

05

Влияние толщины слоя закрепления на ширину линий мод спин-волнового резонанса

© А.Г. Бажанов, А.М. Зюзин

Мордовский государственный университет
E-mail: bajanovag@rambler.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2005 г.

Исследованы зависимости ширины линий $2\Delta H_n$ мод спин-волнового резонанса от толщины слоя закрепления h_2 в двухслойных феррит-гранатовых пленках. Обнаружено резкое различие зависимостей $2\Delta H_n$ от h_2 для перпендикулярной и параллельной ориентаций внешнего магнитного поля относительно плоскости пленки. Показано, что возрастание $2\Delta H_n$ с уменьшением h_2 при перпендикулярной ориентации обусловлено возрастанием относительного вклада области экспоненциального затухания в диссипацию энергии спиновой волны. Периодическая зависимость $2\Delta H_n$ при параллельной ориентации объясняется особенностями конфигурации спиновой волны в слое закрепления при такой ориентации.

PACS: 76.50.+g

Ширина линий мод спин-волнового резонанса $2\Delta H_n$ является важной характеристикой спектров спин-волнового резонанса (СВР), которая позволяет исследовать факторы, влияющие на релаксационные процессы в многослойных магнитных пленочных структурах. В настоящей работе исследованы зависимости ширины линий $2\Delta H_n$ мод спин-волнового резонанса (СВР) от толщины слоя закрепления h_2 в двухслойных феррит-гранатовых пленках с диссипативным механизмом закрепления спинов.

Проведенные нами ранее исследования позволили установить, что в двух- и трехслойных магнитных пленках с сильно различающимися значениями параметра затухания Гильберта в слоях (на порядок и более) реализуется диссипативный механизм закрепления спинов [1]. Сущность его заключается в том, что при возбуждении переменной намагниченности в обменно-связанных слоях ее амплитуда или угол прецессии в слое с большим параметром затухания α_2 даже в условиях

однородного резонанса в α_2/α_1 раз меньше, чем в слое с малым α_1 . Это приводит к возникновению узла стоячей спиновой волны на границе раздела слоев или вблизи нее [1,2].

Исследования проводились на двухслойных монокристаллических пленках ферритов-гранатов. Первый ближний к подложке слой (слой возбуждения стоячих гармонических спин-волновых (СВ) мод) состава $Y_{2.98}Sm_{0.02}Fe_5O_{12}$ имел намагниченность насыщения $4\pi M_1 = 1740G$, гиромагнитное отношение $\gamma_1 = 1.76 \cdot 10^7 \text{ Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, эффективное поле одноосной анизотропии $H_{k1}^{eff} = -1715 \text{ Oe}$, параметр затухания Гильберта $\alpha_1 = (\Delta H \gamma / \omega) = 0.003$, толщину слоя возбуждения $h_1 = 0.35 \mu\text{m}$, где ω — круговая частота СВЧ-поля. Второй слой (слой закрепления спинов) состава $(SmEr)_3Fe_5O_{12}$ имел $4\pi M_2 = 1330 G$, $\gamma_2 = 1.38 \cdot 10^7 \text{ Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $H_{k2}^{eff} = 96 \text{ Oe}$, $\alpha_2 = 2$, $h_2 = 0.6 \mu\text{m}$. Регистрацию спектров СВР производили на радиоспектрометре РЭ-1301 на частоте СВЧ-поля $9.34 \cdot 10^9 \text{ Hz}$, магнитное поле измеряли с помощью холловского измерителя магнитной индукции РШ1-10. Спектры СВР записывали при перпендикулярной и параллельной ориентации внешнего магнитного поля относительно плоскости пленки. Толщина верхнего слоя закрепления h_2 уменьшалась путем химического травления пленки в ортофосфорной кислоте при температуре 140°C . Скорость травления оценивалась по времени полного стравливания однослойных аналогов.

В результате экспериментальных исследований было установлено следующее. На зависимостях ширины линий СВ-мод $2\Delta H_n(h_2)$ (рис. 1) при перпендикулярной ориентации \mathbf{H} относительно плоскости пленки видно, что при уменьшении толщины слоя закрепления до $h \approx 0.2 \mu\text{m}$ ширина линий оставалась практически постоянной, при $h \leq 0.2 \mu\text{m}$ начинала увеличиваться, достигала максимума и затем уменьшалась.

При параллельной ориентации с уменьшением h_2 ширина линий поглощения СВ-мод $2\Delta H_n$ изменяется периодически (рис. 2). При этом максимумы на зависимостях $2\Delta H_n$ от h_2 для разных СВ-мод с увеличением номера моды n монотонно смещаются в сторону меньших значений h_2 . Это свидетельствует о том, что период изменения $2\Delta H(h_2)$ уменьшается с увеличением номера СВ-моды.

Для объяснения наблюдаемых результатов был проведен следующий расчет. Ширина линии n -й спин-волновой моды рассчитывалась с помощью выражения [1]:

$$2\Delta H_n = 2\alpha_n^{eff} \omega / \gamma_n^{eff}, \quad (1)$$

где

$$\alpha_n^{eff} = \frac{\frac{\alpha_1}{\gamma_1 M_1} \int_0^{h_1} m_{1n}^2 dz + \frac{\alpha_2}{\gamma_2 M_2} \int_{h_1}^{h_1+h_2} m_{2n}^2 dz}{\frac{1}{\gamma_1 M_1} \int_0^{h_1} m_{1n}^2 dz + \frac{1}{\gamma_2 M_2} \int_{h_1}^{h_1+h_2} m_{2n}^2 dz}, \quad (2)$$

$$\gamma_n^{eff} = \frac{\frac{1}{M_1} \int_0^{h_1} m_{1n}^2 dz + \frac{1}{M_2} \int_{h_1}^{h_1+h_2} m_{2n}^2 dz}{\frac{1}{\gamma_1 M_1} \int_0^{h_1} m_{1n}^2 dz + \frac{1}{\gamma_2 M_2} \int_{h_1}^{h_1+h_2} m_{2n}^2 dz}. \quad (3)$$

Решение уравнения движения намагниченности [3] для каждого из слоев позволяет определить вид переменной намагниченности в этих слоях. При этом переменная намагниченность в слое возбуждения СВ-мод имеет вид:

$$m_{1n} = (A_n \cos k_{1n}z + B_n \sin k_{1n}z), \quad (4)$$

где k_{1n} — волновое число n -й спин-волновой моды в первом слое, A_n, B_n — коэффициенты, определяющие амплитуду переменной намагниченности m_{1n} в этом слое.

Переменная намагниченность в слое закрепления записывалась в виде, учитывающем затухание спиновой волны в этом слое:

$$m_{2n} = [C_n \cos k'_{2n}(z - h_1) + D_n \sin k'_{2n}(z - h_1)] e^{-k''_{2n}(z-h_1)}, \quad (5)$$

здесь k'_{2n} — действительная часть, $k''_{2n} = \frac{\alpha_2 \omega M_0 \gamma_2}{4A_2 \gamma_2 k'_{2n}}$ — мнимая часть волнового числа в слое закрепления, C_n, D_n — коэффициенты, определяющие амплитуду переменной намагниченности m_{2n} , в этом слое.

Далее решение уравнений равновесной ориентации намагниченности и дисперсионных соотношений [3], записанных для каждого из слоев двухслойной магнитной пленки, с учетом граничных условий на внешних границах пленки и на межслойной границе [4] и интегральных соотношений [2] позволяет определить значения волновых чисел $k_{1n}, k'_{2n}, k''_{2n}$, а также установить связь между амплитудами A_n, B_n, C_n, D_n .

Расчет, проведенный для перпендикулярной ориентации, показал, что уменьшение h_2 до значений меньших l ($l = 1/k''_2$ — глубина

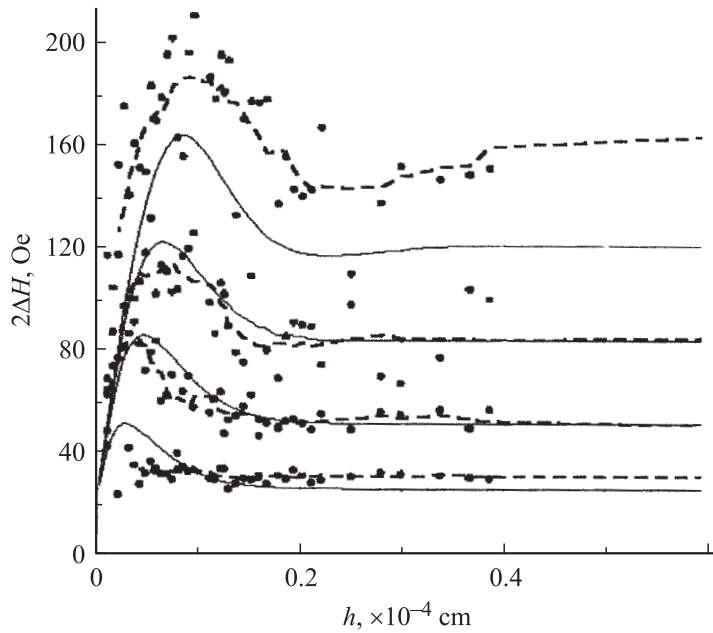


Рис. 1. Зависимости ширины линии от толщины слоя закрепления (1–4-я моды) для перпендикулярной ориентации внешнего поля относительно плоскости пленки (точки — эксперимент, сплошные линии — расчет).

проникновения спиновой волны в слой закрепления) приводит к ослаблению закрепления спинов и, как следствие, к увеличению глубины проникновения спиновой волны во второй слой. За счет возрастания амплитуды m_{2n} значение величины $\int_{h_1}^{h_1+h_2} m_{2n}^2 dz$ возрастает, что, в свою очередь, приводит к увеличению ширины линий $2\Delta H_n$ возбуждаемых СВ-мод (рис. 1). Затем на значение величины $\int_{h_1}^{h_1+h_2} m_{2n}^2 dz$ преобладающее влияние начинает оказывать уменьшение толщины h_2 и ширина линий СВ-мод уменьшается.

При параллельной ориентации \mathbf{H} относительно плоскости пленки характер спиновых возбуждений является более сложным. В этом

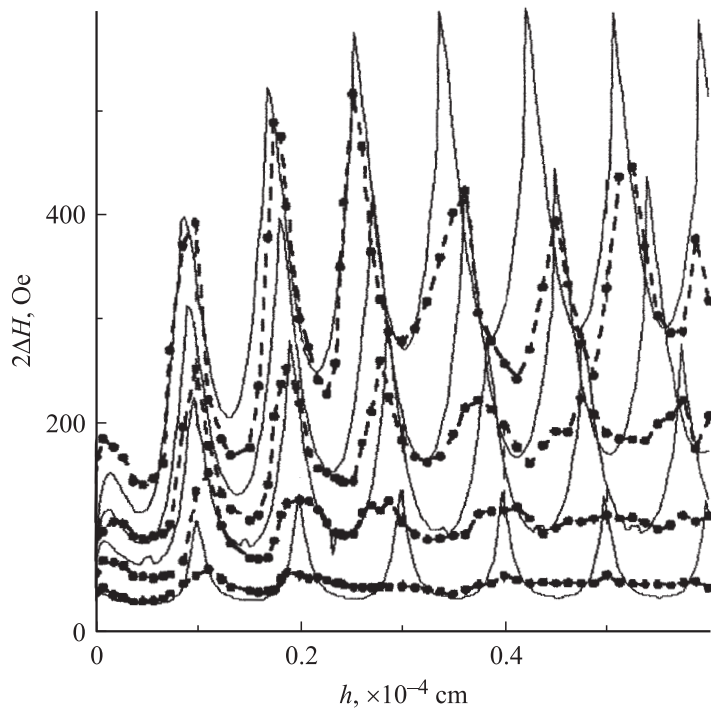


Рис. 2. Зависимости ширины линии от толщины слоя закрепления (1–4-я моды) для параллельной ориентации внешнего поля относительно плоскости пленки (точки — эксперимент, сплошные линии — расчет).

случае слой закрепления является дисперсивной средой [1,2], а сама волна в этом слое — экспоненциально затухающей, гармонической. Когда при уменьшении толщины h_2 свободная поверхность попадает на узел исходной спиновой волны, конфигурация волны изменяется таким образом, что на свободной поверхности возникает пучность волны. При этом существуют две возможные конфигурации. В результате спиновая волна распадается на две волны с $k_n \rightarrow k_n \pm \Delta k_n$. Вследствие изменения конфигурации волны, а также наложения двух близко расположенных линий поглощения, соответствующих этим спиновым волнам, ширина результирующей линии резко возрастает. Наоборот, при значениях h_2 ,

когда свободная поверхность попадает на пучность исходной спиновой волны в слое закрепления, ширина линий уменьшается и становится сравнимой с исходным значением $2\Delta H_n$ (рис. 2). Подтверждением вышеописанного механизма, обуславливающего уширение линий СВ-мод, является, в частности, то, что уширение наблюдается неоднократно, т. е. всякий раз, когда (при малых h_2) свободная граница слоя закрепления попадает на узел спиновой волны. Период уширения линий, оцененный по скорости и времени травления, соответствует половине длины волны в слое закрепления, рассчитанной как $\lambda = 2\pi/k'_2$. Уменьшение периода с увеличением номера моды связано с тем, что СВ-модам с большим номером соответствует меньшее значение λ_2 .

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) обнаружено резкое различие зависимостей ширины линий СВ-мод от толщины слоя закрепления h_2 при перпендикулярной и параллельной ориентациях внешнего магнитного поля относительно плоскости пленки;

2) возрастание $2\Delta H_n$ с уменьшением h_2 при перпендикулярной ориентации обусловлено возрастанием вклада области экспоненциального затухания в диссипацию энергии спиновой волны. Периодическая зависимость $2\Delta H_n$ при параллельной ориентации объясняется особенностями конфигурации спиновой волны в слое закрепления при такой ориентации.

Список литературы

- [1] Зюзин А.М., Бажанов А.Г., Сабаев С.Н. и др. // ФТТ. 2000. Т. 42. В. 7. С. 1279–1283.
- [2] Зюзин А.М., Сабаев С.Н., Райдакин В.В. и др. // ФТТ. 2002. Т. 44. В. 5. С. 893–897.
- [3] Гуресич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.
- [4] Wilts C.H., Prasad S. // IEEE. Trans. Magn. 1981. MAG-17. P. 2405–2415.