

УДК 537.011.44

©1993

ВЛИЯНИЕ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СПИНОВ НА СПЕКТР СПИН-ВОЛНОВОГО РЕЗОНАНСА СТРУКТУРЫ С ДВУМЯ ОБМЕННО-СВЯЗАННЫМИ ПЛЕНКАМИ

*С.Л.Высоцкий, Г.Т.Казаков, М.Л.Кац,
 Ю.А.Филимонов*

Рассмотрено влияние закрепления поверхностных спинов на спектр спин-волнового резонанса (СВР) структуры с двумя обменно-связанными пленками, характеризующейся либо симметричным („симметричные“ структуры), либо несимметричным („несимметричные“ структуры) распределением параметров относительно межпленочной границы. Показано, что спектр СВР двухслойной структуры существенно определяется соотношением констант поверхностной анизотропии K и обменной связи слоев A_{12} на межпленочной границе: при условии $|K| \gg |A_{12}|$ положение частот СВР структуры отвечает „связыванию“ спектров изолированных пленок; при $|K| \lesssim |A_{12}|$ пленки оказываются „связанными“ и в формировании спектра участвуют оба слоя одновременно. Для „симметричных“ структур в области значений $|K| \ll |2A_{12}|$ наибольшему изменению подвержены частоты четных мод СВР, а при $K = -2A_{12}$ изменения в положении частот СВР оказываются наибольшими. В спектре СВР „несимметричных“ структур при изменении поля подмагничивания H_0 может возникать картина „расталкивания“ — найдутся две моды СВР, частотный интервал между которыми Δf достигает минимума при определенном поле H_0 . Показано, что величина Δf уменьшается с ростом закрепления спинов на межпленочной границе.

1. Структуры из двух непосредственно контактирующих магнитных слоев являются базовой моделью при выяснении особенностей формирования спектра спиновых волн (СВ) обменно-связанных пленок [1-5]. К параметрам управления спектром СВ таких структур, кроме используемых для одиночных пленок — обменной жесткости A_l , намагниченности насыщения $4\pi M_{0l}$, толщины d_l слоев ($l = 1, 2$) и констант поверхностной анизотропии K_{lj} ($j = 1, 2$ — номер границы l -й пленки), — относят величину энергии обменной связи слоев A_{12} . При этом характер спектра СВ, и в частности спектра спин-волнового резонанса (СВР) двух обменно-связанных пленок, будет во многом определяться соотношением энергий анизотропии и обменной связи на межпленочной границе. Однако в большинстве работ [1-5] поверхностная анизотропия либо не учитывалась, либо при проведении численных расчетов бралось фиксированное значение K_{lj} [2]. Цель данной работы — рассмотреть влияние закрепления поверхностных спинов на спектр СВР структуры из двух обменно-связанных пленок.

2. Геометрия задачи показана на рис. 1. Пусть закрепление спинов на поверхностях структуры обусловлено нормальной одноосной анизотро-

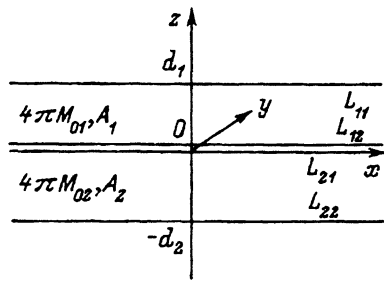


Рис. 1. Геометрия задачи.

пией [6] и характеризуется параметрами $L_{ij} = K_{ij}/A_i$ (рис. 1). Рассмотрим спектр СВР такой структуры при ориентации поля подмагничивания \mathbf{H}_0 нормально ($\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{Oz}$) и касательно ($\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{Ox}$) поверхности структуры. Для этого аналогично тому, как это указано, например, в [2,6], будем использовать выражения для обменных граничных условий (ОГУ) и переменных намагниченностей \mathbf{m}_i ($|\mathbf{m}_i| \ll M_{0i}$) в слоях.

В случае $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{Oz}$ граничные условия можно записать в виде

$$\left. \frac{\partial \mathbf{m}_1}{\partial z} + L_{11} \mathbf{m}_1 = 0 \right|_{z=d_1}, \quad \left. \frac{\partial \mathbf{m}_2}{\partial z} - L_{22} \mathbf{m}_2 = 0 \right|_{z=-d_2},$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{m}_1}{\partial z} - L_{12} \mathbf{m}_1 - \frac{A_{12}}{A_1} \left(\mathbf{m}_1 - \frac{M_{01}}{M_{02}} \mathbf{m}_2 \right) &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{m}_2}{\partial z} + L_{21} \mathbf{m}_2 + \frac{A_{12}}{A_2} \left(\mathbf{m}_2 - \frac{M_{02}}{M_{01}} \mathbf{m}_1 \right) &= 0. \end{aligned} \right|_{z=0} \quad (1)$$

Решения \mathbf{m}_i в этом случае возьмем в форме

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{m}_{xi} + \mathbf{m}_{yi}, \quad (2)$$

где

$$m_{xi} = a_i \cos \kappa_i z + b_i \sin \kappa_i z, \quad m_{yi} = \alpha_i m_{xi}, \quad \alpha_i = i\eta_i / \tilde{\eta}_{H1},$$

$$\eta_i = 2\omega / \omega_{mi}, \quad \tilde{\eta}_{H1} = \eta_{H1} + \left(\frac{4\pi A}{M_0^2} \kappa^2 \right)_i, \quad \eta_{H1} = 2\omega_{H1} / \omega_{m1},$$

$$\omega_{H1} = \gamma(H_0 - 4\pi M_{01}), \quad \omega_{m1} = \gamma 4\pi M_{01},$$

$$\kappa_i = \left(\sqrt{\frac{\pi M_0^2}{A} (\eta - \eta_H)} \right)_i,$$

γ — гиромагнитное отношение.

В случае $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{Ox}$ ОГУ представим в виде

$$\left. \frac{\partial m_{z1}}{\partial z} + L_{11} m_{z1} = 0, \quad \frac{\partial m_{y1}}{\partial z} = 0 \right|_{z=d_1},$$

$$\left. \frac{\partial m_{z2}}{\partial z} + L_{22} m_{z2} = 0, \quad \frac{\partial m_{y2}}{\partial z} = 0 \right|_{z=-d_2},$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial m_{z1}}{\partial z} - L_{12} m_{z1} - \frac{A_{12}}{A_1} \left(m_{z1} - \frac{M_{01}}{M_{02}} m_{z2} \right) &= 0, \\ \frac{\partial m_{y1}}{\partial z} - \frac{A_{12}}{A_1} \left(m_{y1} - \frac{M_{01}}{M_{02}} m_{y2} \right) &= 0, \\ \frac{\partial m_{z2}}{\partial z} + L_{21} m_{z2} + \frac{A_{12}}{A_2} \left(m_{z2} - \frac{M_{02}}{M_{01}} m_{z1} \right) &= 0, \\ \frac{\partial m_{y2}}{\partial z} + \frac{A_{12}}{A_2} \left(m_{y2} - \frac{M_{02}}{M_{01}} m_{y1} \right) &= 0. \end{aligned} \right|_{z=0} \quad (3)$$

При этом выражения для компонент переменной намагниченности в слоях должны быть взяты в виде

$$\begin{aligned} m_{yl} &= a_l \cos \kappa_l z + b_l \sin \kappa_l z + u_l \operatorname{ch} \beta_l z + w_l \operatorname{sh} \beta_l z, \\ m_{zl} &= \xi_l (a_l \cos \kappa_l z + b_l \sin \kappa_l z) + \sigma_l (u_l \operatorname{ch} \beta_l z + w_l \operatorname{sh} \beta_l z), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \kappa_l &= \left(\sqrt{\frac{\pi M_0^2}{A} (\sqrt{1 + \eta^2} - 1 - \eta_H)} \right)_l, \quad \beta_l = \left(\sqrt{\frac{\pi M_0^2}{A} (\sqrt{1 + \eta^2} + 1 + \eta_H)} \right)_l, \\ \xi_l &= i \eta_l / \left(2 + \eta_H + \frac{4\pi A}{M_0^2} \kappa_l^2 \right)_l, \quad \sigma_l = i \eta_l / \left(2 + \eta_H - \frac{4\pi A}{M_0^2} \beta_l^2 \right)_l. \end{aligned}$$

Условия совместности (1), (3) при подстановке в них решений (2), (4) с амплитудами a_l, b_l, u_l, w_l , отличными от нуля, приводят к уравнению для частот СВР в рассматриваемой структуре

$$\tilde{D}_1 \tilde{D}_2 = \delta, \quad (5)$$

где \tilde{D}_l и δ в случае $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{Oz}$ имеют вид

$$\begin{aligned} \tilde{D}_l &= D_l - X_l, \quad D_l = \left(1 - \frac{L_{ll} L_{lj}}{\kappa_l^2} \right) \operatorname{tg} \kappa_l d_l - \frac{L_{ll} + L_{lj}}{\kappa_l}, \\ \delta &= X_1 X_2, \quad X_l = \frac{A_{12}}{A_l \kappa_l} \left(1 + \frac{L_{ll}}{\kappa_l} \operatorname{tg} \kappa_l d_l \right), \end{aligned} \quad (6)$$

а в случае $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{Ox}$

$$\begin{aligned} \tilde{D}_l &= D_l - X_l, \quad D_l = \left(1 - \rho_l^2 \frac{L_{ll} L_{lj}}{\kappa_l^2} \right) \operatorname{tg} \kappa_l d_l - \rho_l \frac{L_{ll} + L_{lj}}{\kappa_l}, \\ \rho_l &= \xi_l / (\xi_l - \sigma_l), \quad X_l = \frac{A_{12}}{A_l \kappa_l} \left(1 + \rho_l \frac{L_{ll}}{\kappa_l} \operatorname{tg} \kappa_l d_l \right), \\ \delta &= X_1 X_2 \chi, \quad \chi = \frac{\sigma_1 - \xi_2}{\xi_1 - \sigma_1} \frac{\xi_2 - \sigma_2}{\xi_2 - \sigma_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

При выводе уравнения (5) для касательно-намагниченной структуры считалось, что пленки достаточно толстые, а параметры закрепления и обменной связи не очень велики

$$\beta_l d_l \gg 1, \quad L_{lj}, \quad A_{12}/A_l \ll \beta_l. \quad (8)$$

Отметим, что условия (8) типичны при расчете СВР касательно-намагниченной изолированной пленки [6].

В случае нормального намагничивания уравнение (5) при $L_{ij} = 0$ переходит в соответствующее уравнение работы [5]. В отсутствие обменной связи между слоями частоты СВР структуры получаются объединением частот СВР изолированных пленок, которые определяются из уравнений $D_1 = 0$ [6]. Обменная связь приводит к взаимодействию СВ. Если предположить, что частоты СВР пленок различны, так что условия $\tilde{D}_1 = 0$ и $\tilde{D}_2 = 0$ не выполняются одновременно, то положение частот СВР структуры будет достаточно точно определяться уравнениями $\tilde{D}_1 = 0$, в которых учтена модификация параметра закрепления спинов на межпленочной границе, вызванная обменной связью. Если частоты СВР пленок оказываются близки, то взаимодействие СВ будет носить „резонансный" характер и приводить к картине „расталкивания" спектров. При этом член δ , стоящий в правой части (5), характеризует взаимодействие волн и является по существу отношением энергии на межпленочной границе к объемной обменной энергии, нормированной на длину СВ на частоте взаимодействия.

Отметим, что в уравнениях (1), (3), отвечающих ОГУ, и выражениях (6), (7), входящих в уравнения для СВР, члены, отвечающие обменной связи пленок, формально можно связать с параметром закрепления спинов. Тогда при выполнении на межпленочной границе соотношения

$$|A_{12}| \gtrsim |K_{ij}| \quad (9)$$

обменная связь окажет заметное влияние на спектр СВР, а в случае

$$|A_{12}| \ll |K_{ij}| \quad (10)$$

спектр СВР структуры будет незначительно отличаться от „суммы" спектров изолированных пленок.

3. Будем далее обращаться к двум типам структур, характеризующихся распределением параметров относительно межпленочной границы: I) структуры с симметричным распределением — „симметричные" структуры; II) структуры с несимметричным распределением параметров — „несимметричные" структуры.

1. „С и м м е т р и ч н ы е" с т р у к т у р ы. В структурах типа I решения (2) и (4) распадаются на симметричные ($\mathbf{m}(z) = \mathbf{m}(-z)$) и антисимметричные ($\mathbf{m}(z) = -\mathbf{m}(-z)$). Тогда ОГУ на межпленочной границе для симметричных (s) и антисимметричных (a) решений представим для нормально-намагниченной структуры в виде

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial z} \mp L \mathbf{m} = 0, \quad (1s)$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial z} \mp \left(L + \frac{2A_{12}}{A} \right) \mathbf{m} = 0, \quad (1a)$$

а для касательно-намагниченной структуры в виде

$$\frac{\partial m_z}{\partial z} \mp L m_z = 0, \quad \frac{\partial m_y}{\partial z} = 0, \quad (3s)$$

$$\frac{\partial m_z}{\partial z} \mp \left(L + \frac{2A_{12}}{A} m_z \right) = 0, \quad \frac{\partial m_y}{\partial z} \pm \frac{2A_{12}}{A} m_y = 0. \quad (3a)$$

В выражениях (1s) и (1a), а также в выражениях (3s) и (3a) знаки $-$ и $+$ отвечают ОГУ на межпленочной границе со стороны верхней и нижней пленок соответственно. При этом учтено, что $L_{21} = L_{12} = L$, $A_1 = A_2 = A$.

Из сравнения вида ОГУ для симметричных и антисимметричных решений следует, что при изменении параметра закрепления на межпленочной границе L в области значений $|L| \ll |2A_{12}/A|$ наибольшему изменению подвержены частоты четных мод СВР структуры. Кроме того, обменная связь не меняет характера поверхностной анизотропии для симметричных решений — вид уравнений (1s) и (3s) отвечает ОГУ с нормальной поверхностной анизотропией. Последнее справедливо и для антисимметричных решений в нормально-намагниченной структуре. Однако в этом случае в качестве параметра закрепления спинов на границе нужно взять величину $L \rightarrow L + 2A_{12}/A$. Легко видеть, что при $L = L^* = -2A_{12}/A$ на межпленочной границе спины оказываются свободными — $\partial m/\partial z = 0$.

При касательном намагничивании вид ОГУ для антисимметричных решений отвечает случаю одноосной анизотропии лишь при различии знаков параметров K и A_{12} . Причем ось анизотропии составляет с направлением намагниченности M_0 ($M_0 \parallel H_0$) угол θ , равный

$$\theta = \arccos \sqrt{1 / (1 - LA/2A_{12})}, \quad (11)$$

а параметр закрепления L такой наклонной „эффективной“ анизотропии нужно взять равным $L' = (2A_{12} - K)/A$. Следовательно, изменение частоты антисимметричных решений структуры формально можно связать как с изменением степени закрепления, так и с разворотом оси поверхностной анизотропии. Наконец, при совпадении знаков параметров K и A_{12} уравнения (3a) отвечают случаю, когда „эффективная“ поверхностная анизотропия не является одноосной.

Трансформация спектра СВР „симметричной“ структуры, составленной из пленок с параметрами: $4\pi M_0 = 750$ Гс, $A = 9 \cdot 10^{-8}$ эрг/см, $d = 2$ мкм, $L_{11} = L_{22} = 0$, при изменении параметра закрепления спинов на межпленочной границе L для случая нормального ($H_0 = 2450$ Э) и касательного ($H_0 = 1700$ Э) намагничивания показана на рис. 2 и 3, соответственно. При расчетах считалось, что знаки параметров K и A_{12} либо различны (сплошная линия на рис. 2, 3), либо совпадают (штрихи), а связь между пленками носит либо ферромагнитный ($A_{12} = 0.09$ эрг/см²; рис. 2,а; 3,а), либо антиферромагнитный ($A_{12} = -0.09$ эрг/см²; рис. 2,б; 3,б) характер. Здесь же звездочками показано положение частот СВР для пленки толщиной $d = 2$ мкм с закрепленными спинами на одной из поверхностей, а кружками — для пленки толщиной $d = 4$ мкм со свободными поверхностными спинами.

Можно видеть, что при слабом закреплении спинов на межпленочной границе, когда выполнены условия (9), спектр структуры соответствует спектру пленки удвоенной толщины, а при выполнении условия (10) положение частот отвечает спектру изолированных пленок. В последнем случае, конечно, обменная связь сохраняет „расталкивание“ спектров.

При значениях $L \sim L^*$ ($K \simeq -2A_{12}$) изменения в спектре наиболее значительны. Вместе с тем при условии $L = L^*$ положение ча-

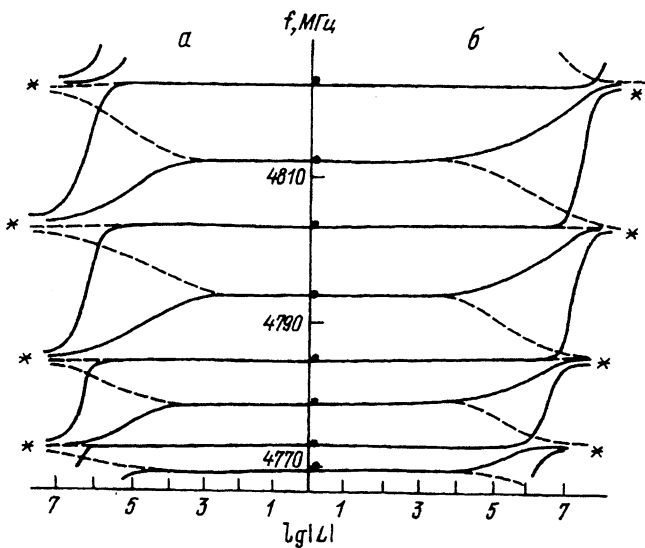


Рис. 2. Зависимость спектра СВР „симметричной“ структуры от параметра закрепления спинов на межплочной границе L для случая нормального намагничивания ($H_0 = 2450$ Э).

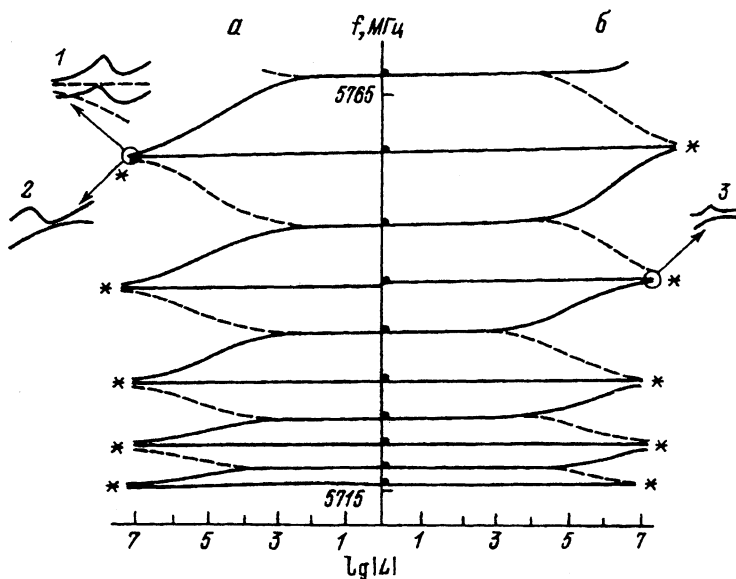


Рис. 3. Зависимость спектра СВР „симметричной“ структуры от параметра закрепления спинов на межплочной границе L для случая касательного намагничивания ($H_0 = 1700$ Э).

1, 3 — $H_0 = 1700$; 2 — 300 Э.

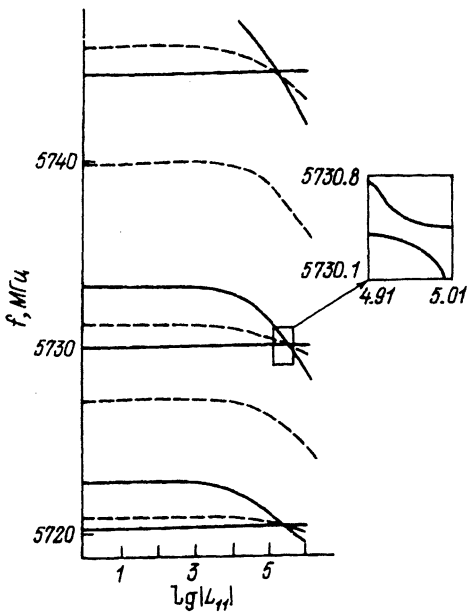


Рис. 4. Зависимость спектра СВР „несимметричной“ структуры от параметра L_{11} для случаев $A_{12} = 0.001$ (сплошная линия) и 0.1 эрг/см^2 (штриховая линия).

стот СВР в случае нормального намагничивания практически совпадает со случаем $L = 0$ и не зависит от характера обменной связи. Для касательно-намагниченных структур поведение спектра в области значений $L \sim L^*$ зависит от знака параметра A_{12} . Кроме того, при ферромагнитном типе обменной связи поведение спектра в области $L \sim L^*$ зависит от величины поля подмагничивания (см. вставки к рис. 3). Указанную зависимость от поля необходимо связать с зависимостью параметра „эффективного“ [6] закрепления L^{ef} в касательно-намагниченных пленках с нормальной одноосной поперехностной анизотропией от частоты

$$L^{ef} = \rho L \quad (12)$$

где $\rho = \rho_l$ определяется (7). При условии $\omega \ll \omega_{ml}$, что выполняется при $H_0 = 300 \text{ Э}$, значения $\rho_l \approx \omega/2\omega_{ml} \ll 1$ и закрепление спинов оказывается более слабым, чем при $H_0 = 1700 \text{ Э}$, когда $\rho \approx 1$.

2. „Несимметричные“ структуры. Рассмотрим два вида „несимметричных“ структур: I) структуры, у которых симметрия нарушена лишь различием параметров закрепления спинов на границах; II) структуры, составленные из пленок с различными значениями $4\pi M_0$, A , d . При этом мы рассмотрим лишь случай касательно-намагниченных структур.

Структуры с несимметричным распределением параметра закрепления спинов на границах. На рис. 4 показана трансформация спектра структуры с параметрами $4\pi M_0$, A и d , отвечающими п. 3.1, в зависимости от параметра L_{11} при величинах закрепления $L_{12} = L_{22} = 0$, $L_{21} = -10^5 \text{ см}$ и двух значениях константы обменной связи: $A_{12} = 0.001$ и 0.1 эрг/см^2 .

При малой величине обменной связи спектр структуры практически во всей области изменения параметра L_{11} соответствует „сумме“ спек-

тров изолированных пленок — имеется серия мод СВР, частота которых не зависит от L_{11} . Исключение составляет область значений $L_{11} = L_{21}$, когда обменная связь приводит к расталкиванию спектров (рис. 4).

При значении константы обменной связи $A_{12} = 0.1$ эрг/см² выполняется условие $A_{12}/A \gtrsim L$ и в формировании спектра СВ участвуют оба слоя. В этом случае изменение параметра L_{11} вызывает изменение всех частот СВР.

Структуры из пленок с различными магнитными параметрами. Интерес к таким структурам обусловлен тем, что в спектре СВР таких структур могут ярко проявляться эффекты „расталкивания" мод СВР.

Действительно, предположим, что обменная связь между пленками отсутствует. Тогда спектр СВР получается объединением частот СВР изолированных пленок F_{Nl} , которые при касательном намагничивании определяются выражением [6]

$$F_{Nl} = \left(\sqrt{(\omega_H + \omega_N^{ex})(\omega_H + \omega_N^{ex} + \omega_m)} \right)_l, \quad (13)$$

где

$$\omega_{Nl}^{ex} = \gamma \left(\frac{2A}{M_0} x_N^2 \right)_l,$$

x_{Nl} — волновое число N -й моды СВР l -й пленки, определяемое из уравнений $D_l = 0$. При этом следует ожидать, что найдутся такие частотные интервалы, где K -я мода СВР первой пленки F_{K1} окажется близка к N -й моде СВР второй пленки F_{N2} : $F_{K1} \simeq F_{N2}$. В том случае, когда частоты ω_1^{ex} и ω_m для пленок различны, изменением поля H_0 , как это видно из (13), можно добиться полного совпадения частот „несвязанных" пленок ($F_{K1} = F_{N2}$).

Очевидно, что при наличии обменной связи между пленками случаи совпадения частот СВР отдельных пленок должны быть исключены — обменная связь „снимает вырождение" и приводит к „расталкиванию" мод СВР. Причем зависимость картины „расталкивания" от поля H_0 может облегчать обнаружение участков с указанными особенностями в спектре СВР структуры и однозначно свидетельствовать о существовании обменной связи между слоями.

Рассмотрим эффект „расталкивания" мод СВР и его зависимость от параметра закрепления спинов на межпленочной границе на примере структуры с параметрами слоев: $4\pi V_{01} = 1650$ Гс, $4\pi V_{02} = 800$ Гс, $d_1 = 4.9$ мкм, $d_2 = 17$ мкм, $A_1 = 3/85 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, $A_2 = 0.9 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, которая использовалась ранее в качестве волновода СВ [7].

На рис. 5 (штриховые линии) показаны зависимости от поля H_0 частот СВР изолированных ($A_{12} = 0$) пленок 1 и 2 с номерами мод $K = 20$ и $N = 164$, рассчитанные с помощью (5) при значениях $L_{11} = L_{22} = -10^4$ см⁻¹, $L_{12} = L_{21} = -10^5$ см⁻¹. Здесь же сплошными линиями показаны зависимости указанных частот при значении параметра обменной связи $A_{12} = 0.1$ эрг/см². Видно, что учет обменной связи приводит к картине „расталкивания" спектров. Причем минимальное расстояние по частоте между модами $\Delta f = 8$ МГц достигается при поле $H_0 = 710$ Э.

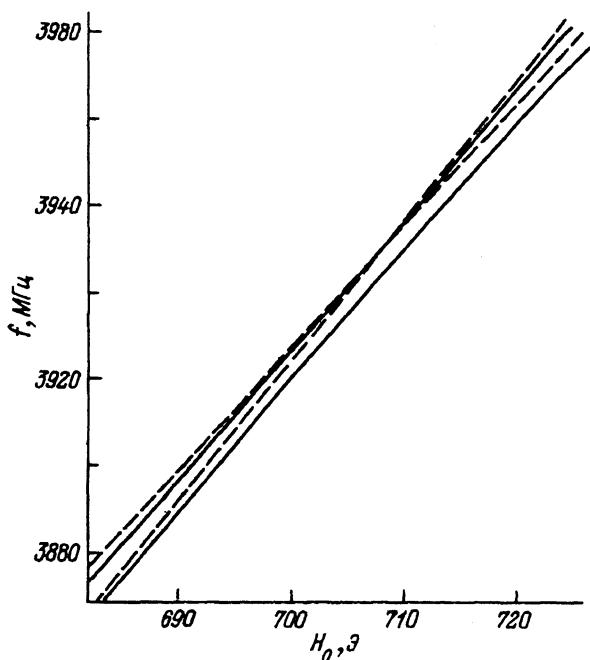


Рис. 5. Зависимость частот СВР от поля H_0 при значениях параметра $A_{12} = 0$ (штриховая линия) и 0.1 эрг/см^2 (сплошная линия).

На рис. 6 показана зависимость параметра расталкивания Δf от величины параметра закрепления спинов на межпленочной границе $L_{12} = L_{21} = L$. Можно видеть, что при увеличении параметра закрепления на межпленочной границе расталкивание мод СВР уменьшается.

Отметим, что для рассматриваемых структур эффективность закрепления спинов на частотах СВР по обе стороны межпленочной границы может оказаться различной. Действительно, из ОГУ (1), (3) условие на закрепление спинов по обе стороны межпленочной границы можно представить в виде $L \gg \kappa_{K1}, \kappa_{N2}$. Однако из-за различия параметров пленок величины волновых чисел κ_{K1} и κ_{N2} на частоте СВР могут оказаться настолько разными, что указанное выше условие на закрепление спинов

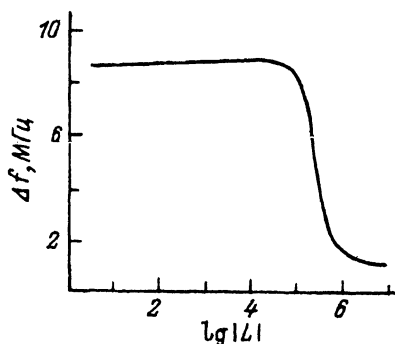


Рис. 6. Зависимость параметра расталкивания Δf от величины параметра закрепления спинов на межпленочной границе L .

одновременно по обеим сторонам межпленочной границы выполняться не будет.

4. Таким образом, спектр СВР двухслойной структуры существенно определяется соотношением констант поверхностной анизотропии K и обменной связи слоев A_{12} на межпленочной границе: при $|K| \gg |A_{12}|$ положение частот СВР структуры отвечает „объединению“ спектров изолированных пленок, при $|K| \lesssim |A_{12}|$ пленки оказываются „связанными“ и в формировании спектра участвуют оба слоя одновременно. Для структур, составленных из идентичных пленок, в области значений $|K| \ll \ll |2A_{12}|$ наибольшему изменению подвержены частоты четных мод СВР, а при $K \simeq -2A_{12}$ изменения в положении частот СВР оказываются наибольшими. В спектре СВР структур, составленных из пленок с различными параметрами, при изменении поля подмагничивания может возникать картина „расталкивания“ — найдутся две моды СВР, частотный интервал между которыми Δf достигает минимума при определенном поле H_0 , причем величина Δf уменьшается с ростом закрепления спинов на межпленочной границе.

Список литературы

- [1] Vayhinger K., Kronmuller H. // *J. on Mag. and Mag. Mat.* 1988. V. 72. P. 307-314.
- [2] Hillebrands B. // *Phys. Rev. B.* 1990. V. 1. N 1. P. 530-540.
- [3] Grunberg P., Schreiber R., Pang Y., Brodsky M.B., Sowers H. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 57. N 19. P. 2442-2445.
- [4] Cochran J.F., Dutcher J.R. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. N 16. Pt II. P. 6092-6094.
- [5] Pashaev Kh.M., Mills D.L. // *Phys. Rev. B.* 1991. V. 43. N 1. P. 1187-1189.
- [6] Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск: Наука, 1975. 222 с.
- [7] Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Нам Б.П. и др. // Тез. докл. V Всес. школы по спин-волновой электронике СВЧ. Звенигород, 1991. С. 85-86.

Институт радиотехники и электроники РАН
Саратов

Поступило в Редакцию
8 октября 1992 г.