

PACS: 73.20.-г

В.А. Шаповалов

## СПИН-ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС И ЕГО ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДА В ПЛЕНКЕ МАНГАНИТА

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2009 года

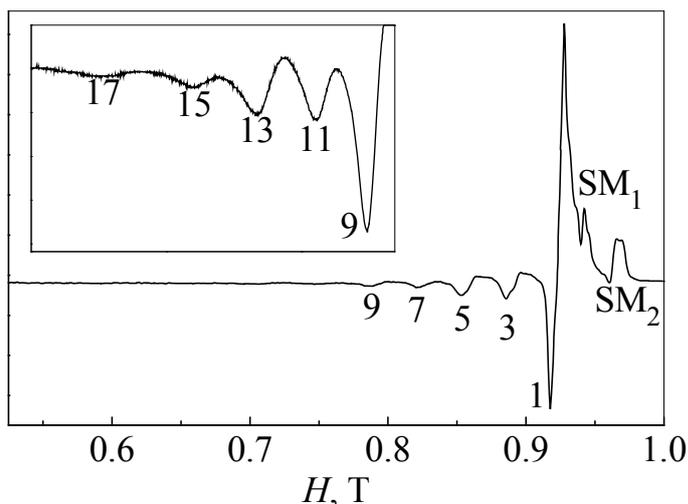
*Обнаружено, что спектр спин-волнового резонанса (СВР), как правило, содержит поверхностную моду, которая не зависит от проводимости материала пленки. Показано, что положение, интенсивность и форма этой моды трансформируются относительно однородной моды при изменении напряженного состояния пленки. По смещению резонансных полей под действием механического напряжения определены константы магнитострикции пленки и ее поверхностного слоя. Последний является более магниточувствительным по сравнению с объемом пленки, так как его константа магнитострикции  $\lambda_s$  больше константы магнитострикции пленки  $\lambda_f$ .*

**Ключевые слова:** спин-волновой резонанс, поверхностная мода, механическое напряжение, поверхностный слой, константа магнитострикции

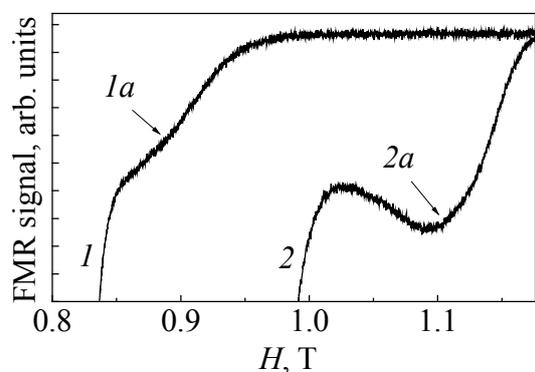
Спектр спин-волнового резонанса является характеристикой магнитной пленки. Вид и форма линий этого спектра зависят от параметров пленки. Если пленка является монокристаллической и обладает высоким сопротивлением, количество линий спектра СВР может достигать нескольких десятков (рис. 1). Линии спектра СВР в этом случае хорошо разрешены и имеют большую величину отношения сигнал-шум. Если исследуемые пленки манганитов обладают малым сопротивлением, линии спектра СВР весьма широки и их амплитуда довольно мала.

Спектры СВР в тонких монокристаллических магнитных пленках  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  были исследованы в интервале температур 4.2–300 К в магнитном поле от параллельной до перпендикулярной ориентации.

Как видно из рис. 1 [1], в случае перпендикулярной ориентации наблюдается СВР-спектр, состоящий из одиннадцати хорошо разрешенных линий. Две из них (на высокополевой стороне)  $\text{SM}_1$  и  $\text{SM}_2$  являются поверхностными модами, линия  $I$  – однородной модой, а все остальные линии – неоднородными модами. Поверхностные моды в спектрах СВР, теоретическое предсказание которых представлено в работах Н. Puzkarski [3–5], впервые экспериментально были обнаружены в пленке  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  [1].



**Рис. 1.** Спектр СВР в перпендикулярной ориентации в пленке  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  с высоким сопротивлением,  $T = 100$  К. На вставке показаны моды 9–17, увеличенные в 5 раз



**Рис. 2.** Влияние изгибных деформаций на спектр СВР в перпендикулярной ориентации в пленке  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  с низким сопротивлением при различных механических напряжениях:  $1$  – минимальное, радиус изгиба образца  $R_1 = 700$  мм,  $2$  – максимальное,  $R_2 = 200$  мм;  $1, 2$  – однородные моды,  $1a, 2a$  – поверхностные;  $T = 141$  К

Поверхностный характер мод  $\text{SM}_1$  и  $\text{SM}_2$  доказывают следующие экспериментальные факты:

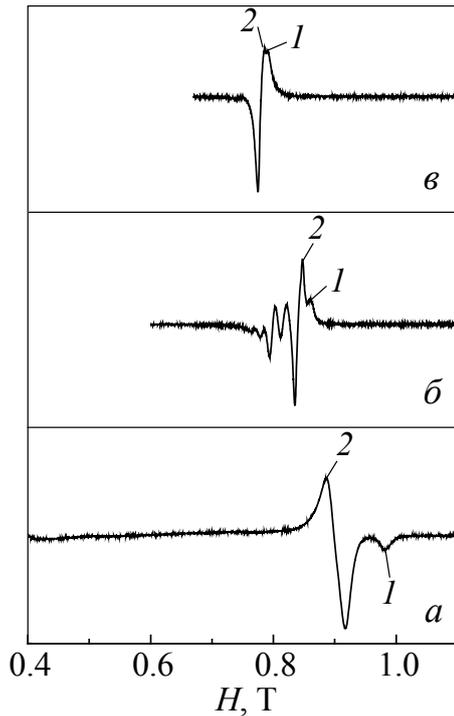
- их резонансные поля выше поля однородной моды;
- интенсивность их меньше, чем низкополевой моды с  $n = 1$ ;
- их угловая зависимость согласуется с предсказаниями модели для поверхностных мод [3–5].

В работе [2] показано влияние изгибных деформаций на поверхностную моду. Поведение однородной и поверхностной мод в зависимости от изгибной деформации для экстремальных случаев изгиба при  $T = 141$  К представлено на рис. 2. Параметры поверхностной

моды резко меняются при увеличении механического напряжения от минимального значения при радиусе изгиба образца  $R_1 = 700$  мм (линия 2) до максимального при  $R_2 = 200$  мм. Как видим, линия поверхностной моды при  $R_1 = 700$  мм практически не разрешена, а при  $R_2 = 200$  мм наблюдается многократное увеличение ее интенсивности из-за нелинейной формы градиента напряжений.

Исследованы спектры СВР в эпитаксиальных пленках  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенных на подложках ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ , алюмината лантана  $\text{LaAlO}_3$  и титаната стронция  $\text{SrTiO}_3$ , имеющих разные параметры решетки.

Монокристаллические перовскитовые подложки  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$  имеют кубическую структуру с параметром элементарной ячейки  $a$ , равным соответственно 3.788 и 3.903 Å. Параметры элементарных ячеек пленок  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ,



**Рис. 3.** Влияние линейных деформаций на спектры СВР в пленках  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенных на подложках  $\text{LiNbO}_3$  (*а*),  $\text{SrTiO}_3$  (*б*) и  $\text{LaAlO}_3$  (*в*), при перпендикулярной ориентации магнитного поля к пленке

$\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенных на подложках  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$  и  $\text{LaAlO}_3$ . Как видно из рисунка, в спектрах СВР наблюдаются однородная мода (линия 2) и поверхностная (линия 1). Пленка, выращенная на подложке  $\text{LiNbO}_3$ , не напряжена, и расстояние между линиями 1 и 2 является максимальным (82 мТ). В случае подложки  $\text{SrTiO}_3$  пленка напряжена и это расстояние уменьшается до величины 41 мТ, а в более напряженной пленке на подложке  $\text{LaAlO}_3$  оно уменьшается настолько, что линии 1 и 2 практически совпадают.

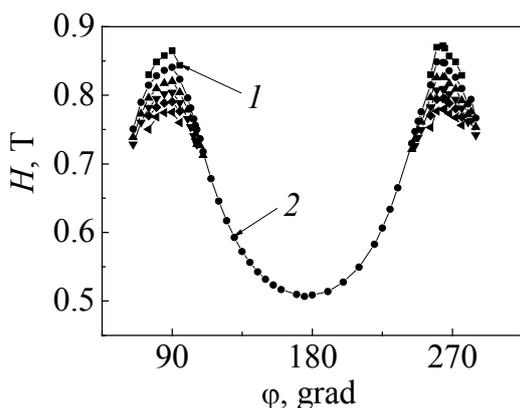
Таким образом, в пленках, выращенных на различных подложках, поверхностные моды находятся на различном расстоянии от линии однородного резонанса спектра СВР. Это расстояние уменьшается в результате увеличения напряженного состояния пленок.

На рис. 4 показана угловая зависимость положения резонансных линий спектра СВР в пленке  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенной на подложке  $\text{SrTiO}_3$ . Как видно из рис. 3, *б* и 4, для перпендикулярной ориентации магнитного поля ( $\varphi = 90^\circ$ ) спектр СВР состоит из 6 линий. При отклонении пленки от перпендикулярной ориентации на угол более  $6^\circ$  линия однородного резонанса и поверхностная мода сливаются. Следует отметить, что различие спектров (см. рис. 3) в пленках на разных подложках обусловлено

нанесенных на подложки  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$  составляют соответственно, Å:  $a = b = 3.862$ ;  $c = 3.872$  и  $a = b = 3.868$ ;  $c = 3.859$ . Поэтому в пленке, выращенной на подложке  $\text{SrTiO}_3$ , возникают напряжения сжатия, а на  $\text{LaAlO}_3$  – напряжения растяжения. Распределение напряжений по толщине в полученных пленках носит линейный градиентный характер и обусловлен тем, что, с одной стороны, пленка примыкает к подложке, а с другой – ее поверхность свободна.

Исследования проводили в условиях упругой деформации пленок. Упругий характер напряжений обеспечивается тем, что различие параметров кристаллических решеток пленок и подложек невелико. Для подложек  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$  эта разность составляет соответственно 0.084 и 0.044 Å.

Изучены особенности поверхностной моды, обусловленные различием параметров элементарных кристаллических ячеек подложек и пленок. На рис. 3 представлен спектр СВР в пленках



**Рис. 4.** Угловая зависимость положения резонансных линий спектра СВР в пленке  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенной на подложке  $\text{SrTiO}_3$

различием величины проводимости, которая максимальна в случае  $\text{LiNbO}_3$ . Поэтому спектр СВР в пленке, выращенной на подложке  $\text{LiNbO}_3$ , визуально отсутствует, а в пленке на подложке  $\text{SrTiO}_3$  хорошо разрешен.

Величину напряжения  $\sigma$  в пленке рассчитывали по разности параметров элементарных ячеек подложки и пленки в направлении, перпендикулярном плоскости пленки [7]:

$$\sigma = \frac{E(a_0 - a)}{2\nu a_0} = 6.17 \cdot 10^{10} \text{ dyn/cm}^2, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга [6] подложки  $3.03 \cdot 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$ ;  $a_0 = 3.903 \text{ \AA}$  и  $a = 3.859 \text{ \AA}$  – постоянные решетки соответственно для подложки и пленки;  $\nu = 0.276$  – коэффициент Пуассона.

Для определения константы магнитострикции пленки  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенной на подложке  $\text{SrTiO}_3$ , использовали величину смещения линии 2 под действием напряжений. В результате магнитострикции напряжение  $\sigma = 0.0617 \cdot 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$  приводило к смещению резонансного поля пленки  $H_f$  на величину  $\Delta H_1 = 60 \text{ мТ}$ . Используя  $\Delta H_1$ , оценивали величину константы магнитострикции пленки  $\lambda_f$ :

$$\lambda_f = \Delta H_1 M_s / 3\sigma = -0.956 \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $M_s = 300 \text{ Гс}$  – намагниченность насыщения.

Константу магнитострикции поверхностного слоя  $\lambda_s$  пленки  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ , выращенной на подложке  $\text{SrTiO}_3$ , определяли по величине смещения резонансного поля поверхностной моды относительно линии однородного резонанса  $\Delta H_2 = 101 \text{ мТ}$  под действием напряжений:  $\lambda_s = -1.64 \cdot 10^{-6}$ .

Таким образом, константа  $\lambda_s$  больше константы  $\lambda_f$  в 1.7 раза.

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что форма, интенсивность и положение поверхностной моды СВР относительно однородной моды зависят от напряженного состояния поверхностного слоя пленки. Характер этого состояния обусловлен напряжениями, возникающими на границе пленка–подложка, и градиентом напряжений по толщине пленки.

Величина механического напряжения пленки определяется разностью параметров элементарных ячеек подложки и пленки. В случае подложки  $\text{SrTiO}_3$  в переходном слое возникают напряжения растяжения. В результате присутствия такого напряжения в плоскости пленки появляется напряжение сжатия, перпендикулярное к ее поверхности. Величина напряжения макси-

мальна в переходному шарі і зменшується по напрямленню до поверхні, де стає мінімальною.

Константа магнітострикції плівки  $\lambda_f$  менше константи магнітострикції її поверхнового шару  $\lambda_s$ , по-видимому, тому, що кристалічна структура поверхнового шару плівки відрізняється від кристалічної структури всього об'єму плівки, так як, з однієї сторони, поверхновий шар примикає до об'єму плівки, а з іншої – він є межею матеріалу. Іншими словами, поверхновий шар плівки по порівнянню з її об'ємом є більш магніточутливим.

В залежності від величини і характеру напруженого стану поверхнового шару плівки поверхнова мода СВР трансформується відносно однорідною. Результати досліджень свідчать про те, що спектр СВР містить поверхнову моду. На її положення, інтенсивність і форму відносно однорідної моди СВР не впливає провідність матеріалу плівки. Інтенсивність поверхнової моди суттєво залежить від форми градієнта напружень і величини закріплення спинов в поверхновому шарі (див. рис. 2 і 3).

1. *V.P. Dyakonov, A. Prokhorov, V. Shapovalov, V. Krivoruchko, V. Pashchenko, E. Zubov, V. Mikhajlov, P. Aleshkevich, M. Berkowski, S. Piechota, H. Szymczak, J. Phys.: Condens. Matter* **13**, 4049 (2001).
2. *H. Puzkarski, Prog. Surf. Sci.* **9**, 191 (1979).
3. *H. Puzkarski, Acta Phys. Pol.* **A38**, 217 (1970).
4. *H. Puzkarski, Acta Phys. Pol.* **A38**, 899 (1970).
5. *Ю.С. Кузьминов, Ниобат и танталат лития, Наука, Москва (1975).*
6. *Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.А. Ганьшина, А.П. Кауль, О.Ю. Горбенко, Е.В. Мостовицкова, А.В. Телегин, А.Н. Виноградов, И.К. Родин, ФТТ* **46**, 1203 (2004).
7. *A. Kinbara, H. Hara, J. Appl. Phys. Jpn.* **4**, 243 (1965).
8. *А.М. Гришин, В.Ф. Дроботько, Н.Н. Усов, В.А. Шаповалов, ЖТФ* **8**, 97 (1989).

*В.А. Шаповалов*

## СПИН-ХВИЛЬОВИЙ РЕЗОНАНС І ЙОГО ПОВЕРХНЕВА МОДА В ПЛІВЦІ МАНГАНІТУ

Виявлено, що спектр спин-хвильового резонансу (СХР), як правило, містить поверхнову моду, що не залежить від провідності матеріалу плівки. Показано, що положення, інтенсивність і форма цієї моди трансформуються щодо однорідної моди при зміні напруженого стану плівки. По звуку резонансних полів під дією механічної напруги визначено константи магнітострикції плівки і поверхневого шару. Останній є більш магніточутливим у порівнянні з об'ємом плівки, тому що його константа магнітострикції  $\lambda_s$  більше константи магнітострикції плівки  $\lambda_f$ .

**Ключові слова:** спин-хвильовий резонанс, поверхнева мода, механічна напруга, поверхневий шар, константа магнітострикції

V.A. Shapovalov

## SPIN-WAVE RESONANCE AND SURFACE MODE IN MANGANITE FILM

It has been determined that the spin-wave resonance (SWR) spectrum contains, as a rule, the surface mode which does not depend on conduction of film material. It is shown that the position, the intensity and the shape of this mode are transformed with respect to the uniform mode due to changes in the stressed state of the film. Constants of the film and surface layer magnetostriction have been determined by the displacement of resonance fields under the action of mechanical stress. The surface layer is more sensitive to magnetism than volume of the film since its magnetostriction constant  $\lambda_s$  is larger than that of the film  $\lambda_f$ .

**Keywords:** spin-wave resonance, surface mode, mechanical stress, surface layer, magnetostriction constant

**Fig. 1.** SWR spectrum in perpendicular orientation for film  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  with high resistance,  $T = 100$  K. The insert shows modes 9–17,  $\times 5$

**Fig. 2.** Influence of bending deformation on SWR spectrum in perpendicular orientation for film  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  with low resistance for different mechanical stresses: 1 – minimal, radius of sample bending  $R_1 = 700$  mm, 2 – maximal,  $R_2 = 200$  mm; 1, 2 – uniform modes, 1a, 2a – surface;  $T = 141$  K

**Fig. 3.** Influence of linear deformation on SWR spectra in films  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  grown on  $\text{LiNbO}_3$  (a),  $\text{SrTiO}_3$  (b) and  $\text{LaAlO}_3$  (c) substrates under the magnetic-field perpendicular orientation to the film

**Fig. 4.** Angular dependence of SWR spectral lines position in film  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  grown on  $\text{SrTiO}_3$  substrate