1,1 \cdot 10^{-1}$	---	$2,6 \cdot 10^{-7}$
5.	(Y, Sm, Lu, Bi, Gd) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	0,48	640	$1,9 \cdot 10^4$	3,8	1,64	$5 \cdot 10^{-2}$	---	$2,5 \cdot 10^{-7}$
6.	(Y, Bi) <sub>3</sub> (Fe, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10,3	860	$6,8 \cdot 10^4$	2,3	1,7	$1,5 \cdot 10^{-2}$	---	---

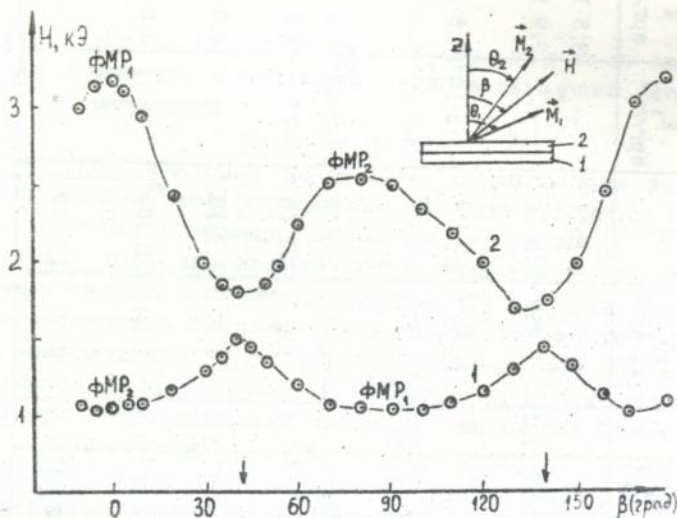


Рис. I

нально  $\Delta\theta$ . А поскольку обменная энергия имеет вид  $A \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2$ , то можно сделать вывод: основной вклад в расталкивание мод  $\delta H$  вносит обменное взаимодействие. Оно связывает векторы намагниченностей соседних слоев, в результате чего колебания намагниченностей разных слоев оказываются связанными. В местах расталкивания существуют две моды колебаний связанной системы.

Далее в третьей главе рассмотрены неоднородные колебания по толщине пленки. На рис.2 для обр. I (см таблицу) приведены экспериментальные записи полевой зависимости производной амплитуды СВЧ сигнала от магнитного поля при различных толщинах слоя 2 и двух ориентаций поля. Две наиболее интенсивные линии соответствуют однородным ФМР в слое I (в малых полях) и в слое 2 (в больших полях) при ориентации магнитного поля в плоскости пленки. Когда поле нормально к пленке, линии меняются местами. Между линиями однородных ФМР разрешается толщинная обменная серия СВР. (Ей соответствует квадратичный закон дисперсии.) Возбуждение серии СВР

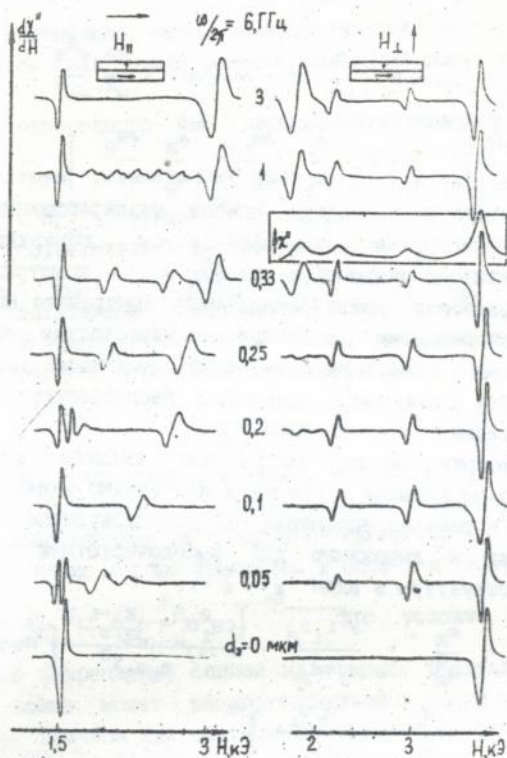


Рис. 2

возможно благодаря закреплению спинов на границе раздела слоев. Закрепление спинов на внешних границах раздела не происходит. Доказательством этого служит отсутствие СВР в однослойных пленках.

Далее в этой же главе представлен расчет высокочастотной восприимчивости двухслойной пленки. Теория основана на решении уравнения Ландау-Лифшица в каждом из слоев.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma M \times H_{\text{eff}} - \alpha^M \frac{\gamma}{M} M \times (M \times H_{\text{eff}}) \quad (1)$$

$$H_{\text{eff}} = H - \frac{2K}{M^2} (M - n(n \cdot M)) + \frac{2A}{M^2} \frac{\partial^2 M}{\partial z^2}$$

с граничными условиями (2)

$$\left. \frac{\partial M_2}{\partial z} \right|_{z=d_2} = \left. \frac{\partial M_1}{\partial z} \right|_{z=-d_1} = 0; \quad \left. \frac{A_1}{M_1} \frac{\partial M_1}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{A_2}{M_2} \frac{\partial M_2}{\partial z} \right|_{z=0}; \quad \left. \frac{M_1}{M_1} \right|_{z=0} = \left. \frac{M_2}{M_2} \right|_{z=0}$$

которые соответствуют модели спинов незакрепленных на внешних  $z = d_2$ ;  $z = -d_1$  и внутренней  $z = 0$  поверхностях раздела.  $z$  - координата;  $n$  - нормали к пленке;  $K$  - константа одноосной кристаллографической анизотропии;  $H_{\text{eff}}$  - внутреннее магнитное поле, определяющееся решением уравнения магнитостатики  $\text{div } (M + 4\pi M) = 0$  со стандартными электродинамическими граничными условиями;  $M$  - намагниченность слоя;  $A$  - константа неоднородного обмена;  $\alpha^M$  - параметр затухания;  $d$  - толщина слоя.

В геометрии когда постоянное внешнее магнитное поле ориентировано по нормали к пленке и достаточно велико  $H_0 \gg 2|K_1^M|/M_1$  ( $K^M = K - 2\pi M^2$ ) решение уравнения (1) для циркулярно поляризованных мод приводит к выражению для высокочастотной восприимчивости двухслойной структуры в виде  $\chi = \chi^+ + \chi^-$

$$\chi = -\frac{\rho_1}{q_1} - \frac{\rho_2}{q_2} + \frac{\sqrt{1_1^2}}{d_1 + d_2} \frac{(q_1^2 g - q_2^2 g^{-1})^2}{(q_1 q_2)^3} \left[ g q_1 \text{ctg} \left( \frac{q_2 d_2}{1_2} \right) + \frac{q_2}{g} \text{ctg} \left( \frac{q_1 d_1}{1_1} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

Здесь  $\rho_{1(2)} = d_{1(2)} \sqrt{c(d_1 + d_2)}$  - относительная толщина слоев.

$$1 = \sqrt{2A/M^2}; \quad q_{\pm}^2 = -\frac{H_0}{M} - \frac{2K^M}{M^2} \pm \frac{\omega(1 \mp i\alpha^M)}{\gamma M(1 + \alpha^M)}$$

$\omega$  - частота внешнего однородного переменного поля.

$$g = (M_1/M_2)^{1/2}; \quad g = (A_1/A_2)^{1/2}$$

Первые два слагаемых в  $\chi$  (3) совпадают с выражением для восприимчивости однослойных пленок с незакрепленными на поверхностях спинами, третье описывает взаимодействие слоев. Расчетная полевая зависимость  $\chi^{\text{сн}}$  для поляризации "+" диссипативной части восприимчивости представлена на вставке к рис. 2.

В процессе расчета восприимчивости находили решение уравнения

для переменной части намагниченности

$$-\left(q^2 + \frac{2A}{M^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) m = h \quad (4)$$

$m$  - переменная часть намагниченности,  $h$  - переменная часть магнитного поля. Общее решение уравнения имеет вид

$$m = C e^{ikz} + B e^{-ikz}$$

Условие однородного ФМР записывается в виде  $k = 0$ ,  $q = 0$ . Это

$$\text{соответствует резонансному полю } H_{fmr} = \frac{\omega}{\gamma} - \frac{2K^M}{M}$$

Если  $H_0 < H_{fmr}$ , тогда  $q > 0$ , при этом  $k$  - действительная величина,

и это соответствует распространяющейся спиновой волне с  $m \sim e^{ikz}$

Если  $H_0 > H_{fmr}$ , тогда  $q < 0$ , при этом  $k$  - мнимое, и это соответ-

ствует затухающей спиновой волне с  $m \sim e^{-kz}$ . Возникает "скин-эффект" в результате чего волна не распространяется в среде.

Глубина "скин-слоя" оценивается величиной

$$\delta = \left( \frac{2A}{M(H_0 - H_{fmr})} \right)^{1/2} = 1 \left( \frac{M}{H_0 - H_{fmr}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Сравнивая с экспериментом видим, что когда  $H_0 > H_{fmr1}$ ,  $H_0 > H_{fmr2}$

(см рис. 2 случай н) спиновая волна в среде не распространяется и

СВР не возбуждается ни в одном из слоев. Когда  $H_{fmr2} < H_0 < H_{fmr1}$ ,

спиновая волна распространяется в слое I и затухает в слое 2 на

глубине  $\delta_2 = 1_2 \left( \frac{M_2}{H_0 - H_{fmr2}} \right)^{1/2}$ . Это условие является физической

причиной закрепления спинов на границе раздела слоев. Когда  $H_0 <$

$H_{fmr2}$  волна может распространяться в обеих средах, "скин-эффекта"

нет, нет причины для закрепления спинов и следовательно серия СВР

не возбуждается ни в одном из слоев.

Оценка глубины "скин-слоя" по формуле (5) дает  $\delta = 0,06$  мкм

Экспериментальная оценка  $\delta_3 = 0,05$  мкм (см рис. 2).

В четвертой главе рассмотрены резонансные свойства системы для

случая, когда слой I находится в полях, больших поля насыщения, а

слой 2 разбит на домены. Полная картина экспериментальных

зависимостей резонансных частот от планарного магнитного поля в

широком диапазоне частот 0.4 - 4 ГГц представлена на рис. 3. На

высоких частотах, в полях больших  $H_{s2}$ , ( $H_{s2}$  - планарное поле

насыщения слоя 2) существует две линии ФМР, - в слое I и в слое 2 и

СВР в слое 2. В полях, меньших  $H_{s2}$ , видны резонансы в доменах слоя

2 (ДФМР). Здесь же линия ФМР<sub>1</sub> расщепляется в дублет. Этот дублет

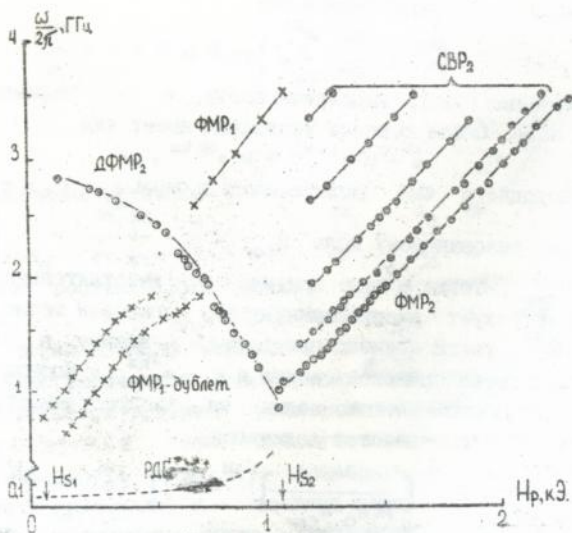


Рис. 3

лежит в интервале полей  $H_{s1} < H < H_{s2}$ , где слой I намагничен, а слой 2 содержит домены ( $H_{s1}$  - планарное поле насыщения слоя I).

Далее экспериментально показано, что интенсивность линии ФМР-дублета слоя I определяется площадью, занимаемой соответствующими доменами слоя 2. При увеличении (уменьшении) площади, занимаемой доменами одного сорта интенсивность одной из линий ФМР-дублета увеличивается (уменьшается), а другой уменьшается (увеличивается).

Величина и угловая зависимость резонансных полей рассчитана в простой модели изолированного слоя I, неоднородно подмагничиваемого доменами слоя 2. Плотность энергии для слоя I записывается в виде

$$U = K_1 C \frac{\cos^4 \theta}{4} + \frac{\sin^4 \theta}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \cos^3 \theta \sin \theta \cos 3\varphi + 2\pi M_1^2 \sin^2 \theta - H_p M_1 \cos \theta \cos(\varphi - \alpha) + H_{ef} M_1 \sin \theta \quad (6)$$

$\theta$  и  $\varphi$  - полярный и азимутальный углы вектора  $\mathbf{m}$ , (угол  $\theta$  отсчитывается от плоскости пленки)  $\alpha$  - угол наклона магнитного поля в плоскости пленки отсчитывается от направления  $[112]$ ,  $H_{ef}$  - эффективное поле, действующее на слой I.

$$H_{ef} = H_{dz} + H_e \quad (7)$$

$H_{dz} = 0,707 \cdot 4\pi M_2$  - нормальная компонента поля рассеяния на поверхности в центральной части ЦМД [1],  $H_e$  - нормальная компонента обменного поля. Равновесные значения углов  $\theta_0$  и  $\varphi_0$  определялись из уравнений

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \theta} \right|_{\theta_0} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi_0} = 0 \quad (8)$$

С помощью известного соотношения [2]

$$\omega = \frac{\gamma}{M_1 \cos \theta_0} \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial \theta \partial \varphi} \right]_{\theta_0 \varphi_0}^{1/2} \quad (9)$$

расчитывались зависимости резонансных полей  $H_p(\omega)$ , которые представлены на рис. 4.; доменной структуре с равным соотношением

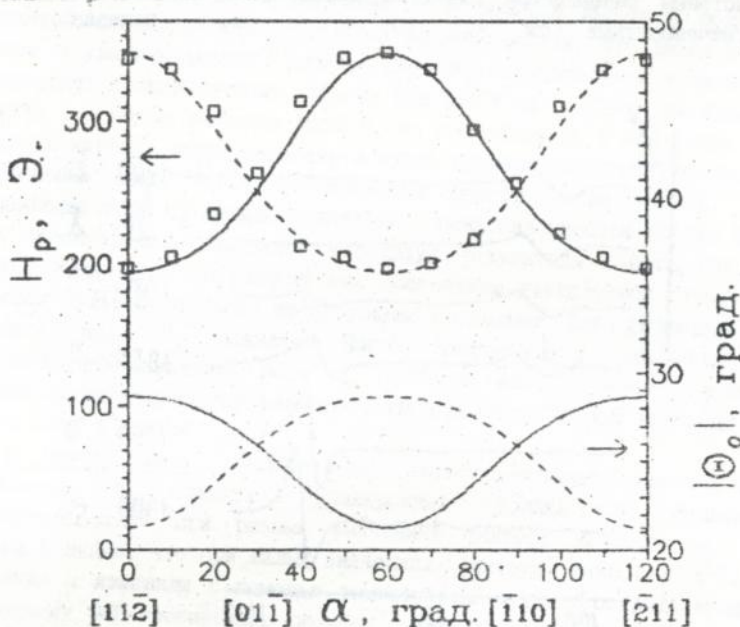


Рис. 4

"черных" и "белых" доменов с  $H_{ef} > 0$ ,  $\theta > 0$  соответствует сплошная линия, а с  $H_{ef} < 0$ ,  $\theta < 0$  соответствует пунктирная линия. Экспериментальные точки обозначены на этом рисунке квадратиками. Здесь же приведена зависимость равновесного угла наклона вектора намагниченности  $\theta_0$  от направления внешнего магнитного поля  $\alpha$  в

плоскости пленки. Если магнитное поле ориентировано в направлении типа (110) линии ФМР-дублета сливаются в одну. Эта ориентация соответствует вырожденному случаю, когда равновесным ориентациям вектора намагниченности под "черными" и "белыми" доменами соответствуют равные по модулю значения  $e_0$ . Для всех остальных ориентаций кубическая анизотропия приводит к расщеплению ФМР в слое I на две линии. Наилучшее приближение экспериментальных значений резонансного поля к расчетным зависимостям достигается при  $H_{ef} \approx 300a$  (см рис. 4).

Далее в четвертой главе описано явление расщепления линии ФМР в дублет в случае неоднородных по толщине слоев. Также в этой главе рассмотрены резонансные свойства двухслойных пленок с большими намагниченностями (см табл. обр. 4). На рис. 5 показано, как

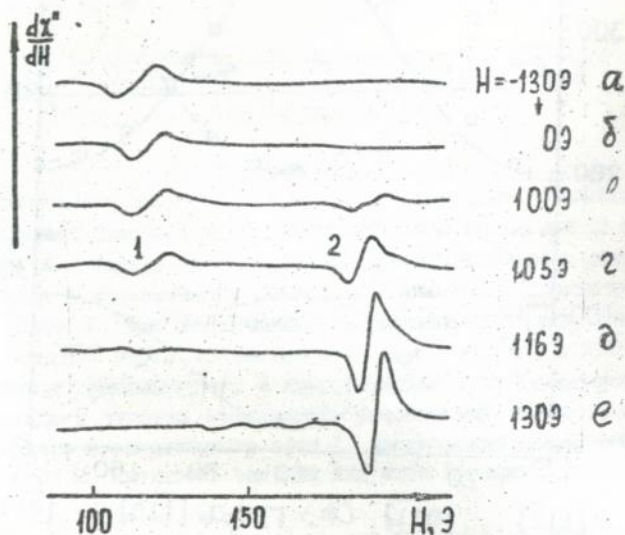


Рис. 5

изменялось резонансное поглощение слоя I (производная диссипативной части восприимчивости по магнитному полю) в зависимости от состояния пленки, которое изменялось с помощью импульса поля  $H_z$ .

При этом внешнее магнитное поле направлено вдоль оси  $[112]$  в плоскости пленки, а поле  $H_z$  — перпендикулярно к плоскости пленки. Из рисунка видно, что существует два равновесных состояния двухслойной пленки, которым соответствуют линии 1 и 2, различающиеся своими резонансными полями и интенсивностями. Состояние б) получают путем намагничивания пленки в плоскости типа  $[112]$  магнитным полем до насыщения слоя 2 и последующем уменьшении его до нуля. Переход из метастабильного состояния б) см рис. 5 в основное состояние д) осуществляется с помощью импульса поля  $H_z$  положительной полярности (поле  $H_z$  направлено так, что диаметр ЦМД в слое 2 увеличивается). Импульс поля  $H_z$  отрицательной полярности не приводит к аналогичному эффекту (см рис. 5 а)). Также не удается перейти с помощью импульса поля  $H_z$  из состояния д) в состояние б). Подобную картину можно записать и вдоль других кристаллографических направлений типа  $[112]$  в плоскости пленки, если учесть, что направление поля  $H_z$  должно совпадать с намагниченностью внутри ЦМД. Этот эффект можно объяснить используя результаты работы [3], в которой показано, что равновесным состоянием двухслойной структуры являются мультистабильные неоднородные состояния. При прикладывании импульса поля  $H_z$  меняется число неоднородных состояний и при некотором значении поля  $H_z$  остается одно нулевое решение, соответствующее плавному развороту на агниченности при переходе из одного слоя в другой.

В пятой главе представлены частотно-полевые зависимости резонансов в пленках субмикронных толщин с большими намагниченностями при разных значениях фактора качества  $q$ . Из рисунка 6 видно, что при малых значениях фактора качества  $q=1,19$  (значения  $q$  изменяли с помощью температуры) мода, соответствующая однородному ФМР насыщенного образца, непрерывным образом переходит в моду, соответствующую резонансу доменных границ (РДГ) в области полей с доменной структурой (см ветви 1, 8). Когда фактор качества  $q \gg 1$  в области полей насыщения существует ступенька между модами РДГ и ФМР. При уменьшении величины  $q$  ступенька исчезает и наблюдается сращивание мод.

Далее в этой же главе представлены частотно-полевые зависимости доменных мод ФМР  $v_1$ -содержащего (см табл. обр. 6). На вставке к рис. 7 показаны 4 моды, которые предсказывает теория [4]. Моды а и б возбуждаются перпендикулярным  $v_4$ -полем и соответствуют синфазным колебаниям намагниченности в доменах. Моды с и д

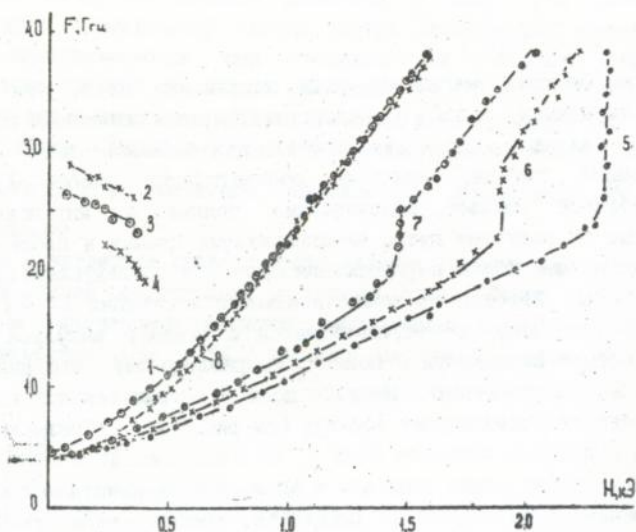


Рис. 6.

возбуждаются параллельным вч-полем и соответствуют противофазным колебаниям намагниченности. Моды а и д соответствуют случаю, когда внешнее магнитное поле параллельно ДГ, моды с и в - перпендикулярно. Все это справедливо для пленок с полосовой доменной структурой. На рис. 7 показаны экспериментальные зависимости для лабиринтной структуры. Лабиринтную структуру можно представить как участки полосовой ДС, ориентированные перпендикулярно и параллельно внешнему полю. Предполагается, что возбуждающиеся типы колебаний соответствуют вышеуказанным модам (см рис. 7). Из рисунка видно, что кривые существенно деформируются в средней части. Эта деформация является результатом связывания мод. Взаимодействие характеризуется расталкиванием кривых и "обменом" интенсивностей мод.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении приведены выражения для действительной и мнимой части высокочастотной восприимчивости.

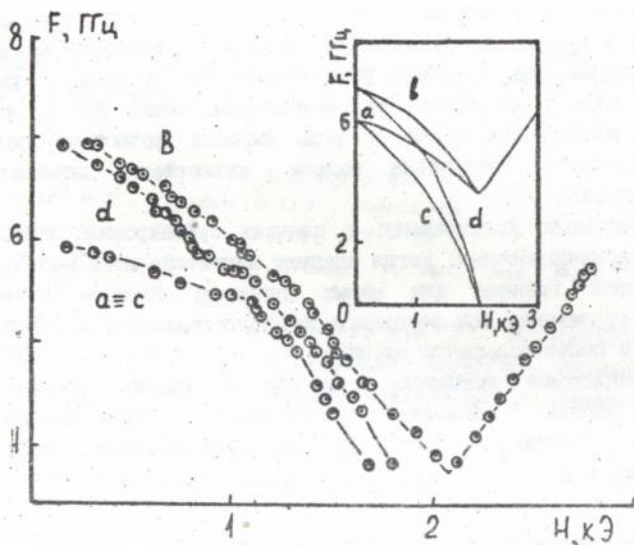


Рис. 7

### ВЫВОДЫ

1. Установлено, что колебания, возбуждающиеся в разных слоях двухслойной феррит-гранатовой структуры взаимодействуют между собой. Моды, соответствующие однородным ФМР разных слоев в точках пересечения их резонансных полей расталкиваются. Основной вклад в величину расталкивания мод вносит обменное взаимодействие (величина расталкивания зависит от величины угла между намагниченностями слоев).

2. Обнаружено, что в двухслойных пленках при определенных толщинах разрешается обменная толщинная серия СВР между линиями, соответствующими однородным ФМР в разных слоях. Установлено, что возбуждение СВР между двумя частотами (полями) однородных ФМР объясняется явлением "скин-эффекта" на внутренней границе раздела слоев. Теоретически и экспериментально оценена глубина "скин-слоя".

3. Построена теоретическая модель, описывающая высокочастотную восприимчивость двухслойной пленки, для случая когда внешнее магнитное поле ориентировано нормально к пленке.

4. Экспериментально и теоретически установлено, что расщепление линии ферромагнитного резонанса в двухслойной феррит-гранатовой пленке обусловлено обменным взаимодействием слоев, кубической анизотропией и полями рассеяния доменов в ненасыщенном слое.
5. Экспериментально установлено, что двухслойные структуры могут существовать в разных равновесных состояниях - основном и метастабильном, которые различаются резонансными свойствами: (разные резонансные поля и интенсивности резонансных линий ФМР и разные зависимости резонансных полей от угла наклона магнитного поля в плоскости пленки). Предложена модель, качественно объясняющая описанные явления.
6. Экспериментально установлено: в пленках субмикронных толщин с большими намагниченностями, когда внешнее магнитное поле направлено вдоль доменной границы для малых значений фактора качества наблюдается сраживание мод резонанса доменных границ и однородного ФМР в области полей насыщения пленки.
7. Для лабиринтной доменной структуры в полях параллельных плоскости пленки обнаружены деформации частотно-полевых зависимостей доменного ФМР, которые объясняются эффектом взаимодействия мод.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гришин А. М., Шкарь В. Ф., Деллалов В. С., Николаев Е. И., Линник А. И. Спин-волновой резонанс в двухслойных пленках ферритов-гранатов. - В сб. III Советско-чехословацкий семинар "Физика магнитных доменов и фазовые переходы". Тез. докл. Донецк. 19-23 сент. 1988, с. 70.
2. Grishin A. M., Dellalov V. S., Shkar V. F., Nikolayev E. I., Linnik A. I. Spin-wave resonances in two-layer garnet films. - Phys. Lett. A, 1989, v. 140, 3, p. 133 - 135.
3. Барьяхтар Ф. Г., Деллалов В. С., Купрун Л. И., Шкарь В. Ф. Особенности магнитных резонансов в субмикронных пленках с малым фактором качества. - ФТТ, 1987, т. 29, 9, с. 2847 - 2849.
4. Jirsa M., Dellalov V. S., and Shkar V. F. The domain FMR excitations in uniaxial garnet films in fields parallel to the film. - Phys. Stat. Sol. (a), 1991, 123, к. 61 - 65.

5. Гришин А.М., Деллалов В.С., Николаев Е.И., Шкарь В.Ф., Ямпольский С.В. ФМР-дублет в двухслойных феррит-гранатовых пленках. - ЖЭТФ. 1993, т. 104, 4, с. 3650 - 3656.

#### Л и т е р а т у р а .

1. Druyvesteyn W.F., Tjaden D.L.A., Dorllejn J.W.F. // Philips Research Reports. - 1972, v. 27, I, p. 7 - 27.
2. Hiroshi Makino and Yasuharu Hidaka. // Mat. Res. Bull., 1981, v. 16, p. 957 - 966.
3. Гришин А.М., Ямпольский С.В., Ямпольская Г.И. Мультистабильные неоднородные состояния в многослойных магнитных пленках. - В сб. тез. докл. семинара по магнитоэлектронике. г. Симферополь. 1991, с. 80.
4. Smit J., Beljers H.G. Ferromagnetic resonance absorption in  $BaFe_{12}O_{15}$  highanisotropic crystal. - Philips Res. Rep., 1955, 10, p. 113 - 130.

*De*

Ответственный за выпуск М.А. Белоголовский  
Подписано к печати 4.04.94  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,4 Уч.-изд. л. 1,3  
Тираж 100 экз. Заказ 2

---

Ротапринт ИЭП АН Украины.  
340048, Донецк 48, ул. Университетская, 77

461773

AB 29.608

**AB 29.608**