Физика низких температур, 1996, т. 22, № 9, с. 1056–1058

Магнитные резонансы в двухслойных пленках феррит-гранатов

А. М. Гришин, В. С. Деллалов, В. Ф. Шкарь, С. В. Ямпольский

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины,
Украина, 340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72
E-mail: grishin@gam.dipt.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 5 февраля 1996 г., после переработки 22 марта 1996 г.

Исследованы частотные зависимости резонансных полей и интенсивностей однородных ферримагнитных резонансов (ФМР) и спин-волновых резонансов (СВР) в двухслойной феррит-гранатовой пленочной структуре, в которой один слой имеет анизотропию типа «легкая ось», а другой — «легкая плоскость», в случае, когда внешнее магнитное поле перпендикулярно плоскости пленки. Показано, что возбуждение СВР между двумя значениями частот (или полей) однородных ФМР объясняется явлением скин-эффекта на границе раздела слоев. Дана теоретическая оценка глубины проникновения спиновой волны в соседний слой.

Досліджено частотні залежності резонансних полів та інтенсивностей ферімагнітних резонансів (ФМР) та спін-хвильових резонансів (СХР) у двошаровій ферит-гранатовій плівці, один із шарів якої має анізотропію типу «легка вісь», а інший — «легка площина», у випадку, коли зовнішнє магнітне поле є перпендикулярним до площини плівки. Виявлено, що збудження СХР між двома значеннями частот (або полів) однорідних ФМР пояснюється явищем скін-ефекту на межі розподілу шарів. Наведено теоретичну оцінку глибини проникнення спінової хвилі у сусідній шар.

1. В последнее время все больший интерес привлекают многослойные магнитные пленки в связи с их практическим применением. Дипольная и обменная связи спинов в разных слоях приводят к существованию новых типов колебаний в этих структурах и к особенностям их резонансных характеристик. Так, в однородно намагниченной двухслойной пленке было обнаружено существование серии спин-волновых резонансов (СВР) на частотах, лежащих между частотами, соответствующими однородным ферримагнитным резонансам (ФМР) для каждого отдельного слоя [1]. В настоящей работе экспериментально и теоретически исследовано поведение (интенсивность и резонансные поля) однородных ФМР и СВР в зависимости от частоты внешнего переменного поля.

Пленки были получены методом жидкофазной эпитаксии на подложках галлий-гадолиниевого граната с ориентацией (111). Первый наращиваемый на подложку легкоплоскостной слой состава $(YGdLa)_3(FeGa)_5O_{12}$ имел толщину $d_1 =$ $= 0{,}18$ мкм, намагниченность насыщения $4\pi M_1 =$ $= 880$ Гс. Второй, легкоосный слой имел состав $(YEuTmCa)_3(FeGe)_5O_{12}$, толщину $d_2 = 0{,}33$ мкм и $4\pi M_2 = 460$ Гс. Обменные константы в первом и втором слоях равны соответственно $A_1 =$ $= 3{,}5\cdot10^{-7}$ эрг/см и $A_2 = 2{,}9\cdot10^{-7}$ эрг/см; гиромагнитные отношения $\gamma_1 = 1{,}7\cdot10^7$ $(\text{с}\cdot\text{Э})^{-1}$, $\gamma_2 = 1{,}25\cdot10^7$ $(\text{с}\cdot\text{Э})^{-1}$, константы затухания $\alpha_1 =$ $= 6{,}0\cdot10^{-3}$, $\alpha_2 = 2{,}5\cdot10^{-2}$; константы магнитной анизотропии $K_1 = -1{,}8\cdot10^4$ эрг/см^3, $K_2 =$ $= 2{,}7\cdot10^4$ эрг/см^3.

Суммарная толщина слоев определялась интерференционным методом, толщина каждого слоя — по времени травления. Намагниченность первого слоя оценивалась косвенным путем по степени замещения железной подрешетки железо-иттриевого граната, являющейся основой этого слоя. Намагниченность второго слоя найдена расчетным путем по характеристикам полосовой доменной структуры и полю коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) [2]. Гиромагнитные отношения определены по полевым зависимостям резонансных частот в насыщенной пленке, константы магнитной анизотропии — из угловых зависимостей поля ФМР, коэффициенты затухания α — из ширины линий ФМР, а обменные константы A рассчитаны по температуре Нееля [3].

© А. М. Гришин, В. С. Деллалов, В. Ф. Шкарь, С. В. Ямпольский, 1996

2. Для теоретического анализа восприимчивости двухслойной пленки, находящейся в постоянном внешнем магнитном поле H, перпендикулярном плоскости пленки, воспользуемся выражением для χ из работы [1]

$$\chi = -\frac{\rho_1}{q_1^2} - \frac{\rho_2}{q_2^2} + \frac{\sqrt{l_1 l_2}}{d_1 + d_2} \frac{(q_1^2 G - q_2^2 G^{-1})^2}{(q_1 q_2)^3} \times$$

$$\times \left[G g q_1 \operatorname{ctg}\left(\frac{q_2 d_2}{l_2}\right) + \frac{q_2}{Gg} \operatorname{ctg}\left(\frac{q_1 d_1}{l_1}\right) \right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $\rho_{1(2)} = d_{1(2)}/(d_1 + d_2)$ — относительная толщина слоев;

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

ω — частота внешнего переменного магнитного поля;

$$G = \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{1/2}; \quad g = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{1/4}; \quad K = K^* - 2\pi M^2.$$

Расчетные полевые зависимости диссипативной части восприимчивости $\chi_+''(H)$ при различных частотах приведены на рис. 1. Видно. что СВЧ поглощение имеет резонансный характер. Крайние линии соответствуют резонансному возбуждению в двухслойной структуре колебаний, близких к однородным ФМР в 1-м и 2-м слоях. Между ними имеется серия СВР, обусловленных «размерным квантованием» спиновых волн. Частотно-полевые зависимости положений максимумов резонансного поглощения приведены на рис. 2. На низких частотах СВР наблюдается в слое 1. На частотах выше точки пересечения линий ФМР 1-го и 2-го слоев резонансно возбуждается серия неоднородных спиновых колебаний в слое 2 (для наглядности эта серия рассчитывалась при $\alpha_2 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$).

При сближении СВР и ФМР происходит взаимодействие между ними (см. вставку на рис. 2), что проявляется в расталкивании ветвей в точках пересечения, трансформации пиков и последующем резком уменьшении интенсивности пика СВР. На частотах близких к точке пересечения однородных ФМР моды СВР не возбуждаются. Экспериментально измеренные значения резонансных полей отмечены на рис. 2 звездочками.

3. Рассмотрим вопрос о возбуждении СВР в двухслойной пленке более подробно. Известно [4], что СВР может возбуждаться в тонких пленках, если спины на поверхности закреплены. Закрепление может быть либо на одной поверхности, либо

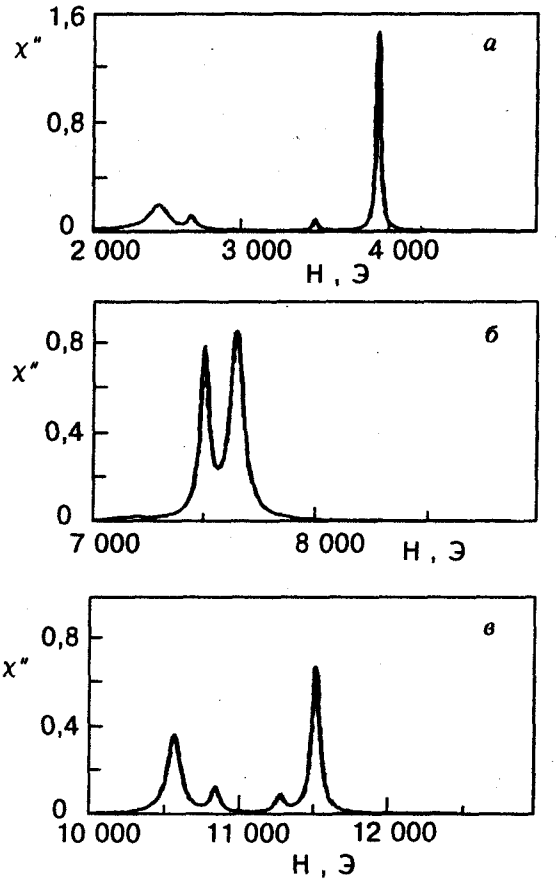

Рис. 1. Полевые зависимости диссипативной части восприимчивости χ_+'' при различных частотах внешнего магнитного поля ν, ГГц: 7 (*а*); 17 (*б*); 25 (*в*) (для случаев *б* и *в* константа затухания $\alpha_2 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$).

на обеих. В описанных двухслойных гранатовых пленках [1] закрепление происходит на границе слоев. Доказательством этого служит отсутствие СВР в однослойных пленках того же состава (переходные слои пленка—воздух, пленка—подложка в

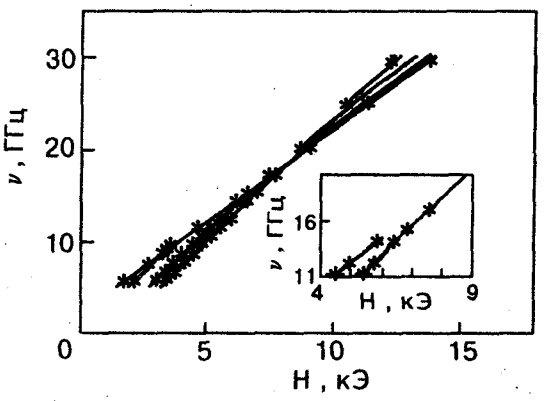

Рис. 2. Частотно-полевые зависимости положения максимумов резонансного поглощения.

выращенных структурах обладают высоким совершенством и не приводят к закреплению спинов). Возбуждение СВР между двумя частотами (полями) ФМР можно объяснить следующим образом. В процессе расчета восприимчивости было получено уравнение для переменной части вектора намагниченности $\mathbf{m}$ [1]:

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

где $\mathbf{h}$ — переменное высокочастотное магнитное поле.

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$\mathbf{m}=\mathbf{C}\,e^{ikz}+\mathbf{B}\,e^{-ikz}\,, \qquad (3)$$

где $k=q/l$.

Положим для простоты $\alpha=0$. Условие однородного ФМР запишется в виде $k=0$ или $q=0$. Это соответствует резонансному полю

$$H_{fmr}=\frac{\omega}{\gamma}-\frac{2K^*}{M}\,.$$

Если $H<H_{fmr}$, тогда $q^2>0$, k — действительная величина. Это соответствует распространяющейся спиновой волне $\mathbf{m}\propto e^{ikz}$. Если $H>H_{fmr}$, тогда $q^2<0$, k — мнимое, что соответствует затухающей спиновой волне $\mathbf{m}\propto e^{-ikz}$. Возникает скин-эффект, в результате чего волна не распространяется в среде. Глубину проникновения спиновой волны можно оценить величиной

$$\delta=\left(\frac{2A}{M(H-H_{fmr})}\right)^{1/2}=l\left(\frac{M}{H-H_{fmr}}\right)^{1/2}. \qquad (4)$$

Рассмотрим, например, закрепление спинов вторым слоем. Сравнивая с экспериментом, видим, что, когда $H>H_{fmr1}$, $H>H_{fmr2}$ (см. рис. 2), спиновая волна в среде не распространяется и СВР не возбуждается ни в одном из слоев. Когда $H_{fmr2}<H<H_{fmr1}$, спиновая волна распространяется в слое 1 и затухает в слое 2 на глубине

$$\delta_2=l_2\left(\frac{M}{H-H_{fmr2}}\right)^{1/2}. \qquad (5)$$

Это условие является физической причиной закрепления спинов на границе раздела слоев. Когда $H<H_{fmr2}$, волна может распространяться в обеих средах, нет скин-эффекта и причины для закрепления спинов, следовательно, серия СВР не возбуждается ни в одном из слоев.

Для численной оценки глубины проникновения спиновой волны в слой 2 (толщины скин-слоя) подставим в (5) значения параметров: $l_2=0{,}21$ мкм, $M_2=36{,}6$ Гс. Положим $H-H_{fmr}=500$ Э (H соответствует резонансному полю пика СВР), тогда получим $\delta_2=0{,}06$ мкм. Минимальная толщина слоя 2, приводящая к закреплению спинов, в эксперименте равна 0,05 мкм. При такой толщине слоя 2 серия СВР в слое 1 еще возбуждается, а при стравливании слоя 2 серия СВР исчезает (это было показано в работе [1]).

4. Таким образом, показано, что расчетная полевая зависимость диссипативной части восприимчивости хорошо описывает положение и интенсивность линий однородных ФМР и линий СВР между ними в зависимости от частоты переменного поля. Теория предсказывает взаимодействие между линиями ФМР и СВР разных слоев. Непосредственное сопоставление теоретического выражения для $\chi''(H)$ с экспериментальными данными позволяет однозначно определить характеристики слоев пленки. Возбуждение СВР между двумя частотами (полями) однородных ФМР объясняется явлением скин-эффекта на внутренней границе раздела слоев. Полученная теоретическая оценка глубины проникновения спиновой волны в соседний слой хорошо совпадает с экспериментальным значением.

1. A. M. Grishin, V. S. Dellalov, V. F. Shkar, E. I. Nikolayev, and A. I. Linnik, *Phys. Lett.* **A140**, 133 (1989).
2. А. М. Балбашов, Ф. В. Лисовский, В. К. Раев и др. *Элементы и устройства на ЦМД*, Н. Н. Евтихиев и Б. Н. Наумов (ред.) Радио и связь, Москва (1987).
3. S. L. Blank, R. Wolfe, L. S. Luther, and R. C. Le Crause, *J. Appl. Phys.* **50**, 2155 (1979).
4. C. Kittel, *Phys. Rev.* **110**, 1295 (1958).

Magnetic resonances in two-layer films of iron-garnets

A. M. Grishin, V. S. Dellalov, V. F. Shkar, and S. V. Yampolskii

The frequency dependences of resonant fields and intensities of the uniform ferromagnetic and spin wave resonances have been investigated in a two-layer iron garnet film structure, where one layer had easy-axis anisotropy and the other easy-plane one, if the external magnetic field is applied normally to the film plane. It is shown that the spin wave resonance excitation in the range between two frequency (or field) values can be explained by the skin effect at the interlayer boundary. The spin wave penetration depth into neighboring layer has been estimated theoretically.