

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ СПИНОВ НА МЕЖСЛОЙНОЙ ГРАНИЦЕ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН В МНОГОСЛОЙНЫХ ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

*С.Л.Высоцкий, Г.Т.Казаков, А.В.Маряхин\*, Ю.А.Филимонов\*<sup>1)</sup>, А.С.Хе*

*Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН  
410019 Саратов, Россия*

*\*Научно-исследовательский институт материалов электронной техники  
410026 Калуга, Россия*

Поступила в редакцию 31 января 1995 г.

После переработки 20 марта 1995 г.

В эпитаксиальных двухслойных пленках железоиттриевого граната выделено влияние динамического закрепления спинов на межслойной границе на распространение спиновых волн. Показано, что в ферритовых пленках, намагниченных касательно в полях  $H_0 \ll 4\pi M_{01,2}$ , к закреплению спинов на границе слоев приводит межслойное обменное взаимодействие, влияние которого на распространение спиновых волн минимально на частотах вырождения спектров спин-волнового резонанса слоев.

1. Влияние динамического закрепления поверхностных спинов на распространение спиновых волн в ферритовых пленках подробно изучено для случая, когда закрепление обусловлено поверхностной анизотропией [1-3]. На внутренних границах многослойных пленок вклад в эффект закрепления поверхностных спинов может давать межслойный обмен [4]. Какой из механизмов закрепления играет основную роль, определяется отношением констант поверхностной анизотропии  $K_S$  и межслойного обмена  $A_{12}$  [5]. Причем, поверхностная анизотропия, стремясь уменьшить динамическую часть намагниченности  $m$  ( $m \rightarrow 0$  при  $|K_S| \rightarrow \infty$  [6]), препятствует установлению межслойного обмена, для энергии которого справедлива оценка  $W_{12} \sim A_{12}m_1m_2$ .

2. В данной работе исследовалось распространение поверхностных спиновых волн (ПСВ) в двухслойной ферритовой пленке, полученной методом жидкофазной эпитаксии на подложках (111) гадолиний-галлиевого граната. Первый слой  $Y_2Fe_5O_{12}$ , контактирующий с подложкой, имел толщину  $d_1 = 6$  мкм, намагниченность насыщения  $4\pi M_{01} = 1750$  Гс, обменную жесткость  $A_1 = 3 \cdot 10^{-7}$  эрг/см, ширину линии ФМР  $\Delta H_1 = 0,3$  Э. Второй слой  $Y_3Fe_4Ga_{0,8}Sc_{0,2}O_{12}$  имел параметры  $d_2 = 8$  мкм,  $4\pi M_{02} = 640$  Гс,  $A_2 = 1 \cdot 10^{-7}$  эрг/см,  $\Delta H_2 = 0,25$  Э. Величины гиромагнитного отношения в слоях составляли  $\gamma = 2,8$  МГц/Э. Волны возбуждались и принимались микрополосками шириной 30 мкм, длиной 5 мм, разнесенными на расстояние 6 мм. Магнитное поле  $H_0$  ориентировалось в плоскости пленки параллельно микрополоскам, что отвечало возбуждению ПСВ в структуре [7]. Исследования были выполнены в диапазоне частот  $f = 0,3 \div 2$  ГГц и полей  $H_0 = 30 \div 100$  Э, при комнатных температурах.

На рис.1 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) макета при поле  $H_0 = 73$  Э. Область прохождения сигнала I и II отвечают распространению ПСВ в структуре и располагаются на частотах существования ПСВ в первом

<sup>1)</sup>e-mail: fil@ire.saratov.su

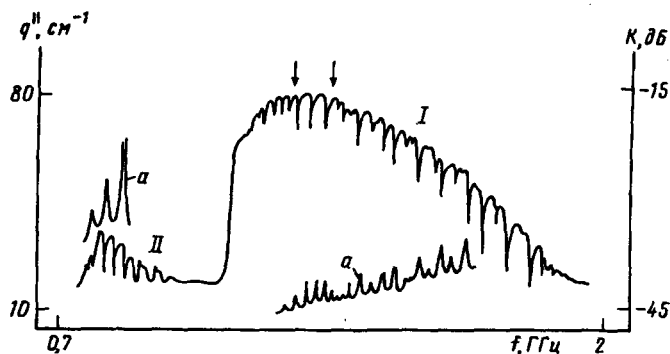


Рис.1. АЧХ макета и частотная зависимость пространственного декремента ПСВ при  $H_0 = 73 \text{ Э}$

и втором слое, соответственно  $f_{0l} < f < f_{sl}$  [7], где  $f_{0l} = \sqrt{f_H(f_H + f_{ml})}$ ,  $f_{sl} = f_H + f_{ml}/2$ ,  $f_H = \gamma H_0$ ,  $f_{ml} = \gamma 4\pi M_{0l}$ ,  $l = 1, 2$ . В областях I и II видны узкие минимумы, которые следует связать с резонансным взаимодействием ПСВ и обменных мод слоев [1-3]. Это подтверждается, с одной стороны, резонансным ростом пространственного декремента ПСВ, характеризуемого мнимой частью  $q''$  волнового числа  $q = q' + iq''$  ПСВ – см. кривые "а" на рис.1. С другой стороны, частоты, на которых наблюдается рост потерь ПСВ, имеют значения, близкие к частотам спин-волнового резонанса (СВР) пленок [6]:

$$F_{Nl} = \sqrt{(f_H + f_{ml} + f_{ex1})(f_H + f_{ex1})}, \quad (1)$$

где  $f_{ex1} = \gamma(2A_l/M_{0l})Q_{Nl}^2$ ,  $Q_{Nl}$  – волновое число  $N$ -ой моды СВР соответствующего слоя. Причем, в область I попадают моды СВР как самого этого слоя ( $N_1 \sim 1, \dots, 38$ ), так и слоя с меньшей намагниченностью ( $N_2 \sim 39, \dots, 78$ ).

При изменении поля  $H_0$  глубина минимума и величина декремента ПСВ в области II АЧХ оставались практически неизменными, тогда как в области I эти величины испытывали осцилляции. На рис.2 показана трансформация участка области I АЧХ, выделенного на рис.1 стрелками, при изменении поля  $H_0$ . Видно, что в процессе изменения  $H_0$  меняется глубина и число "обменных" минимумов в АЧХ. При поле  $H_0 = 73 \text{ Э}$  выделенный участок содержал три (a, b, c) "обменных минимума". С уменьшением поля их глубина уменьшается и одновременно между ними возникают два дополнительных (d, e) обменных минимума, глубина которых увеличивается и сравнивается с глубиной обменных минимумов a, b и c при поле  $H_0 = 68 \text{ Э}$ . При поле  $H_0 = 64 \text{ Э}$  исходные минимумы исчезают полностью, тогда как глубина минимумов d и e достигает максимума. Дальнейшее уменьшение  $H_0$  приводит к уменьшению глубины минимумов d и e, одновременно с этим восстанавливаются минимумы a, b, c и при поле  $H_0 = 54 \text{ Э}$  выделенный участок АЧХ принимает исходный вид.

3. Отмеченное поведение АЧХ с полем  $H_0$  связано с существованием обменного взаимодействия между слоями. Действительно, другим следствием межслойного обмена, помимо эффекта закрепления спинов на границе слоев, является эффект "расталкивания" мод СВР слоев на частотах их вырождения.

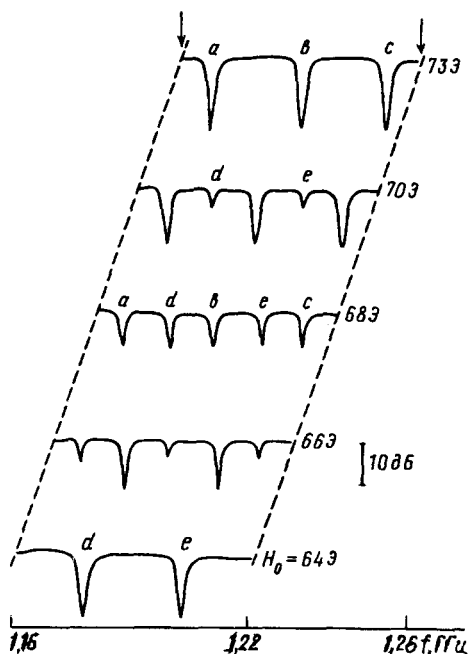


Рис.2. Трансформация участка АЧХ макета при перестройке  $H_0$

Если предположить, что в рассматриваемой структуре межслойный обмен отсутствует, то с помощью (1) легко показать, что в диапазоне полей и частот, отвечающих рис.2, частоты мод СВР слоя I номеров  $N_1 \sim 15 \dots 17$  и слоя II номеров  $N_2 \sim 48 \dots 51$  должны были бы дважды совпасть. В этом случае должны были бы совпасть и отвечающие этим частотам СВР минимумы в АЧХ. Однако частотный интервал между минимумами на рис.2 остается практически неизменным, что отвечает идее "расталкивания" мод СВР слоев и говорит о наличии обменной связи слоев [5]. Следовательно, в рассматриваемом случае будет отличен от нуля вклад межслойного обмена в закрепление спинов на границе слоев.

Учтем далее, что для ферритовых пленок характерна нормальная одноосная поверхностная анизотропия [8]. В случае касательного намагничивания закрепление поверхностных спинов в таких пленках описывается эффективной константой поверхностной анизотропии [6]:

$$K^{eff} = 0,5K_S \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (2f/f_m)^2}} \right). \quad (2)$$

Из (2) легко видеть, что при  $H_0 \ll 4\pi M_{0,2}$   $K^{eff} \sim K_S f/f_m \rightarrow 0$ , и вкладом поверхностной анизотропии в закрепление спинов на поверхностях структуры можно пренебречь. Далее воспользуемся связью глубины минимума в АЧХ и степени закрепления поверхностных спинов в пленках [1-3] и покажем, что осцилляции глубины минимумов в АЧХ обусловлены осциллирующим характером закрепления, вызванного межслойным обменом. Для этого обменные граничные условия на границе слоев возьмем в виде, предложенном Хоффманом [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - \frac{A_{12}}{A_1}(\varphi_1 - \varphi_2) &= 0|_{z=0}; \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} + \frac{A_{12}}{A_2}(\varphi_2 - \varphi_1) &= 0|_{z=0}; \end{aligned} \quad (3)$$

где отброшен вклад поверхностной анизотропии и считается, что ось  $z$  нормальна поверхности структуры, а поле  $H_0$  параллельно оси  $y$ , пленка 1 располагается в области  $0 < z < d_1$ ,  $\varphi_1 = m_1/M_0$ ,  $\varphi_2 = m_2/M_0$ . Из (3) легко видеть, что спины на границе слоев свободны, если углы прецессии в слоях оказываются близки. При этом минимумы в АЧХ должны отсутствовать.

Для того чтобы определить частоты, на которых поверхностные спины в структуре оказываются свободны, рассмотрим выражение для спектра СВР обменно-связанных пленок [5] в пренебрежении влиянием поверхностной анизотропии и членами порядка  $f/f_m \ll 1$ :

$$D_1 D_2 - \frac{A_{12}}{A_1 Q_1} D_2 - \frac{A_{12}}{A_2 Q_2} D_1 = 0, \quad (4)$$

где

$$Q_i = \left( \sqrt{\frac{\pi M_0^2}{A}} \sqrt{\sqrt{1 + \eta^2} - 1 - \eta_H^2} \right)_i,$$

$$\eta_l = \frac{f}{f_{ml}}, \quad \eta_{HL} = \frac{2f_H}{f_{ml}},$$

$D_i = \operatorname{tg} Q_i d_i = 0$  определяют спектры СВР изолированных пленок. На частотах вырождения спектров СВР изолированных пленок ( $D_1 = D_2 = 0$ ) уравнение (4) описывает "расталкивание" спектров и имеет решения, определяемые уравнениями

$$D_1 = 0; \quad (5.1)$$

$$D_2 = \frac{A_{12}}{A_1 Q_1} + \frac{A_{12}}{A_2 Q_2}. \quad (5.2)$$

При ферромагнитном характере обменной связи слоев ( $A_{12} > 0$ ) уравнение (5.1) отвечает синфазным колебаниям намагниченности в пленках при  $z = 0$  и свободным поверхностным спинам. Для противофазных колебаний намагниченности в слоях обменная связь приводит к закреплению спинов на межслойной границе, и частота "оттолкнувшейся" моды СВР определяется из (5.2). В случае антиферромагнитного характера связи ( $A_{12} < 0$ ), наоборот, на границе  $z = 0$  спины оказываются закрепленными для синфазных колебаний и свободными для противофазных [9]. Очевидно, что величина правой части (5.2) характеризует закрепление спинов на межслойной границе.

4. Сопоставим результаты эксперимента и их трактовку, приведенные выше, с результатами численного расчета АЧХ макета при параметрах, отвечающих эксперименту. В пренебрежении потерями на преобразование и прямой электромагнитной наводкой вид АЧХ будет полностью определяться соотношением  $A(f) = -8,68q''(f)$  дБ (рис.3). Значения  $q = q' + iq''$  рассчитывались

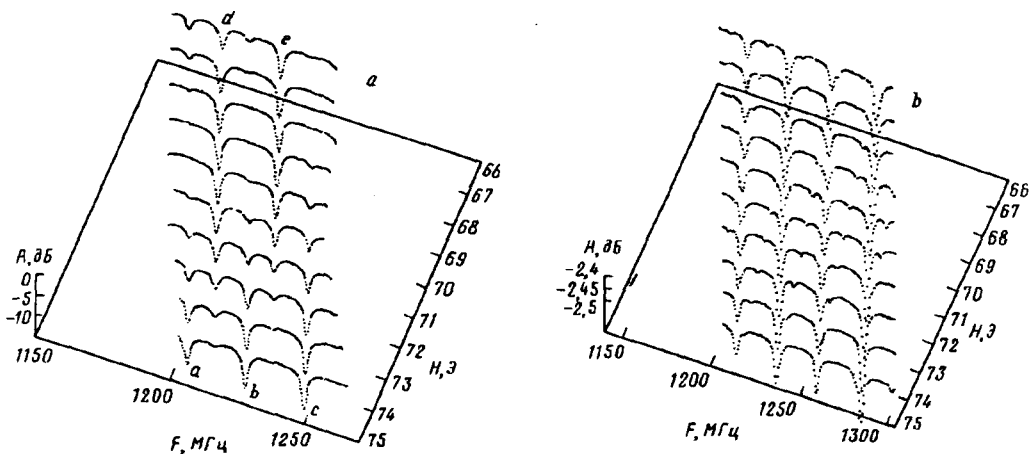


Рис.3. Результаты расчета трансформации участка АЧХ при перестройке  $H_0$ : а - для  $A_{12} = 0,5 \text{ эрг/см}^2$  и б - для  $A_{12} = 0$

аналогично [2,3,9]. При этом считалось, что константы поверхностной анизотропии на поверхностях структуры имеют типичные для ферритовых пленок величины  $K_S = 0,01 \text{ эрг/см}^2$  [6,8], а величина постоянной межслойного обмена выбрана из условия наблюдения эффекта "расталкивания" мод СВР пленок на частотах вырождения [5]. Можно видеть, что только учет межслойного обмена (рис.3а) приводит к соответствию рассчитанных и экспериментально полученных АЧХ макета: наблюдается "расталкивание" и осцилляция глубины минимумов.

В отсутствие межслойного обмена ( $A_{12} = 0$ ) величина "обменных" осцилляций АЧХ оказывается существенно меньше (что следовало ожидать в соответствии с (2)) и, кроме того, "расталкивание" мод СВР, которое в этом случае обусловлено лишь дипольными полями, не наблюдается при отвечающих структуре параметрах релаксации - рис.3б.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 94-02-05387).

1. R.E.De Wames and T.Wolfram, J. Appl. Phys. **41**, 987 (1970).
2. Ю.В.Гуляев, А.С.Бугаев, П.Е.Зильберман и др., Письма в ЖЭТФ **30**, 600 (1979).
3. Б.А.Калиникос, Н.Г.Ковшиков, А.Н.Славин, ЖЭТФ **94**, 159 (1986).
4. F.Hoffman, Phys. St. Sol. **41**, 807 (1970).
5. С.Л.Высоцкий, Г.Т.Казаков, Ю.А.Филимонов и др., ФТТ **35**, 1191 (1993).
6. Н.М.Саланский, М.Ш.Ерухимов, Физические свойства и применение магнитных пленок, Новосибирск (1960).
7. R.W.Damon and J.R.Eshbach, J. Phys. Chem. Sol. **19**, 308 (1961).
8. P.E.Wigen, Thin Solid Films **114**, 135 (1989).
9. B.Hillebrands, Phys. Rev. **B37**, 9885 (1988).