

05;09;11;12

## Спектры спин-волнового резонанса в двуслойных пленках с сильно различающимися значениями полей однородного резонанса в слоях

© А.М. Зюзин, М.А. Бакулин, В.В. Радайкин, С.Н. Сабаев, Н.В. Янцен

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,  
430000 Саранск, Россия  
e-mail: bakulinma@gmail.com

(Поступило в Редакцию 14 марта 2008 г.)

Показано, что при существенном различии полей однородного резонанса в слоях двуслойной пленки, спектр спин-волнового резонанса состоит из двух серий пиков, соответствующих гармоническим спин-волновым модам, локализованным в одном и другом слоях. Это свидетельствует о том, что эффективное закрепление спинов может быть обеспечено как слоем, находящимся в состоянии реактивной (упругой) среды, так и, при определенных условиях, слоем, являющимся для спиновых волн дисперсивной средой.

PACS: 76.50.+g, 75.70.-i

### Введение

Целью настоящей работы являлось исследование влияния разности полей однородного резонанса в слоях двуслойной пленки на степень закрепления спинов и характеристики спинов спин-волнового резонанса (СВР).

В большом числе работ спектр (СВР) в двуслойных пленках наблюдается в интервале магнитных полей, ограниченном полями однородного резонанса в одном и другом слоях [1–4]. В этом случае слой с меньшим значением поля однородного резонанса является реактивной (упругой) средой, в котором спиновая волна экспоненциально затухает. Данный фактор приводит к достаточно эффективному динамическому механизму закрепления спинов. В магнитных полях, меньших наименьшего из полей однородного резонанса в слоях, оба слоя становятся для спиновых волн дисперсивными средами, а сами волны — объемными, т.е. гармоническими как в одном, так и в другом слоях. Результирующий переменный магнитный момент всей пленки (интеграл возбуждения) в этом случае становится существенно меньшим. Данное обстоятельство и обуславливает тот факт, что объемные спин-волновые моды в большом числе работ не наблюдаются в спектре.

Однако можно показать, что при достаточно большом различии полей однородного резонанса в слоях двуслойной пленки будут возбуждаться гармонические спин-волновые (СВ) моды, локализованные сначала в одном, а затем во втором слоях, и соответственно спектр СВР будет состоять из двух серий пиков поглощения соответствующих мод.

### Эксперимент

Нами были исследованы спектры СВР двуслойных монокристаллических пленок ферритов-гранатов, полученных методом жидкофазной эпитаксии путем последовательного наращивания слоев из различных растворов в

расплаве на подложки из гадолиний-галлиевого граната с плоскостью (111). Их состав и параметры приведены в таблице. Толщина каждого из слоев на их однослойных аналогах интерференционным методом.

Пленки обладали различными значениями однородного резонанса  $H_{0i}$  в слоях. Варьирование значений разности  $H_{01} - H_{02}$  производилось, кроме того, путем изменения угла между внешним постоянным магнитным полем  $\mathbf{H}$  и пленкой.

Регистрацию спектров СВР производили на стандартном радиоспектрометре с частотой СВЧ-поля  $\omega/2\pi$ , равной  $9.34 \cdot 10^9$  Hz. Образцы помещались в скрещенные постоянное и переменное магнитные поля. Магнитное поле измерялось с помощью ЯМР-магнетометра.

На рис. 1 приведены угловые зависимости резонансных полей спин-волновых мод исследованных пленок. Отрезки линий определяют область углов, при которых наблюдается возбуждение соответствующей моды.

Как видно из рис. 1, *a* (образец № 1), в интервале углов от 0 до  $30^\circ$  спектр состоит лишь из пиков поглощения, соответствующих гармоническим СВ-модам, локализованным в первом слое.

При  $\Theta_H = 30^\circ$  поля однородного резонанса в слоях становятся равными и спектр поглощения трансформируется в одну общую нулевую моду — моду однородного резонанса. При углах  $40^\circ \leq \Theta_H \leq 90^\circ$  СВ-моды возбуждаются уже не только в интервале магнитных полей  $H_{01} < H < H_{02}$  — вторая серия СВ-мод (моды, локализованные во втором слое), но и в области полей, меньших  $H_{01}$ , т.е. когда оба слоя являются дисперсивными средами — вторая серия СВ-мод, локализованных в первом слое. При этом наиболее заметной особенностью является то, что с увеличением разности полей однородного резонанса (происходящим с увеличением угла  $\Theta_H$ ), увеличивается число возбуждаемых СВ-мод, т.е. начинают последовательно возбуждаться моды все более высокого порядка.

Параметры исследованных пленок

№ образца	№ слоя	Состав	$h, \mu\text{m}$	$4\pi M, \text{Gs}$	$\alpha$	$H_k^{\text{eff}}, \text{Oe}$	$\gamma, 10^7 \text{Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
1	1*	$(\text{YSm})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.49	1720	0.003	-1680	1.76
	2*	$(\text{BiSmTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$	1.23	600	0.013	-270	1.61
2	1*	$\text{Y}_{2.98}\text{Sm}_{0.02}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.505	1740	0.003	-1715	1.76
	2*	$\text{Sm}_{1.2}\text{Lu}_{1.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	1.4	1760	0.12	790	1.76

Примечание: 1\* — слой возбуждения гармонических СВ-мод, 2\* — слой закрепления

В образце № 2, в котором слой закрепления обладает большим затуханием и поэтому доминирующим является диссипативный механизм закрепления спинов [5,6], спектр СВР при любом значении угла  $\Theta_H$  возбуждается в первом слое (рис. 1, b). С увеличением  $\Theta_H$  до  $55^\circ$

происходит уменьшение числа возбуждаемых СВ-мод. При дальнейшем увеличении  $\Theta_H$  от  $55$  до  $90^\circ$  происходит увеличение разности полей однородного резонанса и число СВ-мод, так же как и в образце № 1, монотонно возрастает.

## Результаты и их обсуждение

В работах [1–4] предполагается, что в магнитных полях, при которых оба слоя являются для спиновых волн дисперсивными средами, значения амплитуд переменной намагниченности в одном и другом слоях равны или близки между собой (рис. 2, a). Такое предположение соответствует тому, что пространственная форма спиновой волны на границе раздела слоев может принимать любые значения, когда выполняются граничные условия на межслойной и свободных границах. Однако здесь не учитывается то обстоятельство, что амплитуда гармонической спиновой волны  $m$ , возбуждаемой однородным высокочастотным (ВЧ) полем в слое обратно пропорциональна волновому числу  $k$ ,  $m_0 \sim 1/ahk$ , где  $a$  — параметр затухания,  $h$  — толщина слоя. Это можно показать, основываясь на условии равенства моментов или равенства мощности сил, обусловленных действием на переменную намагниченность высокочастотного магнитного поля и мощности диссипативных сил. В первом приближении, не учитывающем межслойного влияния, расчет показывает, что амплитуда спиновой волны, например, во втором слое (слое с большим  $H_0$ ) при одинаковых  $\alpha$  и  $h$  в слоях оказывается в  $k_2/k_1$  раз меньше, чем в первом (рис. 2, a). Необходимо отметить, что  $m_0$  зависит также от толщины слоя и параметра затухания.

На рис. 2, b представлены зависимости волновых чисел в слоях 1 и 2, рассчитанные с помощью дисперсионного соотношения

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \left(H \cos(\Theta_H - \Theta_M) + H_k^{\text{eff}} \cos 2\Theta_M + \frac{2A}{M} k^2\right) \times \left(H \cos(\Theta_H - \Theta_M) + H_k^{\text{eff}} \cos^2 \Theta_M + \frac{2A}{M} k^2\right) \quad (1)$$

и условия равновесной ориентации намагниченности [7]

$$\sin 2\Theta_M = \left(\frac{2H}{H_k^{\text{eff}}}\right) \sin(\Theta_H - \Theta_M), \quad (2)$$

где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $\omega$  — угловая частота СВЧ поля,  $H_k^{\text{eff}}$  — эффективное поле одноосной

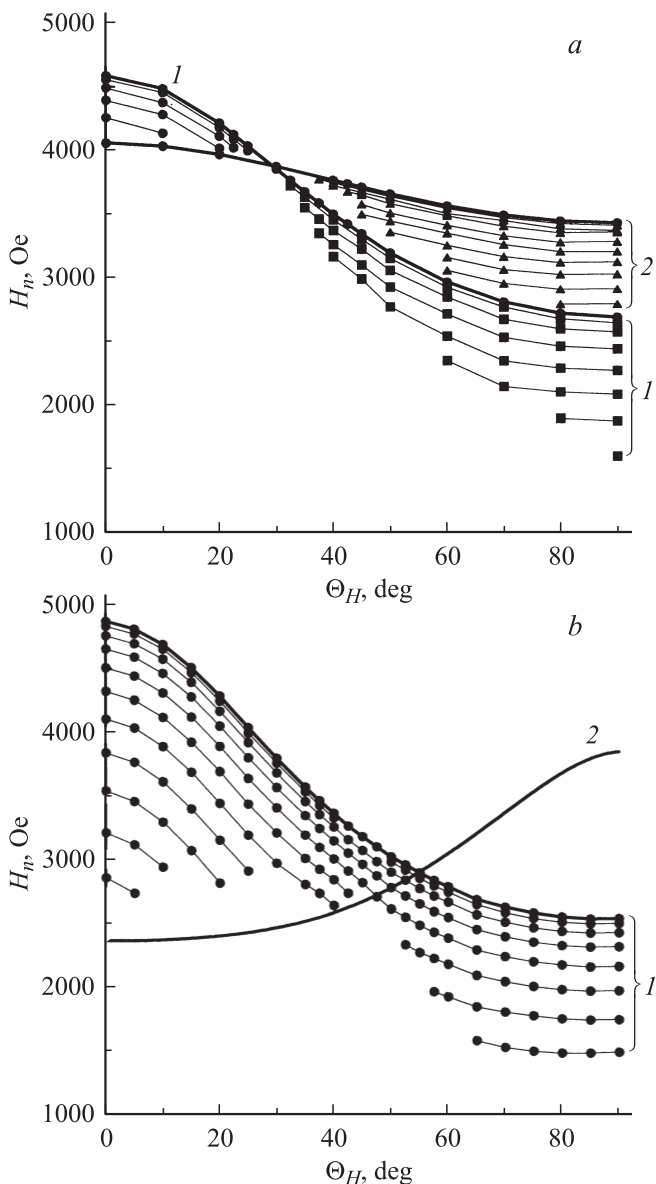
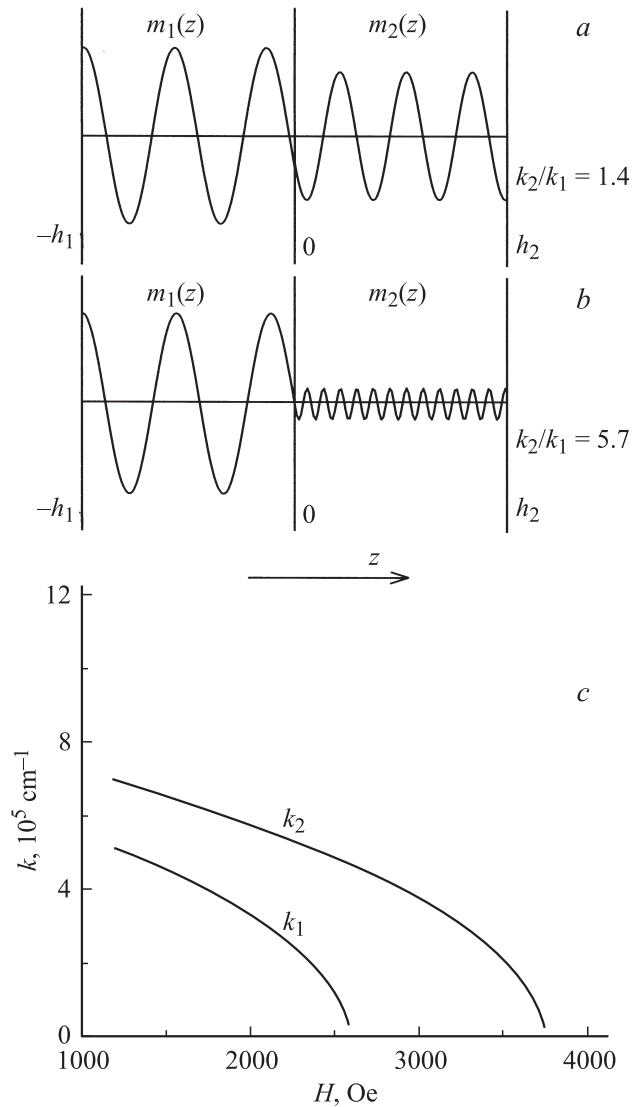


Рис. 1. Угловые зависимости числа возбуждаемых СВ-мод и их резонансных полей для образца № 1 (a) и 2 (b). Жирные линии —  $H_{0i}(\Theta_H)$ .



**Рис. 2.** *a, b* — Распределение переменной намагниченности в двуслойной пленке для различных соотношений  $k_2/k_1$ ; *c* — зависимости волновых чисел  $k_1$  и  $k_2$  в слоях от магнитного поля  $H$ .

анизотропии,  $A$  — константа обменного взаимодействия,  $M$  — намагниченность,  $\Theta_H$  и  $\Theta_M$  — угол между осью анизотропии, совпадающей с нормалью к пленке и векторами  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{M}$  соответственно.

Большое различие полей однородного резонанса в слоях  $H_{0i} - H_{0j}$  обуславливает большие значения  $(k_2/k_1)$ , а следовательно, и сильное различие амплитуд переменной намагниченности в одном и другом слоях. Как видно из рис. 2, *b* в наибольшей степени это различие будет проявляться в полях, при которых значения  $k_1$  сравнительно малы. Данное обстоятельство приводит к тому, что СВ-мода с большей амплитудой переменной намагниченности будет иметь узел на границе раздела слоев или вблизи нее. Тем самым будет обеспечиваться локализация доминирующей СВ-моды (спин-волновых

колебаний с существенно большей амплитудой) в первом слое. Данное обстоятельство можно рассматривать как механизм эффективного закрепления спинов, обусловленного вторым слоем — слоем, находящимся в состоянии дисперсивной среды.

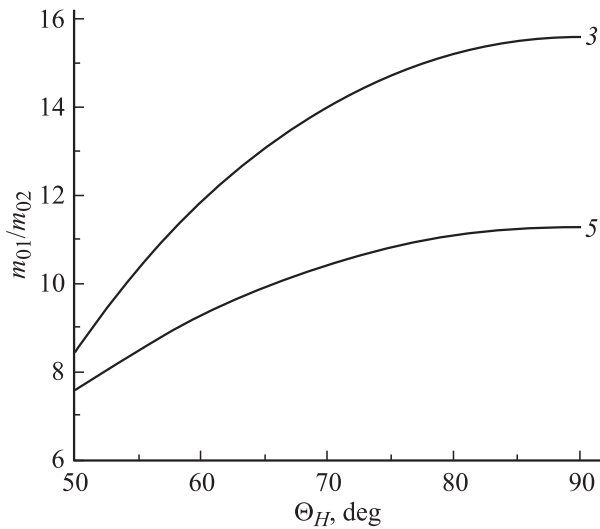
Таким образом, спектр СВР двуслойной пленки с сильно различающимися значениями полей однородного резонанса в слоях будет определяться не интегральными параметрами всей пленки, а являться совокупностью спектров стоячих гармонических СВ-мод, локализованных сначала в одном, а затем в другом слое с закреплением на межслойной границе.

Как было сказано выше, в интервале углов от  $0$  до  $30^\circ$  спектр СВР состоит лишь из пиков поглощения, соответствующих гармоническим СВ-модам, локализованным в первом слое. Второй слой при этом находится в состоянии реактивной среды и обеспечивает эффективное закрепление спинов. В этом слое спиновая волна экспоненциально затухает от границы раздела слоев. В области магнитных полей, когда оба слоя одновременно являются дисперсивными средами, спин-волновые моды во втором слое не возбуждаются, что объясняется вышеизложенными факторами и, в частности, недостаточным значением разности полей однородного резонанса в отмеченном интервале углов. Как показывает расчет, в этой области отношение амплитуд переменной намагниченности в слоях близко к единице  $m_1/m_2 \approx 1$ . С увеличением угла  $\Theta_H$  происходит уменьшение интервала полей, ограниченного полями однородного резонанса, и, как следствие — монотонное уменьшение числа возбуждаемых СВ-мод.

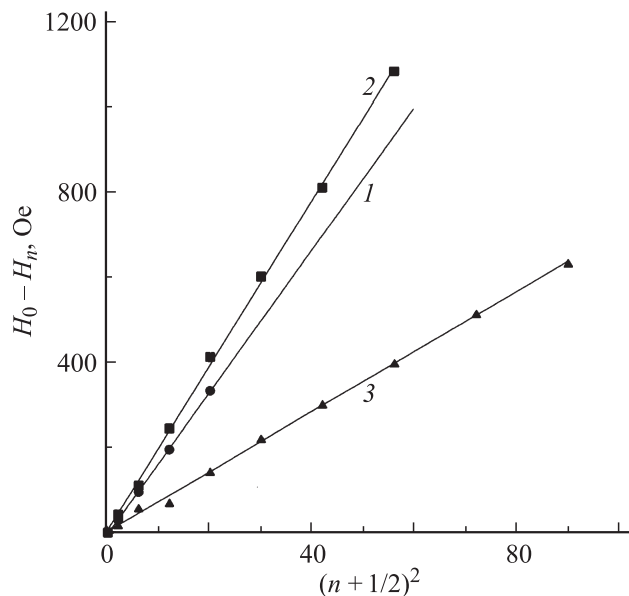
В интервале углов  $40 \leq \Theta_H \leq 90^\circ$  с увеличением разности  $H_{02} - H_{01}$  происходит увеличение числа возбуждаемых СВ-мод. При этом, как только отношение амплитуд спиновых колебаний в одном и другом слоях достигает определенного значения, становится возможным возбуждение СВ-моды более высокого порядка, локализованной в слое с меньшим значением поля однородного резонанса.

На рис. 3 в качестве иллюстрации приведены зависимости  $m_{0i}/m_{0j}$  для полей, соответствующих третьей и пятой СВ-модам, возбуждаемых в первом слое. Отметим, что отношение амплитуд зависит не только от разности  $H_{0i} - H_{0j}$ , но и от значений поля  $H$ . Из сопоставления расчета и экспериментальных данных следует, что возбуждение моды более высокого порядка происходит при условии, когда значение  $m_{0i}/m_{0j} \geq 8$ .

Справедливость вышеизложенных соображений и то, что при большом значении разности  $H_{0i} - H_{0j}$  спектр СВР представляет собой совокупность пиков поглощения, обусловленных стоячими гармоническими спин-волновыми модами, локализованными сначала в одном, а затем в другом слоях, подтверждается и линейным характером дисперсионных кривых  $H_0 - H_n = f(n^2)$ , построенных для одной и другой серии пиков (рис. 4). При этом углы наклона дисперсионных кривых для мод, возбуждаемых в первом слое как при перпендикулярной



**Рис. 3.** Зависимости отношения амплитуд переменной намагниченности в слоях для третьей и пятой СВ-мод, возбуждаемых в первом слое от угла  $\Theta_H$ .



**Рис. 4.** Дисперсионные кривые для СВР в образце № 1; 1 и 2 — моды, возбуждаемые в первом слое при перпендикулярной и параллельной ориентациях соответственно, 3 — моды, возбуждаемые во втором слое при параллельной ориентации  $\mathbf{H}$ .

(второй слой в состоянии реактивной среды), так и при параллельной (второй слой в состоянии дисперсивной среды) ориентациях внешнего поля относительно плоскости пленки, практически совпадают между собой.

При доминирующем диссипативном механизме закрепления спинов спектр СВР, как было отмечено выше, состоит лишь из мод, локализованных в слое с меньшим значением параметра затухания. Однако и в этом случае описанный механизм оказывает существенное влияние

на спектр СВР. Данный вывод иллюстрирует рис. 1, *b*, на котором приведены угловые зависимости резонансных полей СВ-мод для образца № 2. Видно, что так же как и для образца № 1, с увеличением разности полей однородного резонанса в слоях происходит увеличение числа возбуждаемых СВ-мод, что эквивалентно возрастанию степени закрепления спинов.

Таким образом, в настоящей работе показано, что при достаточно большом различии целей однородного резонанса в слоях двухслойной пленки слой, находящийся в состоянии дисперсивной среды также может обеспечивать эффективное закрепление спинов. В этом случае спектр СВР представляет собой совокупность спектров, состоящих из линий поглощения СВ-мод, локализованных сначала в одном, а затем в другом слоях.

## Список литературы

- [1] *Wilts C.H., Prasad S.* // IEEE Trans. Magn. MAG-17. 1981. P. 2405.
- [2] *Hoekstra B., Stapele R.P., Robertson J.M.* // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. P. 382.
- [3] *Дальшин Н.К., Делларов В.С., Кольцов М.А., Николаев Е.И., Шкарь В.Ф.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. Вып. 3 (9). С. 938–942.
- [4] *Jirsa M.* // Phys. Stat. Sol. (b). 1982. Vol. 113. P. 679.
- [5] *Зюзин А.М., Бажанов А.Г.* // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. Вып. 10. С. 1430–1439.
- [6] *Зюзин А.М., Бажанов А.Г., Радайкин В.В.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 97–101.
- [7] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. С. 51.