

ЗЮЗИН А. М., БАКУЛИН М. А., РАДАЙКИН В. В., САБАЕВ С. Н., ЯНЦЕН Н. В.
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ СПИНОВ В
ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ

Аннотация. Обнаружено резкое различие в поведении температурных зависимостей спектров спин-волнового резонанса двухслойных пленок с различными параметрами слоев закрепления. Проведенный расчет подтвердил, что эффект исчезновения и последующего появления спин-волновых мод в определенном интервале температур связан с уменьшением степени закрепления из-за сближения полей однородного резонанса в слоях возбуждения и закрепления спиновых колебаний.

Ключевые слова: спин-волновой резонанс, двухслойная пленка.

ZYUZIN A. M., BAKULIN M. A., RADAYKIN V. V., SABAEV S. N., YANTSEN N. V.
TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CONSOLIDATION DEGREE
OF THE SPINS IN BILAYER FILMS

Abstract. The authors found a sharp difference in the behavior of the temperature dependence of the spectra of spin wave resonance two-layer films with different layer settings fixing. The calculation confirmed that the effect of the disappearance and the subsequent appearance of spin-wave modes in a certain interval of temperatures is due to the decrease of the degree of consolidation due to the convergence of fields homogeneous resonance in layers of excitation and consolidation of spin fluctuations.

Keywords: spin-wave resonance, thin bilayer film.

Исследования спиновой динамики в многослойных пленочных структурах ферритов гранатов приобретают в последнее время особый интерес, связанный с перспективами развития спинтроники [1, 2]. В настоящей работе исследовано влияние температуры на степень закрепления спинов в двухслойных пленках и характеристики спектров спин-волнового резонанса (СВР).

Эксперименты проводились на двухслойных монокристаллических пленках ферритов-гранатов, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Состав и параметры пленок при комнатной температуре приведены в таблице I. Толщина каждого из слоев d определялась на их однослойных аналогах интерференционным методом. Пленки обладали различными значениями намагниченности M , параметра затухания Гильберта α и эффективного поля одноосной анизотропии $H_k^{eff} = H_k^u - 4\pi M$ в слоях, здесь H_k^u - поле одноосной магнитной анизотропии. H_k^{eff} определялось по значениям полей

однородного H_{0i} резонанса при перпендикулярной и параллельной ориентациях постоянного магнитного поля относительно плоскости пленки. Намагниченность насыщения определялась по интенсивности и ширине линии поглощения нулевой моды соответствующего слоя, а также линий ферромагнитного резонанса (ФМР) однослойного аналога, измеренных при соответствующих температурах [3]. Регистрацию спектров СВР производили на ЭПР-спектрометре X-диапазона EMX Plus (Bruker) в интервале температур $20 - 290^{\circ}\text{C}$, на частоте СВЧ поля $f = 9.34\text{GGz}$.

Таблица 1. Состав и параметры пленок.

образ ец	№ слоя	Состав	d , μm	$4\pi M$, Gs	α	H_k^{eff} , Oe	$\gamma, 10^7$ $\text{Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
1	1	$\text{Y}_{2.98}\text{Sm}_{0.02}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.41	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
2	1	$\text{Y}_{2.98}\text{Sm}_{0.02}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	0.4	1740	0.003	-1715	1.76
	2	$\text{Sm}_{0.45}\text{Er}_{2.55}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	2.5	1330	0.2	36	1.38

Известно, что на степень закрепления спинов существенное влияние оказывают ряд физических факторов, таких как разность полей однородного резонанса слоя возбуждения и слоя закрепления, параметр затухания, толщина, намагниченность, константа обмена [4-6].

Как показали проведённые эксперименты температурные зависимости числа возбуждаемых спин-волновых (СВ) мод в образцах №1 и №2 существенно различаются. На рис. 1. а, б приведены температурные зависимости числа мод и их резонансных полей при перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$ относительно плоскости пленки. В образце №1 по мере увеличения температуры в интервале $20^{\circ}\text{C} < T < 175^{\circ}\text{C}$ количество СВ-мод остается неизменным, а затем, начиная с температуры $\sim 175^{\circ}\text{C}$ монотонно уменьшаться. Трансформация спектра СВР в образце №2 при возрастании температуры носит существенно иной характер, имея ярко выраженную особенность в интервале температур $(100 - 250^{\circ}\text{C})$. Видно, что в этом интервале происходит сначала уменьшение, а затем возрастание числа СВ-мод. Вблизи точки Кюри ($T_C = 283^{\circ}\text{C}$) СВ-моды перестают возбуждаться в обоих образцах.

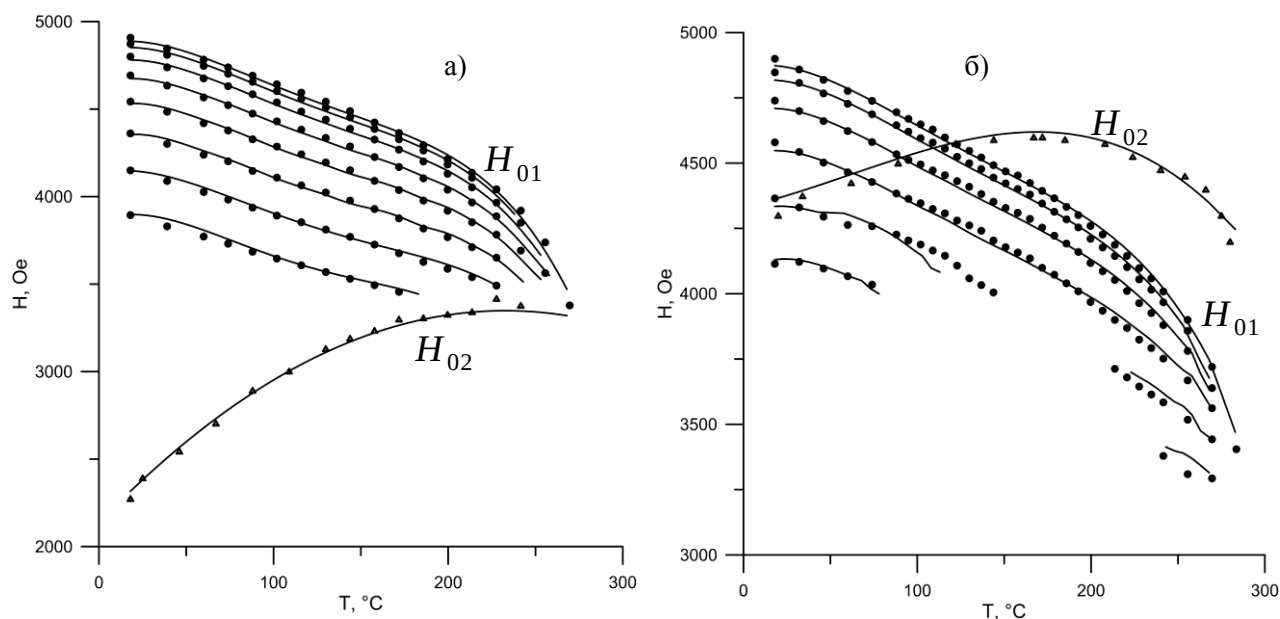


Рис. 1. Температурные зависимости числа возбуждаемых СВ-мод и их резонансных полей при перпендикулярной ориентации **H** относительно плоскости пленки: а) для образца № 1, б) для образца №2, значки – экспериментальные данные, линии – расчёт.

При параллельной ориентации (рис. 2 а, б) поведение спектров СВР с увеличением температуры носит иной характер. Как для одного, так и другого образцов количество возбуждаемых СВ-мод, с возрастанием температуры, вплоть до $\sim 230^{\circ}\text{C}$, не изменяется.

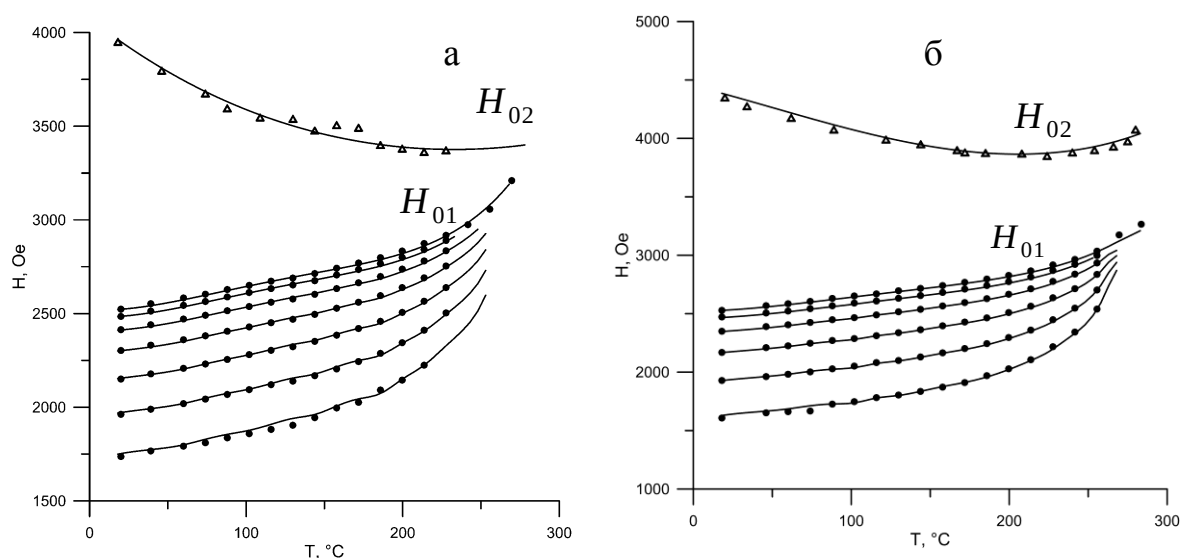


Рис. 2. Температурные зависимости числа возбуждаемых СВ-мод и их резонансных полей при параллельной ориентации **H** относительно плоскости пленки: а) для образца № 1, б) для образца №2, значки – экспериментальные данные, линии – расчёт.

Лишь вблизи точки Кюри происходит резкое уменьшение интенсивности пиков

поглощения одновременно всех СВ-мод и они перестают наблюдаться в спектре. Видно, что при параллельной ориентации, отсутствует та особенность, которая наблюдалась в образце №2 при перпендикулярной ориентации.

Поскольку температурные зависимости константы обменного взаимодействия A и намагниченности M имеют монотонный характер [6], наблюдаемые зависимости числа возбуждаемых СВ-мод, а, следовательно, и соответствующие зависимости степени закрепления спинов можно объяснить особенностями температурных зависимостей разности полей однородного резонанса в слоях исследуемых двухслойных пленок. Это обусловлено тем, что данный параметр как показано в [4] существенным образом влияет на степень закрепления спинов, а, следовательно, и на число возбуждаемых СВ-мод.

Большее число наблюдаемых мод в образце №1 при перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля относительно плоскости пленки связано с большей разностью $H_{01} - H_{02} \sim 2700 \text{ Oe}$, а, следовательно, с большей степенью закрепления спинов (в образце №2 $H_{01} - H_{02} \sim 900 \text{ Oe}$). С увеличением температуры, как видно из рис. 1а разность полей однородного резонанса в слоях $|H_{01} - H_{02}|$ в образце №1 монотонно уменьшается. В образце №2, $|H_{01} - H_{02}|$ также сначала уменьшается, а затем, начиная с температуры 160°C вновь начинает возрастать. Следовательно, происходит увеличение степени закрепления спинов и в спектре вновь начинают возбуждаться моды более высокого порядка.

Из рис. 1-2 видно, что проявляется четкая зависимость: с увеличением разности полей однородного резонанса, увеличивается число возбуждаемых СВ-мод. Причем эта зависимость проявляется как в случае, когда слой закрепления находится в состоянии реактивной среды $H_{01} < H_{02}$ так и дисперсивной $H_{01} > H_{02}$ [5].

Нами был проведен расчёт спектров СВР, возбуждаемых в двухслойных пленках. Движение намагниченности $\mathbf{M}$ в магнитной пленке при наличии затухания в спиновой системе описывали уравнением Ландау-Лифшица с релаксационным членом в форме Гильберта

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \frac{\alpha}{M} \left(\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение. Эффективное магнитное поле $\mathbf{H}_{eff}$ определялось выражением:

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_0 - \tilde{N}^{eff} \mathbf{M} + \frac{A}{M} \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial z^2} + \mathbf{h} \exp(i\omega t) \quad (2)$$

где $\mathbf{H}_0$ и $\mathbf{h}$ ($\mathbf{h} \perp \mathbf{H}_0, \mathbf{h} \ll \mathbf{H}_0$) – внешнее постоянное и высокочастотное поля, $\tilde{N}^{eff}$ – тензор эффективных размагничивающих факторов, A – константа обменного взаимодействия. Начало координат помещали на одной из поверхностей пленки, ось Z совпадала с нормалью к пленке. При расчетах использовались обменные граничные условия на межслойной и свободных поверхностях пленки [7].

Для случая малых колебаний $m \ll M_0$, $\mathbf{M}(z, t) = \mathbf{M}_0 + \mathbf{m}(z) \exp(i\omega t)$ из (1) получим линеаризованное уравнение движения намагниченности

$$\begin{aligned} i \frac{\omega}{\gamma} \mathbf{m} + \mathbf{m} \times (\mathbf{H}_{0z} - \tilde{N} \mathbf{M}_0) + (\tilde{N}^{eff} \times \mathbf{m}) \times \mathbf{M}_0 - \\ - \frac{2A}{M_0^2} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{m}}{\partial z^2} \times \mathbf{M}_0 \right) - i \frac{\alpha \omega}{\gamma M_0} (\mathbf{M}_0 \times \mathbf{m}) = -\mathbf{M}_0 \times \mathbf{h} \end{aligned} \quad (3)$$

где вектор $\mathbf{H}_{0z}$ – проекция вектора $\mathbf{H}_0$ на ось z .

Для двухслойной плёнки необходимо найти решения уравнения движения намагниченности (3) записанного для каждого из слоев и обменных граничных условий на свободных и межслойной границах двухслойной плёнки. Это позволяет найти усредненное по толщине плёнки значение переменной намагниченности, а, следовательно, и определить высокочастотную восприимчивость χ [8-10].

$$\langle \mathbf{m} \rangle = \frac{1}{d_1 + d_2} \left(\int_{-d_1}^0 \mathbf{m}_1(z) dz + \int_{0_1}^{d_2} \mathbf{m}_2(z) dz \right) = \hat{\chi} \mathbf{h}, \quad (4)$$

где $\hat{\chi}$ – тензор высокочастотной восприимчивости пленки, d_1 и d_2 толщины слоев.

Мощность высокочастотного поля (P) поглощаемая плёнкой определяется мнимой частью высокочастотной восприимчивости $\hat{\chi} = \hat{\chi}' - i\hat{\chi}''$. Если принять, что линейно-поляризованное поле $\mathbf{h}$ направлено вдоль оси X , то мощность P , а, следовательно, и амплитуда пиков поглощения $I \sim P$, будут определяться компонентой χ''_{xx} ($I \sim P \sim \chi''_{xx}$) [11]. При расчете спектра СВР использовались экспериментальные значения A , M , γ и α для соответствующего значения температуры [6].

На рис. 1 и 2 представлены расчётные зависимости резонансных полей СВ-мод (сплошные линии). Видно, что расчётные результаты хорошо согласуются с

экспериментом. На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные зависимости I от температуры, которые качественно согласуются между собой. Видно, что резкое уменьшение рассчитанных значений интенсивности пиков СВ-мод для образца №2 при перпендикулярной ориентации происходит примерно в том же интервале температур, в котором происходит уменьшение числа возбуждаемых СВ-мод.

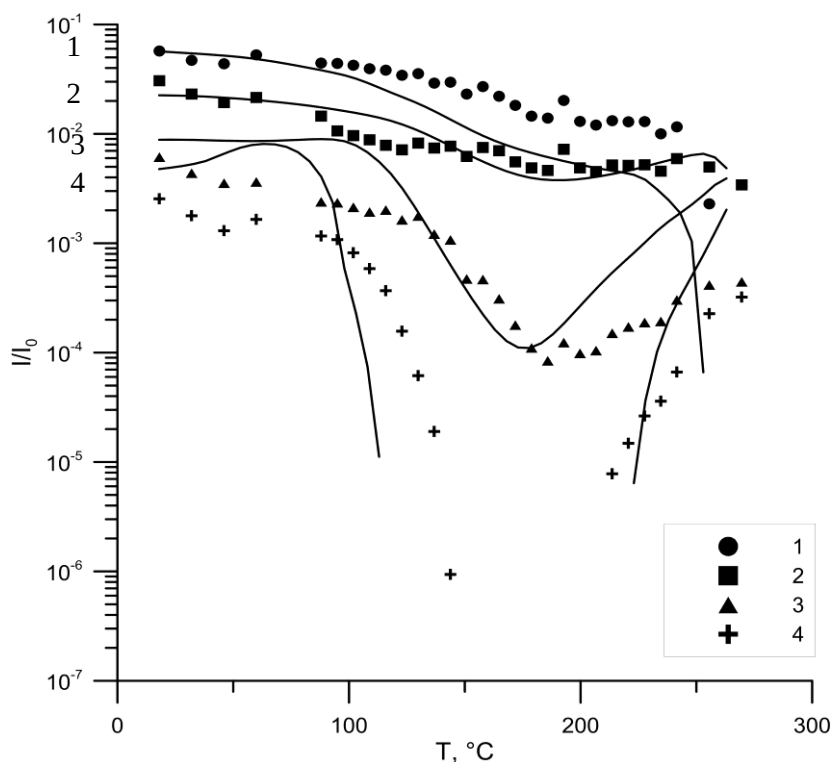


Рис. 3. Температурная зависимость относительной интенсивности (I/I_0) пиков 1-4-й СВ-мод при перпендикулярной ориентации для образца №2, значки – экспериментальные данные (цифры номера мод), линии – расчёт.

Таким образом, в настоящей работе показано, что особенности температурных зависимостей спектров СВР обусловлены вариациями степени закрепления спинов. Величина последней в исследованных пленках, кроме других факторов, определяется в большей степени разностью полей однородного резонанса в слоях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kajiwaru Y., Harii K., Takahashi S. et al. // Nature. – 2010. – V. 464. – pp. 262-266.
2. Uchida K., Xiao J., Adachi H. et al. // Nature Materials. – 2010. – V. 9. – pp. 894-897.
3. Зюзин А. М., Радайкин В. В., Ваньков В. Н. // Письма в журнал технической физики. – 1991. – Т. 17. № 23. – С. 65-69.
4. Зюзин А. М., Бакулин М. А., Радайкин В. В. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2010. – Т. 74. № 10. – С. 1491-1493.

5. Зюзин А. М., Сабаев С. Н., Куляпин А. В. // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. Вып. 12. – С. 2208-2214.
6. Зюзин А. М., Бажанов А. Г. // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т. 63. Вып. 7. – С. 528-532.
7. Kajiwara Y., Harii K., Takahashi S. et al. // Nature. – 2010. – V. 464. – pp. 262-266.
8. Uchida K., Xiao J., Adachi H. et al. // Nature Materials. – 2010. – V. 9. – pp. 894-897.
9. Зюзин А. М., Радайкин В. В., Ваньков В. Н. // Письма в журнал технической физики. – 1991. – Т. 17. № 23. – С. 65-69.
10. Зюзин А. М., Бакулин М. А., Радайкин В. В. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2010. – Т. 74. № 10. – С. 1491-1493.
11. Зюзин А. М., Сабаев С. Н., Куляпин А. В. // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. Вып. 12. – С. 2208-2214.
12. Зюзин А. М., Бажанов А. Г. // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т. 63. Вып. 7. – С. 528-532.
13. Зюзин А. М., Бажанов А. Г. // ЖЭТФ. – 1997. – Т. 111. Вып. 5. – С. 1667-1673.
14. Зюзин А. М., Бакулин М. А., Зюзин Д. А. и др. // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. Вып. 6. – С. 63-67.
15. Василевская Т. М., Семенцов Д. И. // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. Вып. 10. – С. 1824-1830.
16. Саланский Н. М., Ерухимов М. Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. – Новосибирск: Наука, 1975. – 224 с.
17. Зюзин А. М., Ваньков В. Н. // Физика твердого тела. – 1990. – Т. 32. №7. – С. 2015-2019.