

05

Влияние частоты переменного магнитного поля на дисперсионные зависимости спектров спин-волнового резонанса в многослойных пленках

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

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск
E-mail: zuzin.am@rambler.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2015 г.

Обнаружено уменьшение рассогласования дисперсионных кривых для спектров спин-волнового резонанса (СВР) при перпендикулярной и параллельной ориентациях постоянного магнитного поля относительно плоскости пленки с ростом частоты СВЧ-поля. Установлено, что основным фактором, обуславливающим возрастание угла наклона кривой при перпендикулярной ориентации, связан с переходом слоя закрепления из состояния реактивной среды в дисперсивную. Показано, что для корректного определения константы обменного взаимодействия и обменной жесткости по спектру СВР необходимо использовать дисперсионную кривую, построенную для ориентации, при которой слой закрепления является дисперсивной средой.

Дисперсионная зависимость спектра стоячих спиновых волн в тонких пленках является важнейшей характеристикой спин-волнового резонанса (СВР). Она позволяет определять фундаментальный параметр магнитных материалов — константу обменного взаимодействия A и обменную жесткость $D = 2A/M$ [1,2], а также получить другую информацию, в частности, о структуре пленок методом корреляционной спин-волновой спектроскопии [3,4].

В работах [5,6] было обнаружено рассогласование (различие углов наклона) дисперсионных кривых, построенных для спектров СВР при перпендикулярной и параллельной ориентациях \mathbf{H} относительно плоскости пленки. Закрепление спинов в исследуемых пленках было обусловлено одновременным действием диссипативного [7] и динамического механизмов. Указанное рассогласование объясняется различием

Образец	№ слоя	Состав	h , μm	$4\pi M$, G	α	γ , 10^7 $\text{Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	H_k^{eff} , Oe
1	1*	$\text{Sm}_{0.45}\text{Er}_{2.55}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	2.5	1330	0.2	1.38	96
	2*	$\text{Y}_{2.98}\text{Sm}_{0.02}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.72	1740	0.003	1.76	-1715
2	1*	$\text{Sm}_{0.45}\text{Er}_{2.55}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	1.6	1330	0.2	1.38	96
	2*	$\text{Y}_{2.98}\text{Sm}_{0.02}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.72	1740	0.003	1.76	-1715
	3*	$\text{Sm}_{0.45}\text{Er}_{2.55}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	2.1	1330	0.2	1.38	96
3	1*	$\text{Sm}_{0.45}\text{Er}_{2.55}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	1.8	1330	0.2	1.38	96
	2*	$\text{Y}_{2.98}\text{Sm}_{0.02}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.82	1740	0.003	1.76	-1715

Примечание: 1*, 3* — слой закрепления; 2* — слой возбуждения.

значений волнового числа для одной и той же спин-волновой (СВ) моды, но для разных ориентаций \mathbf{H} относительно пленки.

Целью данной работы являлось исследование влияния частоты СВЧ-поля на дисперсионные кривые спектров СВР при перпендикулярной и параллельной ориентациях внешнего постоянного магнитного поля \mathbf{H} относительно плоскости пленки.

Исследования проводились на двух- и трехслойных монокристаллических пленках ферритов-гранатов с кристаллографической плоскостью (111), полученных методом жидкофазной эпитаксии. Состав и параметры слоев исследуемых пленок (толщина h , намагниченность насыщения M , параметр затухания Гильберта α , гиромагнитное отношение γ , эффективное поле одноосной анизотропии H_k^{eff}) приведены в таблице. Параметры H_k^{eff} и γ определялись по значениям полей однородного резонанса H_0 при перпендикулярной и параллельной ориентациях. Намагниченность насыщения определялась по интенсивности и ширине линии поглощения нулевой моды соответствующего слоя, а также линии ферромагнитного резонанса однослойного аналога [8].

Спектры СВР регистрировались на ЭПР-спектрометре X и Q диапазонов EMX Plus (Bruker) на частотах СВЧ-поля $f_1 = 9.4 \text{ GHz}$ и $f_2 = 34 \text{ GHz}$ при комнатной температуре.

Уравнения, определяющие резонансные поля H_n СВ-мод, возбуждаемых однородным СВЧ-полем при перпендикулярной и параллельной ориентациях \mathbf{H} , соответственно имеют следующий вид

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_n + H_k^{eff} + \frac{2A}{M} k^2 - \frac{2}{3} H_{k1}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \left(H_n + \frac{2A}{M}k^2\right) \left(H_n - H_k^{eff} + \frac{2A}{M}k^2 - \frac{1}{2}H_{k1}\right), \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, k — волновое число СВ-моды, H_{k1} — поле кубической анизотропии.

Отметим, что при регистрации спектров СВР на постоянной частоте СВЧ-поля, как правило, в качестве дисперсионной кривой, принимается зависимость $H_0 - H_n = f(k^2)$ [2,9,10], где H_0 и H_n — резонансные поля нулевой и n -й СВ-мод. Как следует из (1) и (2), в случае полного закрепления спинов на границе раздела слоев, разность $H_0 - H_n$ так же, как и разность частот (при постоянном \mathbf{H}), возбуждаемых СВ-мод, должна быть квадратичной по k . При построении дисперсионных кривых значения волновых чисел СВ-мод принимаются равными $(n + \frac{1}{2})\frac{\pi}{h_2}$ для двухслойных и $(2n + 1)\frac{\pi}{h_2}$ для трехслойных пленок [11]. Такая схема соответствует тому, что крайний узел стоячей спиновой волны, локализованной в слое возбуждения, находится на границе раздела между слоями.

Как следует из эксперимента, на частоте $f_1 = 9.4 \text{ GHz}$ величина рассогласования дисперсионных кривых в трехслойной пленке примерно в 2 раза превышает величину рассогласования для двухслойной, с аналогичным слоем возбуждения (рис. 1, *a* и *b*). С уменьшением толщины слоя возбуждения величина рассогласования дисперсионных кривых возрастает (рис 1, *a* и *c*).

Проведенные эксперименты показали, что при увеличении частоты СВЧ-поля с $f_1 = 9.4 \text{ GHz}$ до $f_2 = 34 \text{ GHz}$ происходят существенные изменения в спектре СВР. Во всех исследованных образцах — как в двухслойных, так и в трехслойных — с увеличением f обнаружено значительное возрастание угла наклона дисперсионных кривых для перпендикулярной ориентации \mathbf{H} относительно пленки. При параллельной ориентации угол наклона кривой изменяется в значительно меньшей степени. В результате сильно уменьшается рассогласование между дисперсионными кривыми. Как видно из рис. 1, дисперсионные кривые при обеих ориентациях на частоте $f_2 = 34 \text{ GHz}$ практически совпадают. Причем это совпадение наблюдалось во всех исследованных пленках, несмотря на то, что на частоте $f_1 = 9.4 \text{ GHz}$ величина рассогласования, как отмечено выше, была существенно различной.

Как показал проведенный расчет спектров СВР, наблюдаемые с ростом частоты СВЧ-поля изменения связаны с изменением пространственной фазы СВ-моды на границе раздела слоев, а следова-

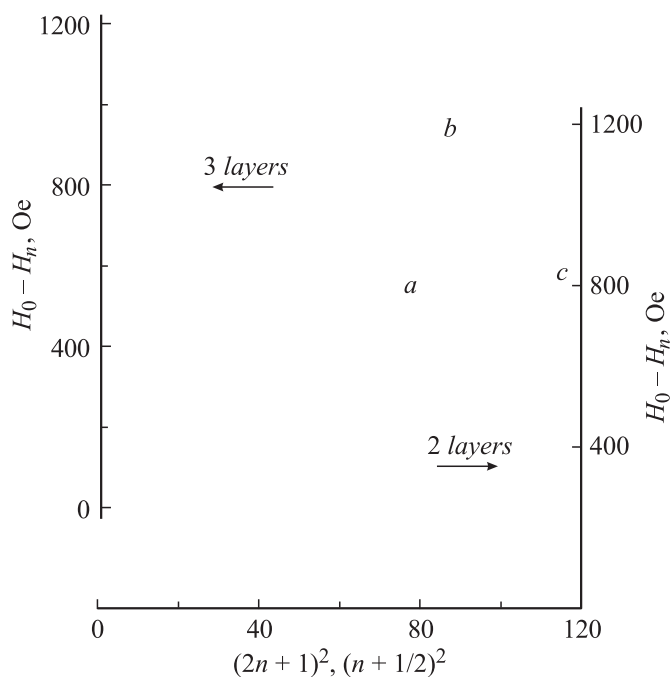


Рис. 1. Дисперсионные зависимости $H_0 - H_n = f(n + 1/2)^2$ для двухслойных пленок (a — образец № 1; c — образец № 3) и $H_0 - H_n = f(2n + 1)^2$ для трехслойной пленки (b — образец № 2). Сплошные линии соответствуют частоте $f_1 = 9.4$ GHz, штриховые — $f_2 = 34$ GHz. 1 — перпендикулярная ориентация \mathbf{H} , 2 — параллельная.

тельно, и с изменением ее волнового числа k . При параллельной ориентации внешнего магнитного поля \mathbf{H} относительно пленки слой закрепления является дисперсивной средой как на частоте f_1 , так и на f_2 . Узел СВ-моды расположен вблизи межслойной границы на обеих частотах (рис. 2, a), что соответствует практически полному закреплению. Поэтому увеличение угла наклона дисперсионной кривой для этой ориентации не столь заметно с ростом частоты. Как следует из рис. 2, b , при перпендикулярной ориентации \mathbf{H} пространственная фаза СВ-моды на границе раздела слоев с ростом частоты изменяется

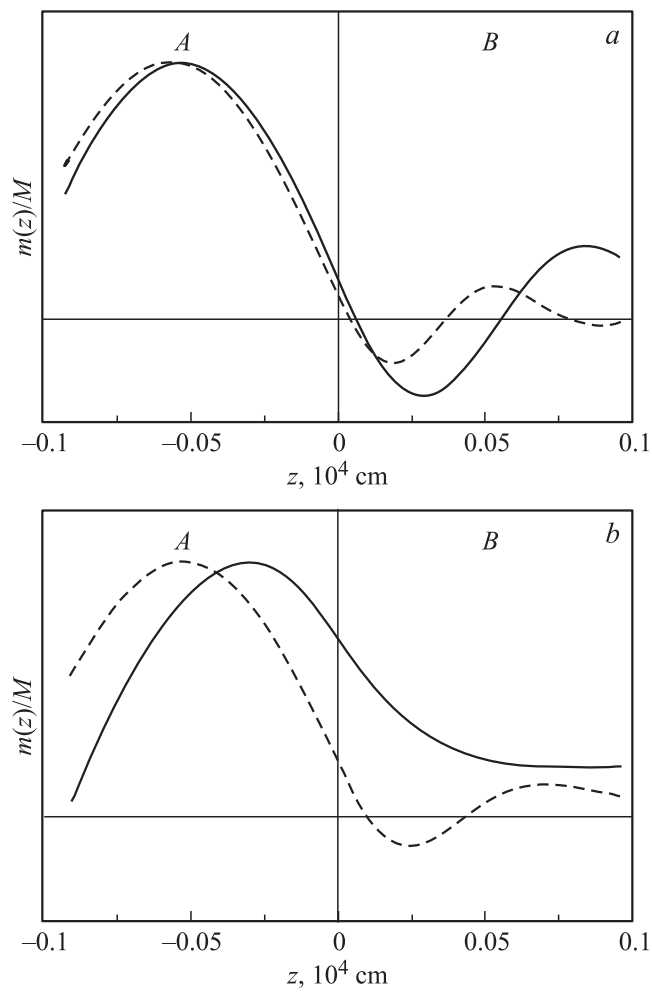


Рис. 2. Распределение переменной намагниченности по толщине пленки $m(z)$ для моды $n = 3$ вблизи границы раздела слоев возбуждения и закрепления: a — параллельная ориентация \mathbf{H} , b — перпендикулярная. Сплошные линии соответствуют частоте $f_1 = 9.4$ GHz, штриховые — $f_2 = 34$ GHz. A — слой возбуждения, B — слой закрепления.

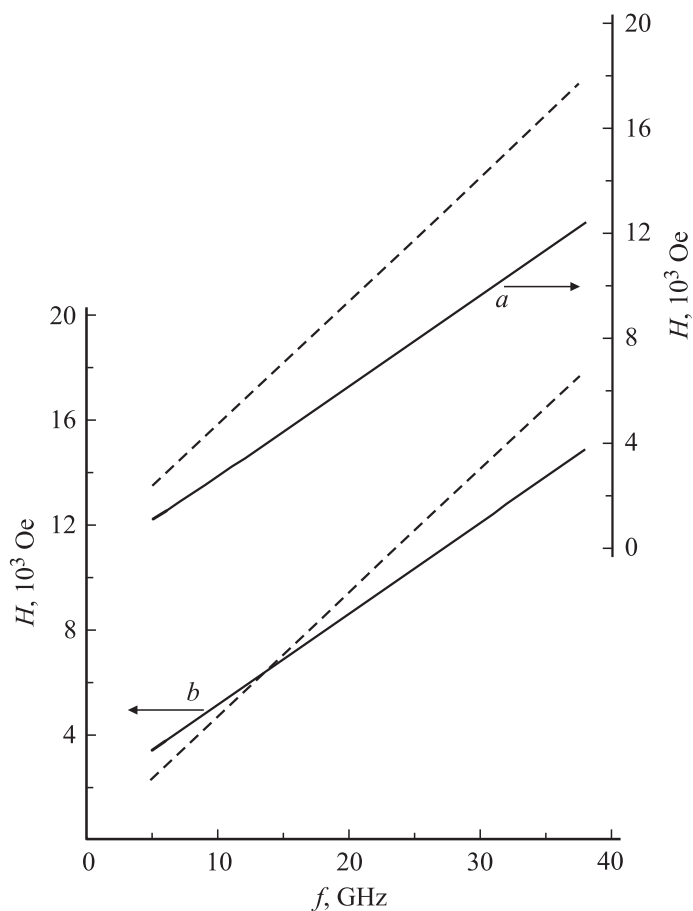


Рис. 3. Расчетная зависимость полей однородного резонанса в слоях от f (сплошные линии — слой возбуждения, штриховые — слой закрепления): a — параллельная ориентация \mathbf{H} , b — перпендикулярная.

значительно более существенно. Как показал проведенный анализ, такая трансформация в определяющей степени обусловлена переходом слоя закрепления из состояния реактивной среды в дисперсивную в области магнитных полей, в которой наблюдается спектр СВР. Данный

переход обусловлен различием значений γ для слоя возбуждения и слоя закрепления. На рис. 3 приведены расчетные зависимости полей однородного резонанса в слоях со значениями γ и H_k^{eff} , соответствующими исследуемым образцам от частоты СВЧ-поля. Видно, что при параллельной ориентации \mathbf{H} относительно пленки с ростом f разность полей однородного резонанса в слое закрепления H_{01} и слое возбуждения H_{02} возрастает. При перпендикулярной ориентации величина $H_{01} - H_{02}$ на частоте $f_1 = 9.4 \text{ GHz}$ отрицательна. С ростом частоты она уменьшается по модулю и при $f \approx 13.5 \text{ GHz}$ изменяет знак. Это означает, что и при перпендикулярной ориентации, в области частот СВЧ-поля $f \geq 13.5 \text{ GHz}$, слой закрепления в интервале магнитных полей, соответствующих возбуждаемому спектру СВР, становится для спиновых колебаний дисперсивной средой.

Таким образом, влияния реактивных или дисперсивных свойств слоя закрепления, кроме действия диссипативного механизма закрепления спинов, приводит с ростом частоты СВЧ-поля к изменению пространственных фаз стоячих спиновых волн на межслойной границе слоев. Такая трансформация приводит к изменению значений волновых чисел мод СВР с одинаковым порядковым номером n и, как следствие, к изменению угла наклона дисперсионных кривых.

На основе результатов, полученных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Обнаружено, что увеличение частоты СВЧ-поля приводит к уменьшению величины рассогласования дисперсионных кривых для спектров СВР, соответствующих перпендикулярной и параллельной ориентации \mathbf{H} относительно плоскости пленки.

2. Угол наклона дисперсионных кривых при параллельной ориентации \mathbf{H} с увеличением частоты СВЧ-поля практически не изменяется, в то время как при перпендикулярной ориентации заметно возрастает. Данная трансформация обусловлена переходом слоя закрепления из состояния реактивной среды в дисперсивную.

3. Для корректного определения константы обменного взаимодействия A и обменной жесткости D по спектру спиновых волн необходимо использовать дисперсионную кривую, построенную для той ориентации \mathbf{H} относительно пленки, при которой слой закрепления является дисперсивной средой. В случае исследованных нами пленок это соответствует параллельной ориентации \mathbf{H} относительно плоскости пленки на частоте СВЧ-поля $f_1 = 9.4 \text{ GHz}$ и обеим ориентациям на частоте $f_2 = 34 \text{ GHz}$.

Список литературы

- [1] Зюзин А.М., Бажанов А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63. № 7. С. 528.
- [2] Klinger S., Chumak A.V., Mewes T et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. N 1. P. 015001.
- [3] Исхаков Р.С., Столяр С.В., Чижик М.В., Чеканова Л.А. // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. № 4. С. 325.
- [4] Игнатченко В.А., Исхаков Р.С. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. № 4. С. 1438.
- [5] Зюзин А.М., Сабаев С.Н., Радайкин В.В., Куляпин А.В. // ФТТ. 2002. Т. 44. В. 5. С. 893.
- [6] Зюзин А.М., Сабаев С.Н., Куляпин А.В. // ФТТ. 2003. Т. 45. В. 12. С. 2208.
- [7] Зюзин А.М., Бажанов А.Г., Радайкин В.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 11. С. 97.
- [8] Зюзин А.М., Ваньков В.Н., Радайкин В.В. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 23. С. 65.
- [9] Schreiber F., Frait Z. // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. N 9. P. 6473.
- [10] Liu X., Zhou Y.Y., Furdyna J.K. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. N 19. P. 195220.
- [11] Hoekstra B., van Staple R.P., Robertson J.M. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. N 1. P. 382.