

05.2; 09; 11

© 1993

## РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ (МСВ) И ОБМЕННЫХ ВОЛН В СТРУКТУРЕ С ДВУМЯ ОБМЕННО-СВЯЗАННЫМИ ФЕРРИТОВЫМИ ПЛЕНКАМИ

С.Л. В ы с о ц к и й, Г.Т. К а з а к о в,  
Б.П. Н а м, А.В. М а р я х и н,  
А.Г. С у х а р е в, Ю.А. Ф и л и м о н о в,  
А.С. Х е

Многослойные магнитные структуры представляют интерес как в связи с возможностью управления дисперсией дипольных МСВ [1-4], так и из-за возможности эффективной связи дипольных МСВ с обменными волнами и образования новых типов коллективных колебаний многослойных структур [5, 6]. Однако в экспериментах по исследованию распространения МСВ в многослойных структурах [1-4] основное внимание до сих пор уделялось лишь чисто дипольным МСВ. В данной работе сообщается о наблюдении эффектов резонансного взаимодействия МСВ, распространяющихся в эпитаксиальной двухслойной пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ), с обменными волнами структуры и о влиянии обменной связи слоев на указанное взаимодействие.

Изучалось распространение поверхностных (ПМСВ) и обратных объемных (ООМСВ) магнитостатических волн в двухслойной эпитаксиальной пленке, выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Слой, граничащий с подложкой (I), имел состав  $Y_3Fe_{4.15}Sc_{0.2}Ga_{0.65}O_{12}$  и параметры: намагниченность насыщения  $4\pi M_{01} = 800$  Гс, толщину  $d_1 = 17$  мкм, обменную жесткость  $A_1 = 6 \cdot 10^{-6}$  эрг/см, ширину линии ФМР  $\Delta H = 0.42$  Э. Слой, граничащий с воздухом (II), имел состав  $Y_3Fe_{4.95}Ga_{0.05}O_{12}$  и параметры:  $4\pi M_{02} = 1650$  Гс,  $d_2 = 4.9$  мкм,  $A_2 = 3.4 \cdot 10^{-6}$  эрг/см,  $\Delta H = 0.32$  Э. МСВ возбуждались и принимались антеннами шириной 30 мкм и длиной 5 мм.

Ожидалось, что, как и в случае однослойных пленок ЖИГ [7, 8], эффекты резонансного взаимодействия дипольных и обменных волн должны проявляться в амплитудно-частотной характеристике (АХЧ) макета типа линии задержки в виде участков „замирания интерференции“ или „осцилляций прохождения“. Указанные изменения в АХЧ должны иметь место на частотах, близких к частотам спин-волнового резонанса (СВР) структуры и сопровождаться осцилляциями потерь МСВ, а также возникновением в законе дисперсии „аномальных“ участков.

Прежде всего покажем, что дипольные волны, распространяющиеся в слое с большей намагниченностью, могут эффективно

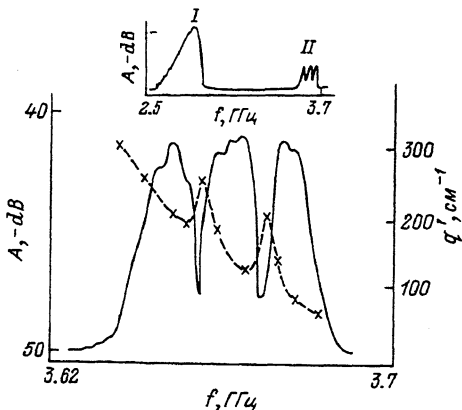


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика макета и дисперсионная зависимость ООМСВ  $q' = q'(w)$  (пунктир),  $H_0 = 730$  Э.

взаимодействовать с обменными волнами другого слоя. Для этого удобно рассмотреть распространение в структуре ООМСВ. Дело в том, что в изолированных пленках ООМСВ занимают область частот

$$f_H \leq f \leq f_0, \quad (1)$$

где  $f_H = \gamma H$ ,  $f_0 = \sqrt{f_H^2 + f_m f_m}$ ,  $f_m = \gamma^2 \mu M$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение, тогда как положение частот СВР в касательно намагниченной пленке определяется выражением

$$f_N = \sqrt{\left(f_H + \frac{2A}{M_0} \gamma \alpha_N^2\right) \left(f_H + f_m + \frac{2A}{M_0} \gamma \alpha_N^2\right)}, \quad (2)$$

где  $N$  — номер моды СВР,  $\alpha_N$  — волновое число спиновых волн на частоте СВР. Из сравнения (1) и (2) видно, что в одиночных пленках ООМСВ располагаются ниже „дна“ спектра СВР, и резонансное взаимодействие дипольных и обменных волн оказывается невозможным.

Для исследуемой структуры частотный диапазон, занимаемый ООМСВ слоя II, „накладывается“ на спектр СВР слоя I. При этом на тех частотах СВР, которые попадают в частотный интервал (1), ООМСВ и обменные волны могут резонансно взаимодействовать.

На вставке рис. 1 показана АЧХ макета при распространении ООМСВ и поле  $H_0 = 730$  Э. Прохождение сигнала наблюдается в двух частотных интервалах, которые определяются выражениями (1) и отвечают распространению ООМСВ в слоях I и II соответственно. В области II видны участки ослабления сигнала, показан-

ные на рис. 1. Положение этих участков по частоте хорошо описывается выражением (2) при подстановке в него значений параметров, отвечающих слою I и выражения для волнового числа обменных волн  $\kappa_N = \pi N/d_1$ , где  $N = 36, 37$ . Кроме того, в частотной зависимости волнового числа ООМСВ  $q' = q'(W)$ , измеренной с помощью подвижного зонда [9], на частотах замирания интерференции возникают аномальные участки (рис. 1). Следовательно, возникновение участков замирания интерференции следует связать с резонансным взаимодействием ООМСВ слоя II с обменными волнами слоя I.

Рассмотрим теперь влияние обменной связи пленок на резонансное взаимодействие дипольных и обменных волн в рассматриваемой структуре. Отметим, что на межпленочной границе, помимо обменной связи пленок, характеризуемой константой  $A_{12}$ , может существовать поверхностная анизотропия, характеризуемая константой  $K$  и вызывающая эффект закрепления спинов на границе [10]. При условии  $K < A_{12}$  влияние обменной связи будет наиболее заметным и приведет как к динамическому закреплению спинов на межпленочной границе, так и к формированию единого спектра обменных волн структуры [6, 10]. Одним из следствий этого процесса должно явиться „расталкивание” спектров СВР несвязанных пленок на частотах их совпадения.

Проиллюстрируем сказанное на примере ПМСВ. На рис. 2 показана АЧХ макета, отвечающая этому случаю и полю  $H_0 = 700$  Э. Области прохождения сигналов I и II отвечают распространению ПМСВ и занимают частотные интервалы существования ПМСВ в слоях

$$f_0 \leq f \leq f_n + f_m/2.$$

Из сравнения (2) и (3) видно, что ПМСВ могут взаимодействовать с обменными волнами своего собственного слоя, а ПМСВ слоя с большим значением  $4\pi M_0$ , кроме того, с обменными волнами слоя, контактирующего с ним. Из рис. 2 видно, что в области II амплитуда сигнала осциллирует. Здесь же показана измеренная с помощью феррит-полупроводникового детектора [И] частотная зависимость пространственного декремента ПМСВ, характеризуемого мнимой частью  $q''$  волнового числа. Как видно, осцилляциям сигнала отвечают осцилляции декремента ПМСВ. Положение осцилляций по частоте удовлетворительно описывается выражением (2), если при подстановке параметров слоев II и I номера мод СВР взять равными  $N = 5-13$  и  $N = 140-180$  соответственно. На рис. 2 положение частот СВР в области II, рассчитанное таким образом для пленок I и II, показано кружками и звездочками соответственно.

Отметим, что в части АЧХ, отмеченной I, никаких особенностей, связанных с взаимодействием ПМСВ и обменных волн, не наблюдалось. Это связано с тем, что обменные волны в пленке I на указанных частотах имеют величины декремента  $q'' > 450$  см<sup>-1</sup>,

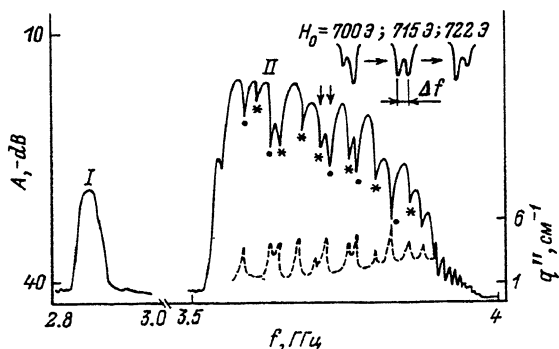


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика макета и зависимость потерь ПМСВ на распространение  $q'' = q''(\omega)$  (пунктир),  $H_0 = 700$  Э. На вставке - вид участка АЧХ, выделенного стрелками, для трех значений поля  $H_0$ .

и критерий установления резонанса в пленке  $R = 2q''d \ll 1$  [12] не выполняется ( $R > 1.5$  в полосе частот I).

Предложим теперь, что обменная связь между пленками отсутствует. Тогда положение „обменных“ минимумов в АЧХ должно отвечать частотам СВР изолированных пленок. При этом из-за различия параметров пленок следует ожидать, что при величине поля  $H_0 = H_1$  в некотором частотном интервале значения частот  $n$ -й ( $F_{n_1}$ ) и  $m$ -й ( $F_{m_2}$ ) мод СВР пленок I и II окажутся близки ( $F_{n_1} \approx F_{m_2}$ ). Поскольку положение частот  $F_{n_1}$  и  $F_{m_2}$  определяется полем  $H_0$ , то при некотором значении  $H_0 = H_2$  мы получим их совпадение:  $F_{n_1} = F_{m_2}$ . При этом „обменные“ минимумы в АЧХ, отвечающие этим частотам СВР, также должны будут совпасть.

Если между пленками имеется обменная связь, случаи совпадения частот СВР должны быть исключены - между упомянутыми  $n$ -й и  $m$ -й модами возникнет взаимодействие, которое приведет к эффекту „расталкивания“ частот СВР. Как следствие, „обменные“ минимумы в АЧХ также будут демонстрировать эффект „расталкивания“.

С учетом сказанного рассмотрим трансформацию с полем  $H_0$  участка АЧХ, выделенного на вставке рис. 2 стрелками. При поле  $H_0 = 700$  Э глубина низкочастотного минимума меньше, чем высокочастотного, и расстояние между ними по частоте  $\Delta f = 8.7$  МГц. С изменением поля  $H_0$  обменные осцилляции меняют свою величину и сравниваются при  $H_0 = 710$  Э. При этом расстояние по частоте между ними  $\Delta f$  оказывается наименьшим и составляет величину  $\Delta f = 8.2$  МГц.

С дальнейшим ростом  $H_0$  высокочастотный минимум свою глубину уменьшает, а расстояние между минимумами по частоте  $\Delta f$  увеличивается.

Такое поведение „обменных“ осцилляций в АЧХ отвечает картине „расталкивания“ спектров СВР и однозначно свидетельствует о наличии обменной связи между слоями.

Таким образом, условия резонансного взаимодействия МСВ с обменными волнами в структурах с обменно-связанными пленками с различной намагниченностью насыщения характеризуются следующими особенностями:

1. МСВ, распространяющиеся в пленке с большим значением эффективного поля, могут взаимодействовать с обменными волнами как самого этого слоя, так и контактирующего с ним.

2. В области частот, отвечающей расталкиванию спектра СВР обменно-связанных пленок, величина „обменных“ минимумов в АЧХ ПМСВ, а также частотное расстояние между ними, осциллирует с полем  $H_0$ .

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Вашковский А.В., Вороненко А.В., Красношеин Л.А., Яковлев Ю.М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 8. С. 1233-1234.
- [2] Зубков В.И., Локк Э.Г., Нам Б.П. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 12. С. 115-117.
- [3] Adam J.D., Daniel M.R. // IEEE Trans. on Magn. 1984. V. MAG-20. N 5. P. 1246-1248.
- [4] Высоккий С.Л., Казаков Г.Т., Филимонов Ю.А. и др. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. В. 5. С. 959-965.
- [5] Калинин Б.А., Колодин П.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. В. 10. С. 1290-1298.
- [6] Hillebrands B. // Phys. Rev. B. 1988. N 16. P. 9885-9888.
- [7] Андреев А.С., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. В. 3. С. 105-1015.
- [8] Калинин Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н., // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 2. С. 159-176.
- [9] Зильберман П.Е., Казаков Г.Т., Тихонов В.В. // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. В. 6. С. 1164-1169.
- [10] Hoffman F. // Phys. St. Sol. 1970. V. 41. P. 807-813.
- [11] Высоккий С.Л., Казаков Г.Т., Сухарев А.Г., Филимонов Ю.А. А.С. № 1364995. 1987.
- [12] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Луговской А.В. // ФТТ. 1981. Т. 23. В. 4. С. 1136-1142.

Поступило в Редакцию  
29 октября 1992 г.  
В окончательной редакции  
25 марта 1993 г.