

01;05;09;11;12

## Объемные магнитостатические волны в обменно-связанных ферритовых пленках

© С.Л. Высоцкий<sup>1</sup>, Г.Т. Казаков<sup>1</sup>, А.В. Маряхин<sup>2</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал института радиотехники и электроники РАН,  
410019 Саратов, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт материалов электронной техники,  
410026 Калуга, Россия

(Поступило в Редакцию 31 марта 1997 г.)

Исследовано влияние обменной связи слоев на распространение дипольных объемных магнитостатических волн в нормально и касательно намагниченных двухслойных эпитаксиальных ферритовых структурах. Показано, что указанное влияние проявляется в виде эффектов динамического закрепления спинов на межслойной границе и формирования единого для структуры спектра дипольно-обменных волн. При этом на частотах синхронизма дипольных и обменных волн потери дипольных волн растут, а в дисперсии возникают аномальные участки. В пленках, намагниченных в "трудном" направлении относительно оси нормальной одноосной поверхностной анизотропии, дипольные объемные магнитостатические волны могут резонансно взаимодействовать с поверхностными спиновыми волнами, поддерживаемыми границами с закрепленными спинами.

### Введение

Использование многослойных ферритовых структур в качестве волноводов магнитостатических волн (МСВ) представляет интерес с точки зрения расширения возможностей управления их дисперсией и затуханием, а также формирования новых типов спин-волновых возбуждений [1–3]. Наиболее полно указанные возможности реализуются в тех случаях, когда частотные диапазоны существования МСВ в отдельных слоях оказываются достаточно близки и возникают области вырождения спектров изолированных пленок — ферритовые пленки, составляющие многослойную структуру и являющиеся по существу связанными волноводами МСВ. В пренебрежении магнитоупругим взаимодействием<sup>1</sup> выделяют два основных механизма связи пленочных волноводов: через дипольные поля [4–6] и через обменное взаимодействие на границах пленок [7,8]. В случае, когда на границе пленок между постоянными межслойного обмена  $A_{12}$  и энергии поверхностной анизотропии  $D$  выполняется соотношение  $A_{12} \gtrsim D$ , в формировании спектра спин-волновых возбуждений многослойной структуры заметное участие принимают оба указанных механизма [9,10]. При этом влияние обменной связи слоев на распространение МСВ наиболее ярко проявляется на частотах синхронизма дипольных и обменных волн структуры и связано, во-первых, с возникновением динамического закрепления спинов на межслойной границе [11], во-вторых, с процессами формирования единого спектра обменных волн структуры, сопровождающимися возникновением эффекта "расталкивания" [12] мод спин-волнового резонанса (СВР) слоев в области вырождения. Цель данной работы — исследовать влияние межслой-

ного обмена на свойства прямых (ПОМСВ) и обратных (ООМСВ) объемных магнитостатических волн в двухслойных ферритовых пленках.

Отметим, что влияние межслойного обмена на распространение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в двухслойной ферритовой структуре рассматривалось в работах [13–15]. Было показано, что обусловленное обменной связью динамическое закрепление спинов приводит, как и поверхностная анизотропия в случае одиночных пленок [16–19], к резонансному росту потерь и возникновению аномальных участков дисперсии на частотах СВР. Следует ожидать, что и в случае ПОМСВ и ООМСВ, распространяющихся в обменно-связанных ферритовых пленках, обменная связь приведет к аналогичным эффектам. В этом случае при интерпретации экспериментов важно разделить вклады в изменения дисперсии и затухания МСВ, обусловленные параметрами  $D$  и  $A_{12}$ . Поэтому в данной работе сделан определенный акцент на этой проблеме.

Кроме того, мы обсудим возможность резонансного взаимодействия дипольных объемных МСВ с поверхностными спиновыми волнами, которые могут существовать вблизи границ при антиферромагнитном  $A_{12} < 0$  характере межслойного обмена [7]. Поскольку существование таких поверхностных волн возможно лишь при определенном типе поверхностной анизотропии, то такая постановка задачи может представлять интерес для диагностики поверхностных состояний спинов в многослойной структуре.

### Результаты расчетов

Пусть двухслойная ферритовая структура расположена так, что ось  $Oz$  перпендикулярна поверхности структуры, а граница между пленками совпадает с плоско-

<sup>1</sup> Фононный механизм формирования спектра спин-волновых возбуждений в многослойной структуре рассматривался в работе [4].

стью  $xOy$ . Пленки характеризуются толщиной  $d_l$ , намагниченностью насыщения  $4\pi M_{0l}$ , обменной жесткостью  $A_l$ , шириной линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H_l$ , где  $l = 1, 2$  — номер слоя в структуре, причем слой  $l = 2$  расположен в области пространства  $z < 0$ . Обменную связь слоев на границе  $z = 0$  характеризуем параметром межслоеного обмена  $A_{12}$ . Пленки считаются неограниченными в плоскости  $xOy$ , однородными и изотропными в объеме и обладают нормальной одноосной поверхностной анизотропией, характеризуемой константами поверхностной анизотропии  $D_{li}$ ,  $i = 1, 2$  отвечает нижней и верхней поверхностям  $l$ -й пленки. Рассматриваются волны, распространяющиеся вдоль оси  $Ox$ .

## Геометрия ПОМСВ

Направим внешнее магнитное поле  $H_0$  вдоль оси  $Oz$ . Следуя [9], запишем совместное решение уравнений магнитостатики и Ландау–Лифшица в слоях в виде

$$h_{xl} = \left( \sum_{j=1}^6 B_j \exp iK_j z \right)_l T, \quad h_{zl} = \left( \sum_{j=1}^6 \frac{K_j}{q} B_j \exp iK_j z \right)_l T,$$

$$m_{yl} = \left( \sum_{j=1}^6 \chi_j B_j \exp iK_j z \right)_l T,$$

$$m_{xl} = \left( \sum_{j=1}^6 \alpha_j B_j \exp iK_j z \right)_l T, \quad (1)$$

где  $T = \exp i(qx - \omega t)$ ,  $B_{jl}$  — неизвестные амплитуды,  $K_{jl}$  — корни характеристического уравнения для  $l$ -й пленки

$$(p^3 + ap^2 + bp + c)_l = 0, \quad (2)$$

где  $p = K^2 + q^2$ , а коэффициенты  $a, b, c$  имеют вид

$$a = 2\omega_H / \omega_{ex}, \quad b = (\omega_H^2 - \omega^2 + q^2 \omega_m \omega_{ex}) / \omega_{ex}^2,$$

$$c = q^2 \omega_m \omega_H / \omega_{ex}^2, \quad (3)$$

где  $\omega_H = \gamma(H_0 - 4\pi M_0)$ ,  $\omega_m = \gamma 4\pi M_0$ ,  $\omega_{ex} = 2\gamma A / M_0$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение.

Коэффициенты  $\chi_j, \alpha_j$ , входящие в выражения для компонент намагниченности  $l$ -й пленки, возьмем в виде

$$\chi_j = \frac{i\omega\gamma M_0}{\tilde{\omega}_H^2 - \omega^2}, \quad \alpha_j = \frac{\tilde{\omega}_H \gamma M_0}{\tilde{\omega}_H^2 - \omega^2},$$

$$\tilde{\omega}_H = \omega_H + \omega_{ex} (K_j^2 + q^2). \quad (4)$$

В выражениях (3), (4) опущены индексы  $l$ , указывающие на принадлежность соответствующих коэффициентов  $l$ -й пленке.

Выражения для полей в областях  $z > d_1$  и  $z < -d_2$  имеют вид

$$h_x^3 = B_3 \exp(-qz)T, \quad h_z^3 = ih_x^3|_{z>d_1},$$

$$h_x^4 = B_4 \exp(qz)T, \quad h_z^4 = -ih_x^4|_{z<-d_2}. \quad (5)$$

Считаем, что на границах структуры при  $z = d_1, 0, -d_2$  выполнены условия непрерывности тангенциальных полей  $h_x$  и нормальных компонент магнитной индукции  $b_z = h_z + 4\pi m_z$

$$h_x^3 = h_x^1, \quad b_z^3 = b_z^1|_{z=d_1},$$

$$h_x^1 = h_x^2, \quad b_z^1 = b_z^2|_{z=0},$$

$$h_x^2 = h_x^4, \quad b_z^2 = b_z^4|_{z=-d_2}. \quad (6)$$

Обменные граничные условия запишем в виде, характерном для нормальной одноосной поверхностной анизотропии [21,9],

$$\frac{\partial m_1}{\partial z} + L_{11}m_1 = 0|_{z=d_1},$$

$$\frac{\partial m_2}{\partial z} - L_{22}m_2 = 0|_{z=-d_2},$$

$$\frac{\partial m_1}{\partial z} - L_{12}m_1 - \frac{A_{12}}{A_1} \left( m_1 - \frac{M_{01}}{M_{02}} m_2 \right) = 0|_{z=0},$$

$$\frac{\partial m_2}{\partial z} + L_{21}m_2 + \frac{A_{12}}{A_2} \left( m_2 - \frac{M_{02}}{M_{01}} m_1 \right) = 0|_{z=0}, \quad (7)$$

где параметры  $L_{li} = D_{li}/A_l$  характеризуют закрепление спинов на верхней ( $i = 1$ ) и нижней ( $i = 2$ ) поверхностях  $l$ -й пленки,  $m_l = m_{xl}, m_{yl}$ .

Дисперсионное уравнение для волн получалось из условия совместности системы уравнений (6), (7) при подстановке в них соответствующих выражений для полей и намагниченностей с амплитудами  $B_{jl}, B_3, B_4$ , не равными нулю. В нашем случае это сводится к нахождению условий обращения в нуль определителя 14-го порядка, что выполнялось численно. При расчетах дисперсионных кривых потери не учитывались, задавалось волновое число МСВ  $q$ , а частота  $\omega$  отвечала корням дисперсионного уравнения. При расчетах затухания волн потери учитывались стандартной заменой  $\omega_H \rightarrow \omega_H - i\gamma\Delta H$ . Частота МСВ в этом случае считалась заданной генератором, а значения волнового числа  $q = q' + iq''$  отвечали корням определителя, где действительная  $q'$  и мнимая  $q''$  части волнового числа определяют соответственно закон дисперсии и потери МСВ. При выборе значений волнового числа выбирались те, которые наиболее близки к значениям  $q$  основной моды объемных волн.

Отметим, что в экспериментах о характере потери магнитостатических волн можно судить по виду амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) макета типа линии задержки. Если при расчетах АЧХ не учитывать потери на преобразование СВЧ сигнала в МСВ и влияние "прямой" наводки между преобразователями, то вид АЧХ определится выражением

$$P = -8.68q''S, \quad (8)$$

где  $P$  — уровень выходного сигнала в dB,  $S$  — расстояние между преобразователями в макете.

**Таблица 1.** Параметры исследованных структур

№ образца	Слой $l$	$4\pi M_0, Gs$	$d, \mu m$	$A, 10^{-7} \text{ erg/cm}$
1	1	400	13.8	1
	2	700	12.2	1.2
2	1	1650	4.92	3.8
	2	800	17	2.2
3	1	640	6	2
	2	1750	8	3.85

Поскольку в экспериментах, выполненных с использованием стандартной радиоизмерительной аппаратуры (типа измерителя разности фаз и ослаблений ФК2-18), регистрируются сигналы с уровнем не ниже  $-60 \text{ dB}$ , то при обсуждении результатов расчетов участки АЧХ уровня ниже  $-50 \text{ dB}$  не рассматриваются. В нормально намагниченных двухслойных пленках таким участкам АЧХ отвечают участки спектра спин-волновых мод, которые отождествляют с областью частот существования дипольных ПОМСВ в изолированных слоях [5–7]

$$\omega_{Hl} \leq \omega \leq \omega_{0l}, \tag{9}$$

где  $\omega_{Hl}$  и  $\omega_{0l} = \sqrt{\omega_{Hl}(\omega_{Hl} + \omega_{ml})}$  — соответственно длинноволновая ( $q \rightarrow 0$ ) и коротковолновая ( $q \rightarrow \infty$ ) границы спектра ПОМСВ  $l$ -й пленки.

При расчетах дисперсионных зависимостей и АЧХ будем обращаться к структурам с параметрами, указанными в табл. 1. Параметры затухания и расстояние между преобразователями примем равными  $\Delta H_1 = \Delta H_2 = 0.2 \text{ Oe}$ ,  $S = 4 \text{ mm}$ . Будем интересоваться поведением дисперсии и потерь волн в зависимости от параметров закрепления спинов  $L_{li}$  и межслойного обмена  $A_{12}$ . Будем также учитывать, что константы поверхностной анизотропии в ферритовых пленках характеризуются значениями  $|D_{li}| \leq 0.1 \text{ erg/cm}^2$  [22]. В этом случае параметры закрепления поверхностных спинов  $L_{li} = D_{li}/A_l$  принимают значения  $|L_{li}| \leq 10^6 \text{ cm}^{-1}$ .

На рис. 1–4 для интервалов частот (9) показаны соответственно результаты расчетов АЧХ и законов дисперсии спин-волновых мод в структуре 1 при поле  $H_0 = 800 \text{ Oe}$  и различных значениях параметров  $L_{li}$  и  $A_{12}$ . Можно видеть, что в АЧХ имеются две области прохождения сигнала, обозначенные *I* и *II*, которым отвечают участки спектра, занимаемые ПОМСВ в изолированных слоях.

В отсутствии межслойного обмена  $A_{12} = 0$  и при значениях параметров закрепления  $L_{11} = L_{22} = 0$ ,  $L_{21} = L_{12} = -5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$  АЧХ в областях *I* и *II* имеет вид, типичный для изолированных пленок с односторонним закреплением спинов [24,25] (рис. 1, *a*). На это указывает, по-первых, наличие глубоких ”провалов”, положение которых по частоте хорошо описывается выражением для частот спин-волнового резонанса (СВР)

в нормально намагниченной пленке [21]

$$f_N = f_H + f_{ex} Q_N^2, \tag{10}$$

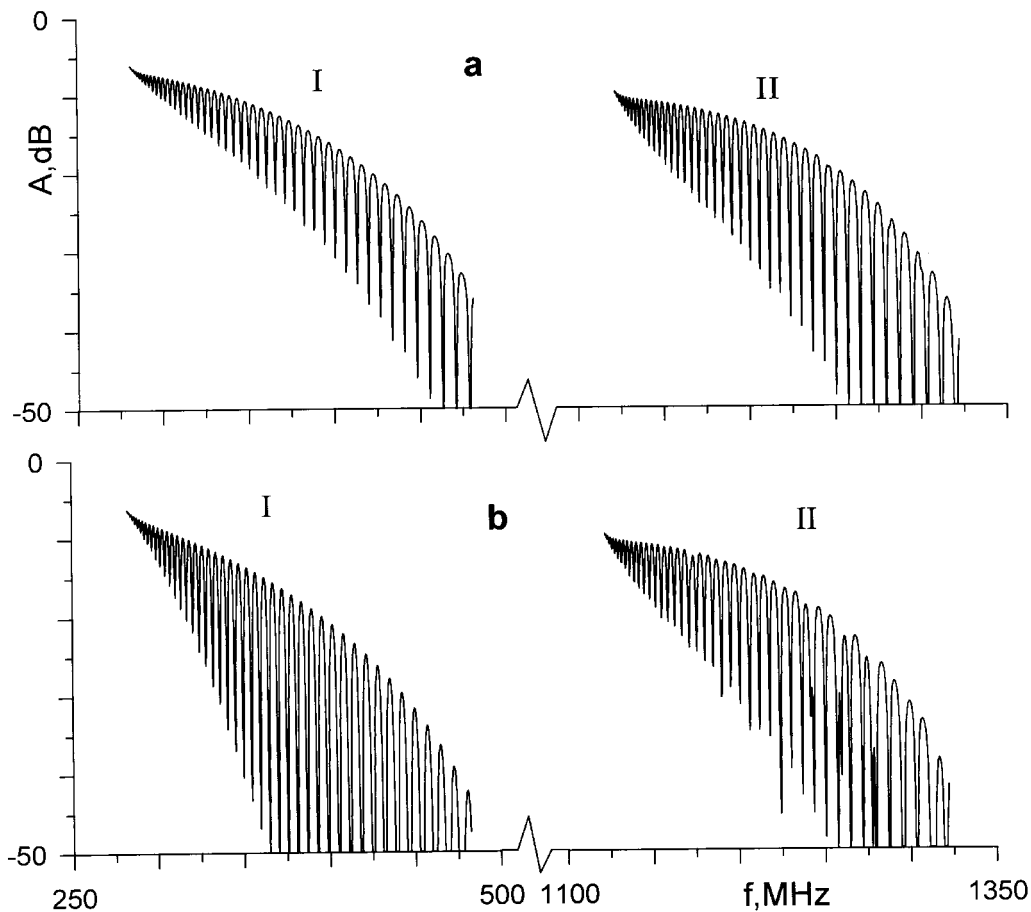
где  $f = \omega/2\pi$ ,  $Q_N = (\pi N)/d$  — волновое число спиновой волны на частоте СВР номера  $N$ . Во-вторых, глубина ”провалов” в каждой из областей *I* и *II* монотонно возрастает с ростом частоты ПОМСВ.

Из сравнения вида областей *I* и *II* АЧХ и соответствующих им участков спектра на рис. 4 видно, что при  $A_{12} = 0$  в области *II* АЧХ ”провалы” заметно проявляются только на частотах пересечения основной моды ПОМСВ пленки  $l = 2$  и спин-волновых мод этого же слоя  $l = 2$ . Однако в данном частотном интервале присутствуют спин-волновые моды слоя с большей намагниченностью  $l = 1$ , частоты отсечки которых  $\Omega$  определяются выражением (10) при подстановке значений параметров пленки слоя  $l = 1$  и для частотного диапазона области *II* на рис. 1 имеют номера  $N_1 = 101 \dots 119$  (на рис. 4 указанные частоты отмечены стрелками). Указанные моды слоя  $l = 1$ , разумеется, взаимодействуют с модами слоя  $l = 2$ , что проявляется, в частности, в ”расталкивании” дисперсионных кривых. Эффективность данного взаимодействия определяется в основном величинами параметров закрепления спинов в слое  $l = 1$  и оказывается, как правило, гораздо меньше, чем взаимодействие мод слоя  $l = 2$  друг с другом. Сказанное иллюстрирует вставка *I* к рис. 4, где показан характер дисперсии спин-волновых мод слоя  $l = 2$  с номерами  $N_2 \approx 14 \dots 16$  и спин-волновой моды слоя  $l = 1$  с номером  $N_1 \approx 103$ , которая на вставке отмечена звездочкой. При величинах параметров закрепления поверхностных спинов  $|L_{11}|, |L_{12}| > 10^5 \text{ cm}^{-1}$  в области 2 АЧХ становятся заметны ”провалы” на частотах СВР слоя  $l = 1$  (рис. 1, *b*). Отметим, что при указанных величинах закрепления спинов в слое  $l = 1$  в области *I* АЧХ заметно возрастают как глубина ”провалов”, так и ослабление сигнала на частотах вдали от резонанса ПОМСВ и спин-волновых мод пленки. В целом в пренебрежении обменной связью зависимости спектра и АЧХ от параметров структуры аналогичны случаю нормально намагниченных изолированных пленок [23,24].

На рис. 2 показаны результаты расчета АЧХ при одновременном учете закрепления поверхностных спинов вблизи межслойной границы в обменной связи слоев

**Таблица 2.** Величины частотных интервалов между глубокими ”провалами” в АЧХ структуры 1

$\delta f, \text{ MHz}$	$\Delta f, \text{ MHz}$
12	17
12	17
12	13
24	18
14	19
13	15



**Рис. 1.** АЧХ макета типа линии задержки для случая распространения ПОМСВ в отсутствие обменной связи в свободных спицах на внешних поверхностях структуры. Величины закрепления спинов на внутренних поверхностях: *a* —  $L_{21} = L_{12} = -5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , *b* —  $L_{12} = -5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ;  $L_{21} = -5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ .

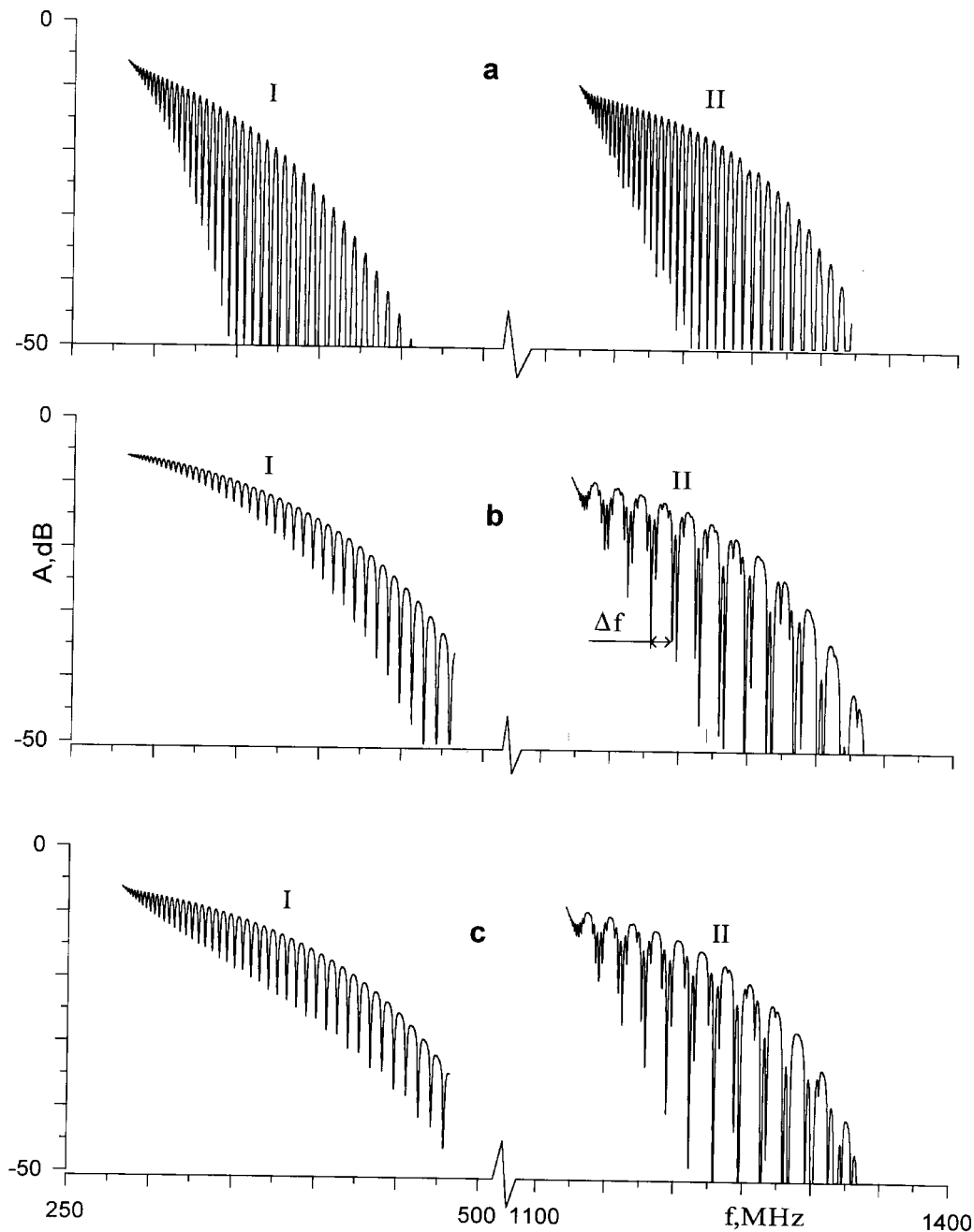
и случая когда  $D \sim A_{12} \approx 0.01 \text{ erg/cm}^2$ . При совпадении знаков констант поверхностной анизотропии и межслойного обмена глубина "провалов" в АЧХ в целом увеличивается и, кроме того, в области II в окрестности частот  $\Omega$ , отвечающих совпадениям спектров СВР изолированных пленок, появляется незначительная модуляция. Сказанное иллюстрирует рис. 2, *a*, где  $L_{11} = L_{22} = 0$ ,  $L_{21} = L_{12} = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_{12} = 0.01 \text{ erg/cm}^2$ .

В случае, когда знаки констант поверхностной анизотропии и межслойного обмена различны, модуляция глубины "провалов" области II АЧХ увеличивается (рис. 2, *b, c*). Частоты существования соседних наиболее глубоких "провалов" имеют значения, близкие к значениям частот  $\Omega$ , но не совпадают с ними. В табл. 2 приведены значения частотных интервалов  $\Delta f$  между соседними наиболее глубокими "провалами" в области АЧХ, отмеченной на рис. 2, *b* стрелками и отвечающей ПОМСВ со значениями волновых чисел  $q \approx 40 \dots 400 \text{ cm}^{-1}$ .

Указанное поведение АЧХ в области II согласуется с видом условий на закрепление спинов (7) на границе  $z = 0$  обменно-связанных пленок. Действительно, при условии  $L_{12}, L_{21} \sim A_{12}/A_1, A_{12}/A_2$  поверхностная

анизотропия и обменная связь дают сопоставимые вклады в закрепление спинов. При этом величина вклада, обусловленного обменной связью слоев, определяется соотношением высокочастотных компонент магнитных моментов пленок и имеет осциллирующий характер в окрестности частот  $\Omega$ , где  $m_1 \sim M_2$ . Вид АЧХ отвечает процессу формирования единого спектра спин-волновых мод структуры, что подтверждается также непосредственным расчетом значений частот СВР структуры в зависимости от параметра обменной связи  $A_{12}$  (вставка 2 к рис. 4).

Отметим, что при  $A_{12} > 0$  "расталкивание" частот СВР на частотах  $\Omega$  происходит "вверх" относительно частоты  $\Omega$  (вставка 2 к рис. 4). Тот факт, что частота одной из взаимодействующих мод остается практически совпадающей с частотой  $\Omega$ , означает, что по обе стороны от границы намагнитченности в слоях имеют близкие амплитуды и синфазны. Поэтому ферромагнитная обменная связь существенно не меняет характер распределения намагнитченности для этой моды и на межслойной границе закрепление спинов на данной частоте падает. С этой точки зрения понятно, что рост частоты "оттолкнувшейся" моды с увеличением параметра  $A_{12}$  об-

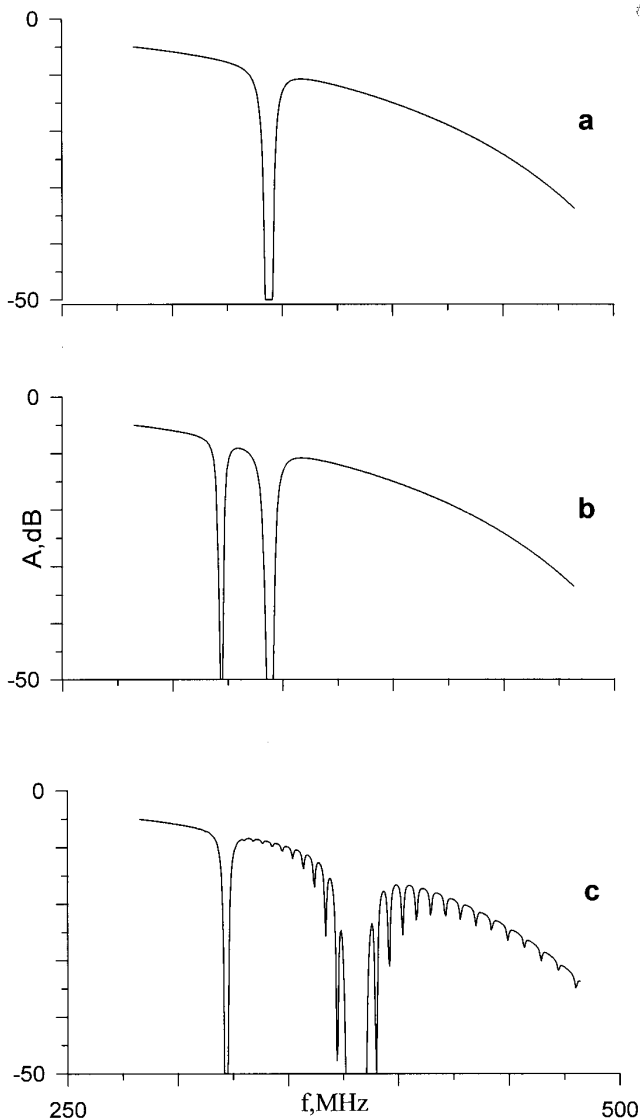


**Рис. 2.** АЧХ макета типа линии задержки для случая распространения ПОМСВ и свободных спинов на внешних поверхностях структуры. Величины параметров обменной связи и закрепления спинов на внутренних поверхностях: *a* —  $A_{12} = 0.01 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L_{21} = L_{12} = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ; *b* —  $A_{12} = -0.01 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L_{21} = L_{12} = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ; *c* —  $A_{12} = 0.01 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L_{21} = L_{12} = -10^4 \text{ cm}^{-1}$ .

условлен стремлением ферромагнитной обменной связи уменьшить несинфазность колебаний намагниченности по обе стороны от межслойной границы, что эквивалентно увеличению номера СВР и может быть отождествлено с ростом закрепления [11,21]. С учетом сказанного становится понятным существование в окрестности частоты  $\Omega$  наиболее глубокого провала на частотах  $\omega > \Omega$ . Антиферромагнитная обменная связь, наоборот, наиболее заметно меняет характер распределения намагниченности тех мод, которые синфазно колеблются

на границе  $z = 0$ . При этом частота "оттолкнувшейся" моды снижается (вставка 2 к рис. 4) и наиболее глубокие "провалы" в области 2 АЧХ существуют на частотах  $\omega < \Omega$ . Немонотонное изменение с частотой глубины "провалов" в области II АЧХ типа показанного на рис. 2, *b* и *c* сохраняется и в том случае, когда обменная связь пленок дает основной вклад в закрепление спинов на межслойной границе ( $|A_{12}| \gg |D|$ ).

Рассмотрим теперь условия, при которых в области I АЧХ возникнут резонансные особенности, связанные с



**Рис. 3.** Область I АЧХ макета типа линии задержки для случая распространения ПОМСВ. *a* — в отсутствие обменной связи для случая свободных спинов на внешних поверхностях структуры и  $L_{12} = 0$ ,  $L_{21} = -2.1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ; *b* — в отсутствие обменной связи для случая свободных спинов на поверхностях первого слоя и  $L_{21} = -2.1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ;  $L_{22} = -2.13 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ; *c* — для  $A_{12} = 0.004 \text{ erg/cm}^2$  и величин закреплений на поверхностях структуры, соответствующих случаю *b*.

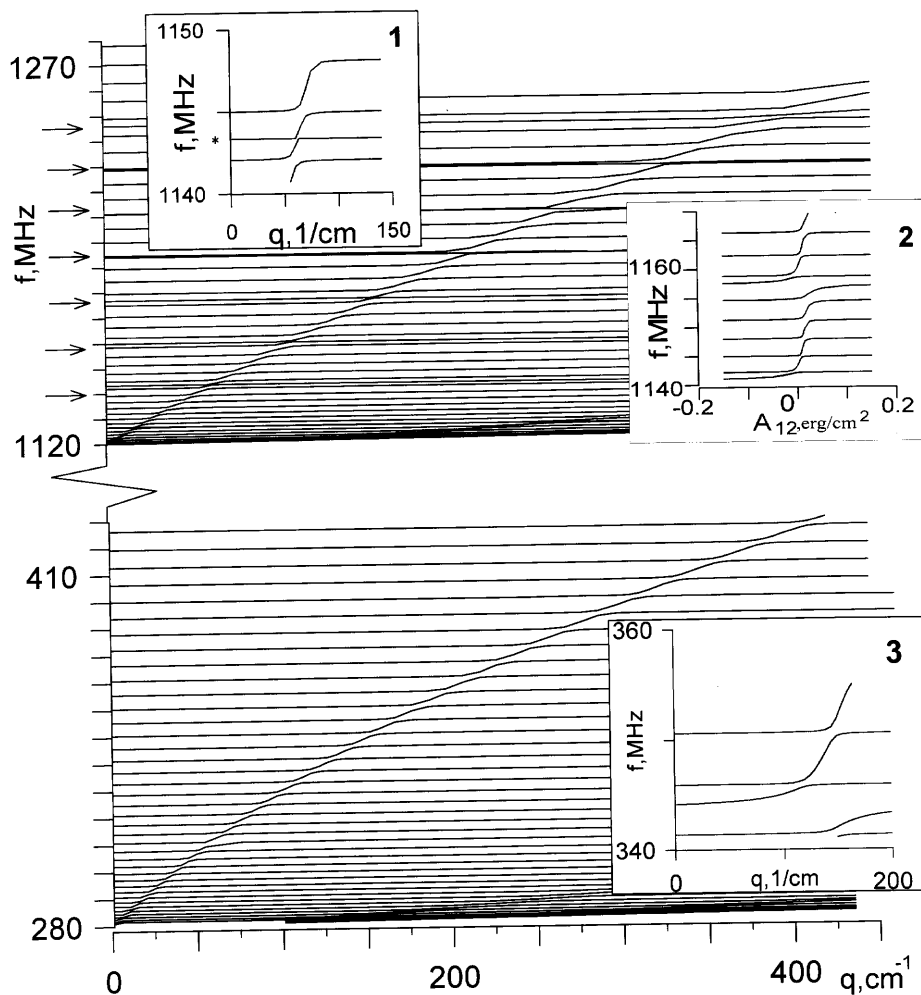
взаимодействием спин-волновых мод слоев, типа отмеченных для области II АЧХ на рис. 1 и 2. Из (9) и (10) легко видеть, что для рассматриваемой структуры, составленной из пленок с разными намагниченностями и помещенной в нормальное к поверхности магнитное поле, в полосу частот существования ПОМСВ слоя  $l = 1$  могут попасть только поверхностные моды СВР слоя  $l = 2$ , которые имеют мнимые значения волновых чисел  $Q_N$ . Таким моды СВР существуют в пленках с нормальной одноосной поверхностной анизотропией в случае намагничивания пленок в "трудном" направлении

относительно оси поверхностной анизотропии [21]. Для нормально намагниченных пленок поверхностные моды СВР могут существовать при нормальной одноосной поверхностной анизотропии типа "легкая плоскость", которой в условиях (7) отвечает  $L_{lj} < 0$ . На рис. 3, *a* показана область I АЧХ при значениях параметров закрепления  $L_{11} = L_{12} = L_{22} = 0$ ,  $L_{21} = -2.1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  и в отсутствие обменной связи слоев. Глубокий единичный "провал" на частотах  $\omega_S \approx 340 \dots 350 \text{ MHz}$  обусловлен взаимодействием ПОМСВ слоя  $l = 1$  с поверхностной обменной спиновой волной, которая поддерживается границей с закрепленными спинами при  $z = 0$ . Вставка 3 к рис. 4 иллюстрирует характер спектра спин-волновых мод в окрестности частоты  $\omega_S$ . Положение частоты  $\omega_S$  определяется главным образом значением параметров закрепления спинов  $L$  в пленке  $l = 2$  и частота  $\omega_S$  попадает в полосу частот существования ПОМСВ<sup>2</sup> слоя  $l = 1$  при значениях  $-2.3 \cdot 10^5 < L_{21} < -1.7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

Разумеется, в случае, когда в пленке  $l = 2$  спины на границе  $z = -d_2$  характеризуются параметром закрепления  $L_{22}$ , величина которого лежит в указанном диапазоне, то в АЧХ будет формироваться "провал", отвечающий взаимодействию ПОМСВ с поверхностной спиновой волной, бегущей по этой границе. Наконец, при одновременном закреплении спинов на обеих поверхностях пленки  $l = 2$  в области I АЧХ могут возникать два "провала", положение которых будет определяться значениями параметров  $L_{21}, L_{22}$ . Последний случай иллюстрирует кривая на рис. 3, *b*, рассчитанная при значениях параметров  $L_{21} = -2.1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $L_{22} = -2.13 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

Обменная связь пленок влияет главным образом на положение и форму только того "провала", который формируется за счет резонанса ПОМСВ слоя  $l = 1$  с поверхностной спиновой волной, бегущей в слое  $l = 2$  вблизи межслойной границы  $z = 0$  (рис. 3, *c*). Причем частота  $\omega_S$ , на которой возникает "провал", увеличивается при ферромагнитном характере обменной связи ( $A_{12} > 0$ ), а в случае антиферромагнитного характера ( $A_{12} < 0$ ) уменьшается. Одновременно с изменением положения "провала" обменная связь приводит к "обрамлению" его краев серией более мелких провалов, которые располагаются на частотах СВР слоя  $l = 1$  и глубина которых спадает по мере удаления от центральной частоты "провала". Возникновение этих особенностей связано с закреплением спинов на межслойной границе, которое индуцирует в структуре обменная связь. В самом деле, наличие собственных возбуждений в слоях на частоте  $\omega_S$  означает, что по обе стороны от границы высокочастотные намагниченности имеют амплитуды, отличные от нуля. Поверхностная спиновая волна в слое  $l = 2$  экспоненциально затухает в глубь пленки на расстояниях, определяемых корнями  $K_j$  характеристического

<sup>2</sup> Поскольку частоты поверхностных спиновых волн  $\omega_S$  в нормально намагниченных пленках имеют значения [21]  $\omega_S < \omega_H$ , где  $\omega_H$  определяется (3), то поверхностные спиновые волны слоя  $l = 1$  не могут резонансно взаимодействовать с ПОМСВ структуры и здесь не рассматриваются.



**Рис. 4.** Дисперсионная зависимость ПОМСВ при  $H_0 = 800$  Ое, рассчитанная в отсутствие обменной связи, свободных спинах на внешних поверхностях структуры и  $L_{12} = L_{21} = -10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

уравнения (2), и, являясь преимущественно обменной при  $q = 0$ , имеет практически нулевую амплитуду на расстояниях  $R \sim \sqrt{\omega_{ex}/(\omega_H - \omega_S)} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ . Столь быстрое падение амплитуды намагниченности в слое  $l = 2$  воспринимается при учете межслойного обмена намагниченностью слоя  $l = 1$  как наличие закрепления на границе и ведет к возникновению "провалов" в АЧХ. Очевидно, что вне области частот  $\omega_S$  указанный механизм снижает свою эффективность. Понятно также, что в структурах, составленных из пленок толщинами  $d_l \gg R$ , влияние обменной связи слоев на резонанс ПОМСВ с поверхностными спиновыми волнами, прижатыми к внешним границам пленки (в данном случае к границе  $z = -d_2$ ), будет слабым.

### Геометрия ООМСВ

Для того чтобы рассмотреть распространение обратных объемных магнитостатических волн (ООМСВ) в структуре, направим поле вдоль оси  $Ox$ . Выражения

для полей  $h_{xl}, h_{zl}$  и компоненты намагниченности  $m_{yl}$  возьмем в виде аналогичном (1), а компоненту  $m_{zl}$  запишем как

$$m_{zl} = \left( \sum_{j=1}^6 \xi_j B_j \exp iK_j z \right)_l T. \quad (11)$$

При этом  $K_{jl}$  — корни характеристического уравнения для  $l$ -й пленки вида (2), где коэффициенты  $a, b, c$  имеют вид

$$\begin{aligned} a &= (\omega_m + 2\omega_H) / \omega_{ex}, \\ b &= (\omega_m \omega_H + \omega_H^2 - \omega^2 - q^2 \omega_m \omega_{ex} / \omega_{ex}^2), \\ c &= -q^2 \omega_m \omega_H / \omega_{ex}^2, \quad \omega_H = \gamma H_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициенты  $\xi_j$  представим в форме

$$\xi_j = \frac{\tilde{\omega}_H^2 \gamma M_0 K_j / q}{\tilde{\omega}_H^2 - \omega^2}.$$

Выражения для полей в областях  $z > d_1$  и  $z < -d_2$  имеют вид (5).

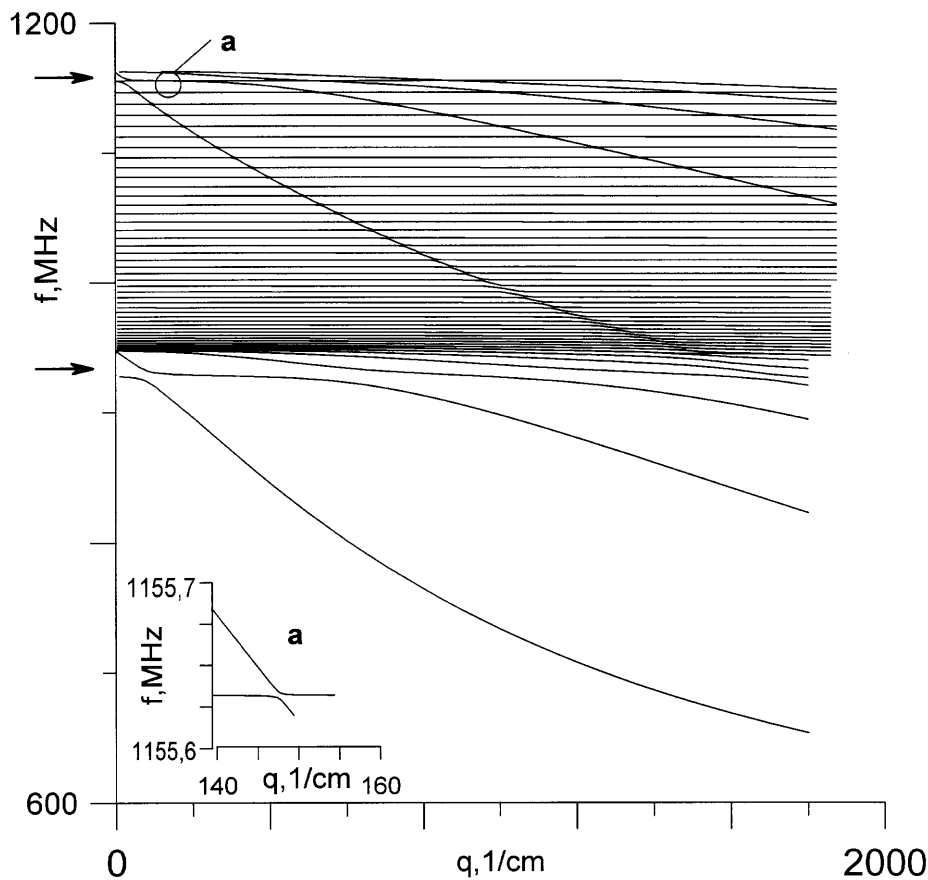


Рис. 5. То же, что на рис. 4, при  $H_0 = 193$  Ое.

Считаем, что на границах структуры выполнены условия непрерывности тангенциальных полей  $h_x$  и нормальных компонент магнитной индукции  $b_z = h_z + 4\pi m_z$  при  $z = d_1; 0; -d_2$  вида (6). Обменные граничные условия запишем в виде, характерном для нормальной одноосной поверхностной анизотропии [22,9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{z1}}{\partial z} - L_{11}m_{z1} &= 0, & \frac{\partial m_{y1}}{\partial z} &= 0 \Big|_{z=d_1}, \\ \frac{\partial m_{z2}}{\partial z} + L_{22}m_{z2} &= 0, & \frac{\partial m_{y2}}{\partial z} &= 0 \Big|_{z=-d_2}, \\ \frac{\partial m_{z1}}{\partial z} + L_{12}m_{z1} - \frac{A_{12}}{A_1} \left( m_{z1} - \frac{M_{01}}{M_{02}} m_{z2} \right) &= 0, \\ \frac{\partial m_{x1}}{\partial z} - \frac{A_{12}}{A_1} \left( m_{x1} - \frac{M_{01}}{M_{02}} m_{x2} \right) &= 0 \Big|_{z=0}, \\ \frac{\partial m_{z2}}{\partial z} - L_{21}m_{z2} + \frac{A_{12}}{A_2} \left( m_{z2} - \frac{M_{02}}{M_{01}} m_{z1} \right) &= 0, \\ \frac{\partial m_{x2}}{\partial z} + \frac{A_{12}}{A_2} \left( m_{x2} - \frac{M_{02}}{M_{01}} m_{x1} \right) &= 0 \Big|_{z=0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Дисперсионное уравнение получалось и исследовалось аналогично рассмотренному выше случаю ПОМСВ. На рис. 5 и 6 показан вид спектров спин-волновых

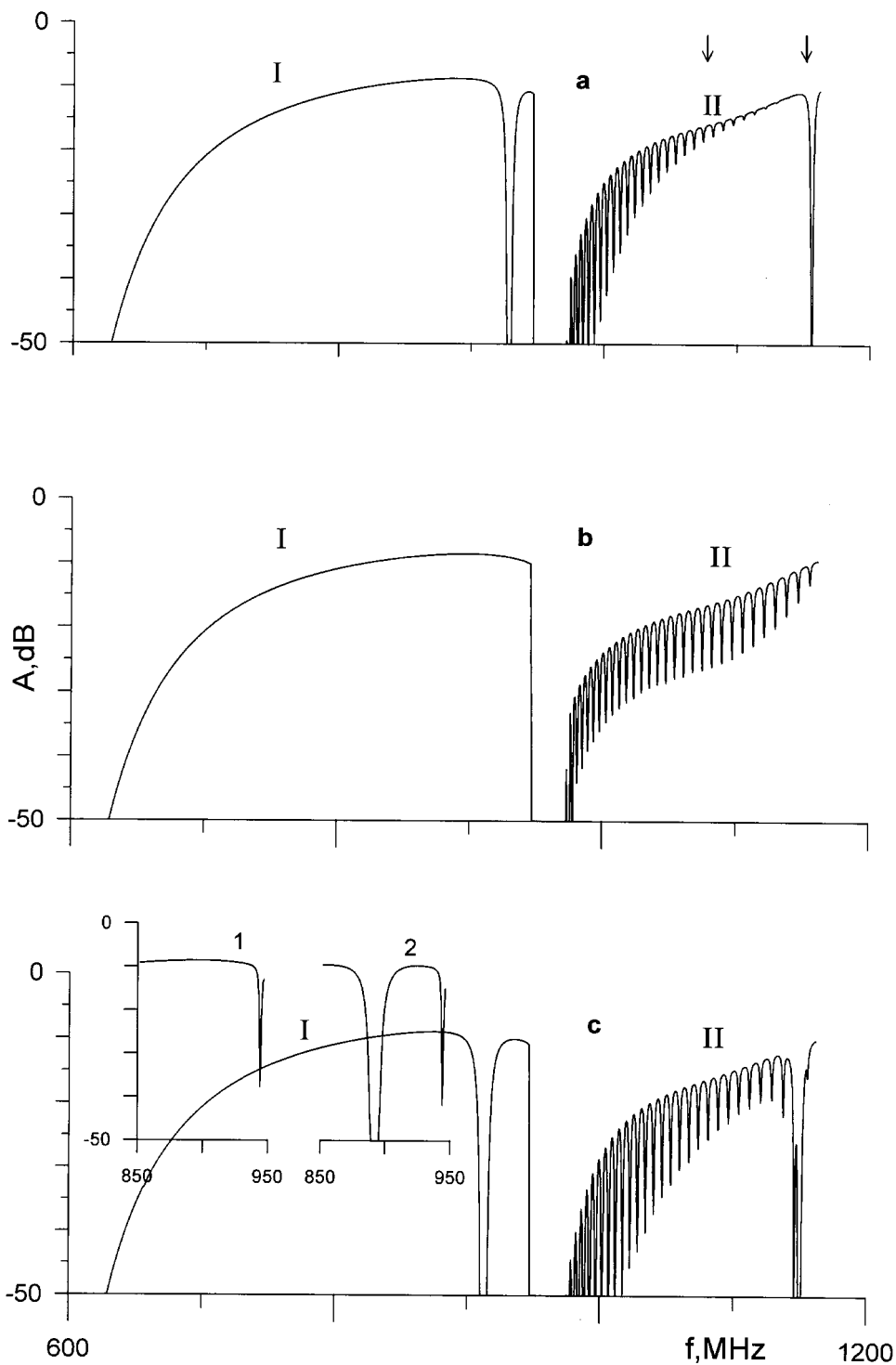
мод и АЧХ макета типа линии задержки, отвечающих распространению волн в структуре 1 из табл. 1 при  $H_0 = 193$  Ое, выбранных выше значениях параметров затухания  $\Delta H$ , расстояния  $S$  и различных значениях параметров  $A_{12}$ ,  $L_{li}$ . Расчеты ограничены областью частот существования дипольных ООМСВ в изолированных слоях  $\omega_H < \omega < \omega_{0l}$ , где  $\omega_H$  — коротковолновая ( $q \rightarrow \infty$ ) граница спектра ООМСВ (12), являющаяся для пленок общей, а  $\omega_{0l} = \sqrt{\omega_H^2 + \omega_H \omega_{ml}}$  — длинноволновые ( $q \rightarrow 0$ ) границы спектров дипольных ООМСВ. Понятно, что для структуры 1 длинноволновая граница слоя  $l = 1$  с намагниченностью  $4\pi M_0 = 700$  Г по частоте расположена выше длинноволновой границы слоя  $l = 2$ .

Прежде чем перейти к обсуждению результатов, отметим, что частоты объемных мод СВР в касательно намагниченных пленках определяются выражением [22]

$$f_N = \sqrt{[f_H + f_m + f_{ex} Q_N^2][f_H + f_{ex} Q_N^2]}. \quad (14)$$

Понятно, что в изолированных слоях резонансное взаимодействие дипольных ООМСВ с обменными спин-волновыми модами невозможно, так как  $f_N > f_0 = \omega_0/2\pi$ . Для двухслойных структур типа рассматриваемой структуры 1 из табл. 1 в интервале частот  $\omega_{02} < \omega < \omega_{01}$  дипольная ООМСВ слоя с большей





**Рис. 6.** АЧХ макета типа линии задержки для случая распространения ООМСВ, рассчитанная для случая свободных спинов на внешних поверхностях и различных величин параметров обменной связи и закреплений спинов на внутренних поверхностях. *a* — при  $A_{12} = 0$ ,  $L_{12} = L_{21} = -10^5 \text{ cm}^{-1}$ ; *b* —  $A_{12} = 0.005 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L_{12} = L_{21} = -10^5 \text{ cm}^{-1}$ ; *c* —  $A_{12} = -0.001 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L_{12} = L_{21} = -10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

намагниченностью может резонансно взаимодействовать с объемными обменными спин-волновыми модами слоя с меньшей намагниченностью [13]. Отметим также, что при значениях  $L > 0$  в касательно намагниченной пленке

с нормальной одноосной поверхностной анизотропией возможно существование поверхностных обменных спиновых волн на частотах  $\omega_S < \omega_0$  [21]. Как и в рассмотренном выше случае нормально намагниченных

пленок с  $L < 0$ , можно ожидать, что при попадании таких поверхностных волн в спектр дипольных ООМСВ между ними возникнет взаимодействие. В двухслойных структурах, содержащих пленки разной намагниченности, в область частот  $\omega_H \dots \omega_{0m}$ , где  $\omega_{0m} = \min(\omega_{01}, \omega_{02})$ , при определенных величинах параметров  $L_{li} > 0$  могут попадать поверхностные спиновые волны, поддерживаемые всеми четырьмя поверхностями структуры.

На рис. 5 показан вид спектра спин-волновых мод, рассчитанный для структуры 1 с параметрами закрепления  $L_{11} = L_{22} = 0$ ,  $L_{12} = L_{21} = 10^5 \text{ cm}^{-1}$  и в отсутствие обменной связи. Видно, что характер спектра в целом соответствует изложенным выше соображениям — в интервале частот 900...1200 МГц видны области "расталкивания" дисперсионных кривых спин-волновых мод слоев, возникающие на частотах вырождения спектров дипольных ООМСВ слоя  $l = 1$  и обменных спин-волновых мод слоя  $l = 2$ . Величина "расталкивания" дисперсионных кривых определяется в основном параметрами закрепления спинов в слое  $l = 2$  и межслойного обмена аналогично тому, как это показано в работах [9,6,24]. Кроме того, вблизи частот  $\omega_{S1} \approx 970 \text{ МГц}$  и  $\omega_{S2} \approx 1155 \text{ МГц}$ , положение которых на рис. 5 отмечено стрелками, имеют место значительные перестройки спектра, обусловленные взаимодействием ООМСВ с поверхностными спиновыми волнами. На вставке *a* к рис. 5 показан характер "расталкивания" спин-волновых мод вблизи частоты  $\omega_{S2}$ .

На рис. 6 показан вид АЧХ при выбранных значениях параметров закрепления и значениях параметра обменной связи  $A_{12} = 0$  (рис. 6, *a*),  $A_{12} = 0.005 \text{ erg/cm}^2$  (рис. 6, *b*) и  $A_{12} = -0.001 \text{ erg/cm}^2$  (рис. 6, *c*). Можно видеть, что на частотах резонансов ООМСВ с поверхностными волнами и частотах резонанса ООМСВ слоя  $l = 1$  с объемными обменными модами слоя  $l = 2$  в АЧХ формируются "провалы", причем в отличие от случая ПОМСВ глубина "провалов" в отсутствие обменной связи слоев на частотах резонансов ООМСВ и объемных обменных мод оказывается существенно меньше и нарастает по мере снижения частоты ООМСВ. Следует также отметить, что в длинноволновой области АЧХ  $q \leq 5 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-1}$ , которая наиболее доступна для эксперимента и на рис. 6, *a* выделена стрелками, изменения на частотах резонансов практически отсутствуют — глубина провалов не превышает 1–2 дБ.

При значении параметра обменной связи  $A_{12} \neq 0$  глубина "провалов" в длинноволновой области АЧХ возрастает на 5...10 дБ. Видно, что в отличие от случаев ПОМСВ, показанных на рис. 3, *b* и *c*, учет неоднородного обмена в данном случае практически не меняет ни характера частотной зависимости глубины, ни взаимного расположения "провалов", отвечающих резонансам ООМСВ слоя  $l = 1$  с объемными спин-волновыми модами слоя  $l = 2$ , которое хорошо описывается выражением (14).

Гораздо сильнее обменная связь влияет на резонанс ООМСВ с поверхностными спиновыми волнами, рас-

пространяющимися вдоль межслойной границы  $z = 2$ . При ферромагнитном характере обменной связи частоты поверхностных спиновых волн  $\omega_S$  растут, тогда как при антиферромагнитном снижаются. Понятно, что при фиксированных значениях параметров закрепления спинов  $L$  на границе  $z = 0$  найдутся такие значения параметров  $A_{12} > 0$ , при которых поверхностные спиновые волны прекратят свое существование и в АЧХ будут отсутствовать связанные с ними "провалы" (рис. 6, *b*). Также понятно, что при усилении антиферромагнитной обменной связи частота  $\omega_S$  может понизиться настолько, что выйдет за пределы спектра ООМСВ —  $\omega_S < \omega_H$ . Для случая, показанного на рис. 6, *c*, обменная связь не разрушает условия существования резонанса поверхностных спиновых волн и ООМСВ. При этом в области II АЧХ в окрестности частоты  $\omega_{S2}$  "провалы", отвечающие резонансам ООМСВ с объемными спин-волновыми модами слоя  $l = 2$ , как и в случае с ПОМСВ (рис. 3, *c*), углубляются.

Отличительной особенностью касательно намагниченных структур по сравнению со случаем нормального намагничивания является возможность появления при антиферромагнитном  $A_{12} < 0$  характере обменной связи в спектре волн двухслойной структуры на частотах  $\omega_S < \omega_{0m}$  поверхностных спиновых волн, поддерживаемых межслойной границей [7]. Такие волны, как и поверхностные спиновые волны, обусловленные поверхностной анизотропией, также могут резонансно взаимодействовать с ООМСВ и приводить к появлению провалов в области I АЧХ. Для этого случая на рис. 6, *c* цифрой 1 показана область I АЧХ, рассчитанная для случая свободных поверхностных спинов  $L = 0$  и  $A_{12} = -0.001 \text{ erg/cm}^2$ . Отметим, что в случае антиферромагнитного характера обменной связи между слоями и закрепления спинов на внешней границе пленки с меньшим значением намагниченности в АЧХ при значениях параметров  $10^4 < L_{22} < 1.7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0 > A_{12} > -0.01 \text{ erg/cm}^2$  могут появляться два "провала", отвечающих резонансам ООМСВ и поверхностных спиновых волн, локализованных вблизи границ  $z = 0$  и  $z = -d_2$  (кривая 2 АЧХ на рис. 6, *c*). Если же спины закреплены на межслойной границе, то учет межслойного обменного взаимодействия не приводит к появлению дополнительного "провала", а только изменяет форму и частоту "провала", обусловленного поверхностной анизотропией. Отметим также, что при величинах параметра закрепления спинов  $1.9 \cdot 10^5 < L < 2.2 \cdot 10^5$  в слое  $l = 1$  поверхностные спиновые волны, поддерживаемые этими границами, также будут взаимодействовать с ООМСВ слоя  $l = 2$ .

## Экспериментальные результаты

В экспериментах использовались двухслойные ферритовые структуры, полученные методом жидкофазной эпитаксии на подложках из гадолиний-галлиевого

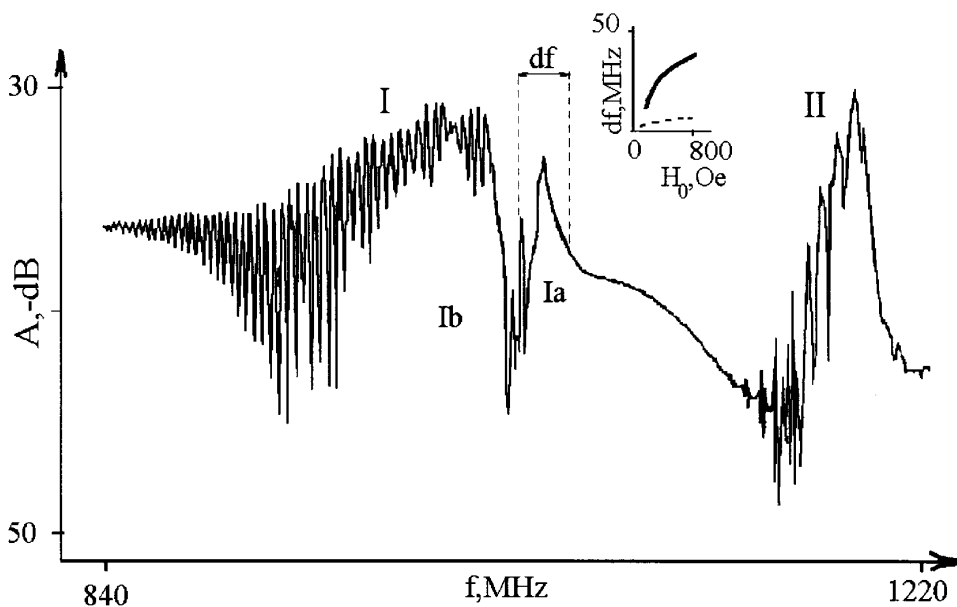


Рис. 7. АЧХ макета типа линии задержки для случая распространения ООМСВ при  $H_0 = 193$  Ое.

граната ориентации (111) последовательным наращиванием слоев железо-иттриевого граната состава  $Y_3Fe_{2-y}Sc_yFe_{3-x}Ga_xO_{12}$ ,  $y \leq 0.3$ ,  $x \leq 1.0$ . Параметры слоев указаны в табл. 1. Гиромагнитные отношения в обоих слоях имели типичные для пленок ЖИГ значения  $\gamma = 2.8$  МГц/Ое.

Образцы размещались на входном и выходном микрополосковых преобразователях, которые имели ширину  $15 \mu m$ , длину  $5 mm$ , а расстояние между ними могло изменяться, что позволяло использовать для измерения дисперсии и затухания МСВ метод "подвижного зонда" [25]. Внешнее магнитное поле  $H_0$  ориентировалось либо в направлении нормали к плоскости структуры ("геометрия ПОМСВ"), либо в плоскости структуры перпендикулярно микрополоскам ("геометрия ООМСВ").

Исследовались амплитудные и фазочастотные характеристики макета линии задержки МСВ в диапазоне частот  $0.1-6$  GHz при комнатных температурах. При этом особое внимание обращалось на появление характерных для резонансов дипольных МСВ и спин-волновых мод структуры участков резонансного возрастания потерь в АЧХ макета типа показанных на рис. 1-3 и 6.

На рис. 7 для геометрии ООМСВ показан вид АЧХ макета со структурой 1 при значении поля  $H_0 = 193$  Ое и расстоянии между преобразователями  $4 mm$ . Можно выделить две области прохождения сигнала, которые в соответствии с рис. 5, 6 следует связать с распространением ООМСВ в слоях  $l = 1$  и  $2$ . Частоты длинноволновых границ областей существования дипольных ООМСВ в пленках  $f_{0l}$  на  $30 \dots 50$  МГц сдвинуты относительно показанных на рис. 5 и 6, что может обуславливаться влиянием объемной анизотропии в слоях. Внутри области II АЧХ видны участки замирания интерференции и

"провалы", положение которых хорошо определяется выражением (14) при подстановке параметров, отвечающих слою  $l = 2$ , и номеров резонансов  $N_2 \approx 29 \dots 36$ . Одновременно в дисперсионной зависимости на указанных частотах наблюдались участки аномальной дисперсии, а КСВ входного преобразователя возрастал так, как это описано в работе [13].

Указанные особенности в затухании, дисперсии и возбуждении являются характерными признаками резонансного взаимодействия дипольных и обменных волн и в соответствии с результатами расчетов, показанных на рис. 5 и 6, должны быть связаны с резонансным взаимодействием основной моды дипольных ООМСВ слоя  $l = 1$  и объемных спин-волновых мод слоя  $l = 2$ . Отметим, что в интервале частот, отвечающих области 2 АЧХ, ООМСВ в структуре имеют волновые числа  $q \leq 500 \text{ cm}^{-1}$ , а глубина "провалов" при этом составляет  $10 \dots 20$  dB. Как отмечалось при обсуждении результатов расчетов АЧХ ООМСВ, в длинноволновой области возникновение "провалов" столь значительной глубины может обуславливаться только наличием обменной связи слоев. Сопоставление с расчетом показывает, что величина параметра обменной связи в данном случае составляет  $A_{12} \sim 0.01 \text{ erg/cm}^2$ .

Отметим также, что на частотах  $970 \dots 980$  МГц области I АЧХ наблюдается "провал", который делит ее на части Ia и Ib (рис. 7). По положению и форме указанный "провал" аналогичен "провалу" в АЧХ на рис. 6, обусловленному резонансным взаимодействием ООМСВ с поверхностной спиновой волной. Однако его появление, по-видимому, не может быть связано с резонансным взаимодействием дипольной ООМСВ и поверхностной спиновой волны. В самом деле одним из свойств закрепления поверхностных спинов в касательно

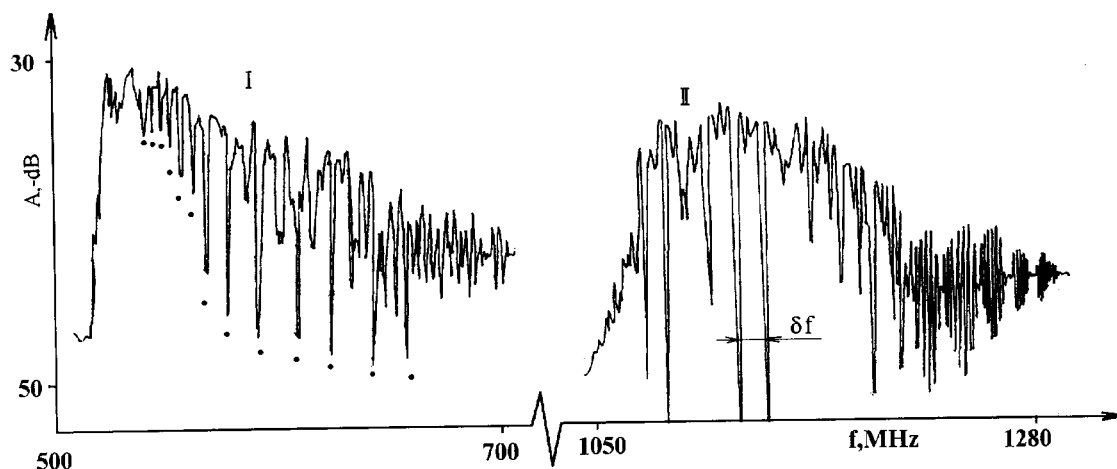


Рис. 8. То же, что на рис. 7, для ПОМСВ при  $H_0 = 800$  Ое.

намагниченных пленках с нормальной одноосной поверхностной анизотропией является частотная зависимость эффективного параметра закрепления [21]

$$L^{\text{ef}} = \frac{L^*}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (2\omega/\omega_m)^2}} \right). \quad (15)$$

Из (15) легко видеть, что в исследуемом частотном диапазоне 0.1–6 GHz параметр  $L^{\text{ef}}$  меняется почти на порядок. В соответствии с этим должно меняться положение резонансного провала в АЧХ, которое можно характеризовать величиной отстройки  $dF$  его центральной частоты от длинноволновой частотной границы  $f_0$  ООМСВ в пленке (рис. 6). На вставке к рис. 7 показаны рассчитанная (сплошная кривая) и экспериментально полученная (пунктир) зависимости параметра  $dF$  от магнитного поля  $H_0$ . Можно видеть, что указанные зависимости имеют различный характер. Травление внешней поверхности пленки на глубину  $\sim 1 \mu\text{m}$  не приводило к исчезновению рассматриваемого провала.

Кроме того, при развороте макета относительно направления касательного поля  $H_0$  так, что поле в конечном итоге оказывалось направленным вдоль преобразователей, область  $Ia$  принимала вид АЧХ, отвечающей поверхностной магнитостатической волне Дэймона–Эшбаха. Следовательно, появление области  $Ia$  в АЧХ, показанной на рис. 7, может быть по аналогии с работой [26] связано с резонансным возбуждением структуры высокочастотным магнитным полем полоскового преобразователя и установлением в пленке на частотах существования ПМСВ колебаний намагниченности.

На рис. 8 показан вид АЧХ макета со структурой 1, намагниченной нормально, в поле  $H_0 = 800$  Ое и при расстоянии между преобразователями 4 mm. Можно видеть, что обе области прохождения сигнала  $I$  и  $II$  имеют изрезанность. Различия в положении рассчитанных и измеренных границ следует отнести на счет влияния анизотропии и других факторов, выходящих за рамки

используемых при расчетах приближений, например, неоднородности слоев [27]. Вид АЧХ в целом соответствует результатам расчета, показанным на рис. 2, *b*, где считалось  $A_{12} = 0.01 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L = -10^5 \text{ cm}^{-1}$ . Глубокие ”провалы” в области  $I$  АЧХ, отмеченные точками, располагаются на частотах, определяемых выражением (10) при подстановке в него параметров, отвечающих слою  $l = 1$ , значений  $N_1 \approx 5 \dots 23$  и в целом имеют вид, характерный для одиночных пленок с несимметрично закрепленными поверхностными спинами [6,24].

В области  $II$  АЧХ частоты, на которых располагаются наиболее глубокие ”провалы” удалены друг от друга на расстояния  $\delta f \approx 8 \dots 20 \text{ MHz}$ . При этом значения  $\delta f$  с ростом частоты ведут себя в области АЧХ, отвечающей ПОМСВ с волновыми числами  $q \approx 40 \dots 400 \text{ cm}^{-1}$ , немонотонно и вполне аналогично тому, как это указано на рис. 2, *b,c* (см. также табл. 2).

Приведенные результаты экспериментов явно указывают на присутствие в структуре межслойного обменного взаимодействия. Сопоставление АЧХ, приведенных на рис. 7 и 8, с результатами расчетов показывает, что, во-первых, на межслойной границе между постоянными межслойного обмена и поверхностной анизотропией выполняется соотношение  $A_{12} \leq D$ , во-вторых, параметр межслойного обмена в рассматриваемой структуре имеет значения  $0.005 < |A_{12}| < 0.05 \text{ erg/cm}^2$ . Однако однозначно определить характер обменной связи, исходя из данных эксперимента, показанных на рис. 7 и 8, затруднительно, поскольку неизвестны с достаточной степенью точности величины и знаки параметров закрепления спинов на границах структуры. В то же время в эксперименте не наблюдался резонанс ООМСВ, распространяющийся в слое с меньшей намагниченностью, с поверхностной спиновой волной, который мог бы наблюдаться при значениях  $-0.001 > A_{12} > -0.01 \text{ erg/cm}^2$ . Это позволяет предположить, что в исследуемой структуре межслойный обмен имеет ферромагнитный характер:  $A_{12} > 0$ . Отметим, что это предположение, как и определенный

выше интервал абсолютных значений  $A_{12}$ , хорошо согласуется с известными для многослойных эпитаксиальных гранатовых структур результатами [28,29]. В рамках модели двухслойной структуры с нормальной одноосной поверхностной анизотропией, не учитывающей как толщинной неоднородности каждого из слоев, так и наличия переходного слоя между ними, соответствие результатов эксперимента и расчетов при выбранных значениях параметров  $d_1$ ,  $4\pi M_{01}$ ,  $A_1$ ,  $\Delta H_1$  структуры можно получить при значениях  $A_{12} \sim 0.01 \text{ erg/cm}^2$ ,  $L \sim -10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

Отметим, что распространение ПОМСВ и ООМСВ в остальных структурах из табл. 1 сопровождалось аналогичными особенностями, а сами структуры характеризовались параметрами межслойного обмена и закрепления поверхностных спинов того же порядка, что и структура 1.

## Заключение

Таким образом, в работе показано, что влияние межслойного обменного взаимодействия на распространение объемных дипольных МСВ в двухслойных эпитаксиальных ферритовых структурах проявляется главным образом на частотах резонансного взаимодействия дипольных объемных МСВ с преимущественно обменными спин-волновыми модами структуры и имеет вид, вполне аналогичный случаю одиночных пленок: на указанных частотах потери МСВ резонансно растут, а спектры взаимодействующих волн расталкиваются. Показано, что в характере частотной зависимости величин указанных перестроек спектра и затухания волн в структурах с обменной связью возникают аномалии на частотах вырождения спин-волновых мод структуры. Указанные аномалии вызваны расталкиванием спектров вырожденных спин-волновых мод, сопровождающимся эффектом динамического закрепления "межслойных" спинов на частоте "оттолкнувшейся" спин-волновой моды, и определяются характером и величиной параметра  $A_{12}$  обменной связи, а также соотношением параметра  $A_{12}$  с параметрами закрепления спинов на границах пленок  $L$ .

Показано, что в структурах с одноосной нормальной поверхностной анизотропией, намагниченных в "трудном" направлении относительно оси анизотропии, объемные дипольные МСВ могут находиться в условиях фазового синхронизма и эффективно взаимодействовать с поверхностными спиновыми волнами, распространяющимися вдоль границ пленок с закрепленными спинами. При этом обменная связь слоев приводит к возникновению динамического закрепления спинов для тех спин-волновых мод, частоты которых достаточно близки к частоте резонанса объемной дипольной МСВ и поверхностной обменной волны.

В структурах, составленных из пленок с различной намагниченностью насыщения, экспериментально исследовано влияние межслойного обмена на распространение дипольных ООМСВ и ПОМСВ. В случае ООМСВ

показано, что потери на распространение дипольной волны, распространяющейся в слое с большей намагниченностью, резонансно возрастают на частотах гибридизации дипольных волн этого слоя с модами СВР слоя с меньшей намагниченностью, причем для изолированных слоев указанные изменения в свойствах ООМСВ принципиально невозможны. В случае ПОМСВ влияние межслойного обмена наиболее ярко проявляется на частотах вырождения спектров СВР изолированных пленок, т. е. в диапазоне частот, отвечающем распространению ПОМСВ слоя с меньшей намагниченностью. Исследование указанных аномалий в распространении МСВ позволяет оценить величины параметров межслойного обмена и закрепления спинов в структуре.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 97-02-18614).

## Список литературы

- [1] Ваннэ Г.М. / Обзоры по электронной технике. 1984. Сер. 1. Вып. 8 (1060).
- [2] Беспятовых Ю.И., Зубков В.И. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 11. С. 2386–2394.
- [3] Camley R.E., Rahman T.S., Mills D.L. // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 27. P. 261.
- [4] Тарасенко С.В. // ФТТ. 1994. Вып. 36. № 9. С. 2554–2559.
- [5] Vayhinger K., Kronmuller H. // JMMM. 1986. Vol. 62. P. 159–168.
- [6] Калиникос Б.А., Колодин П.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 10. С. 1290–1298.
- [7] Puszkarski H. // Surf. Sci. Rep. 1994. Vol. 20. N 2.
- [8] Vayhinger K., Kronmuller H. // JMMM. 1986. Vol. 72. P. 307–314.
- [9] Hillebrandt B. // Phys. Rev. B. 1988. N 16. P. 9885–9888.
- [10] Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Кац М.Л., Филимонов Ю.А. // ФТТ. 1993. Т. 35. Вып. 5. С. 1191–1200.
- [11] Hoffmann F. // Phys. Stat. Sol. 1970. Vol. 41. P. 807–813.
- [12] Vittoria C. / Phys. Rev. B. 1988. Vol. 37. N 4. P. 2387–2390.
- [13] Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Вып. 11. С. 673–677.
- [14] Filimonov Yu.A., Kazakov G.T., Visotsky S.L. et al. // JMMM. 1994. Vol. 131. P. 235–241.
- [15] Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. Вып. 8. С. 673–677.
- [16] Калиникос Б.А. // Изв. вузов. Сер. физика. 1981. Т. 24. № 8. С. 42–56.
- [17] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Луговской А.В. // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 4. С. 1136–1142.
- [18] Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н. // ЖЭТФ. 1986. Т. 94. С. 159.
- [19] Андреев А.С., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. Вып. 3. С. 1005–1015.
- [20] Соколов В.М., Тавгер Б.А. // ФТТ. 1968. Т. 10. Вып. 6. С. 1793–1799.
- [21] Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск, 1975. 222 с.
- [22] Луговской А.В., Щеглов В.И. // РЭ. 1982. Т. 27. № 3. С. 518–524.

- [23] *Kalnikos B.A., Kozhus N.V., Kostylev M.P., Slavin A.N.* // J. Phys. Condens. Matter. 1990. Vol. 2. P. 9861–9877.
- [24] *Зильберман П.Е., Луговской А.В.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 1. С. 3–8.
- [25] *Зильберман П.Е., Казаков Г.Т., Тихонов В.В.* // РЭ. 1985. Т. 30. № 6. С. 1164–1169.
- [26] *Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В.* и др. // РЭ. 1992. Вып. 37(6). С. 1086–1095.
- [27] *Зильберман П.Е., Темирязов А.Г., Тихомирова М.П.* // ЖТФ. 1995. Т. 108. Вып. 1(7).
- [28] *Uchishiba H.U., Tominaga H., Namikata T.* // Jap. J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12. N 6. P. 928–929.
- [29] *Bobek A.H., Blank S.L., Levinstein H.J.* // The Bell System Technical J. 1972. Vol. 51. N 6. P. 1427–1444.