

05;06;11

## Ферромагнитный резонанс в эпитаксиальных пленках $(\text{Bi,Tm})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210)

© В.В. Рандошкин, В.И. Козлов, Ю.А. Кокшаров, А.М. Салецкий, Н.Н. Сысоев, Н.Н. Усманов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия  
e-mail: sam@rector.msu.ru

(Поступило в Редакцию 7 марта 2006 г. В окончательной редакции 23 августа 2006 г.)

Исследован ферромагнитный резонанс (ФМР) в эпитаксиальных пленках  $(\text{Bi,Tm})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных на подложках  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (210). Спектр ФМР содержит один пик. Азимутальная и полярная зависимости резонансного поля обладают  $180^\circ$ -ной симметрией. Изучены угловые зависимости ширины и интенсивности линии ФМР.

PACS: 76.50.+g

Для объемных монокристаллов  $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , выращенных из раствора-расплава на основе  $\text{PbO}$ , с помощью метода ферромагнитного резонанса (ФМР) при комнатной температуре было получено относительное эффективное значение гиромагнитного отношения  $\gamma/\gamma_0 = 0.815$ , где  $\gamma_0 = 1.76 \cdot 10^7 \text{ Oe}^{-1}\text{s}^{-1}$  — гиромагнитное отношение ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , а ширина линии ФМР составляла  $2\Delta H = 135 \text{ Oe}$  [1].

Для монокристаллических пленок  $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на основе  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$  на подложках  $\text{Ca}_3(\text{Nb,Ga,Gd})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (111), в спектре перпендикулярного резонанса (внешнее магнитное поле ориентировано по нормали к плоскости пленки) наблюдались две далеко отстоящие друг от друга линии ФМР [2]. Менее интенсивную линию (низкополевую) связывают с наличием в эпитаксиальной пленке  $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  переходного поверхностного слоя пленка/подложка. Появление этого слоя, по-видимому, обусловлено значительным замещением железа галлием, а туллия гадолинием, диффундирующими из подложки. Для основного объема пленки было получено значение  $\gamma/\gamma_0 = 0.055$ , а для переходного поверхностного слоя —  $\gamma/\gamma_0 > 2$ .

В эпитаксиальных пленках  $(\text{Bi,Gd,Tm})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных на подложках  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (ГГГ — гранат-гадолиний-галлий) с ориентацией (111), эффективное значение гиромагнитного отношения и ширина линии ФМР резко возрастают при приближении к точке компенсации момента импульса [3].

Целью настоящей работы являлось исследование ФМР в эпитаксиальных пленках  $(\text{Bi,Tm})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных на подложках ГГГ с ориентацией (210). Эти пленки являются одним из наиболее перспективных материалов для визуализации пространственно неоднородных магнитных полей и связанных с этим приложений [4–7].

Измерения проводили с помощью спектрометра E-4 фирмы „Varian“ на частоте  $f = 9.54 \text{ GHz}$ . Ориентацию

внешнего магнитного поля описывали азимутальным  $\varphi$  и полярным  $\theta$  углами, причем угол  $\theta$  отсчитывали от нормали к плоскости пленки.

В работе приводятся результаты исследования образца со следующими параметрами: толщина  $h = 7.1 \mu\text{m}$ , равновесная ширина полосовых доменов  $w = 3.6 \mu\text{m}$ , поле насыщения по нормали к плоскости пленки  $H_s = 230 \text{ Oe}$ .

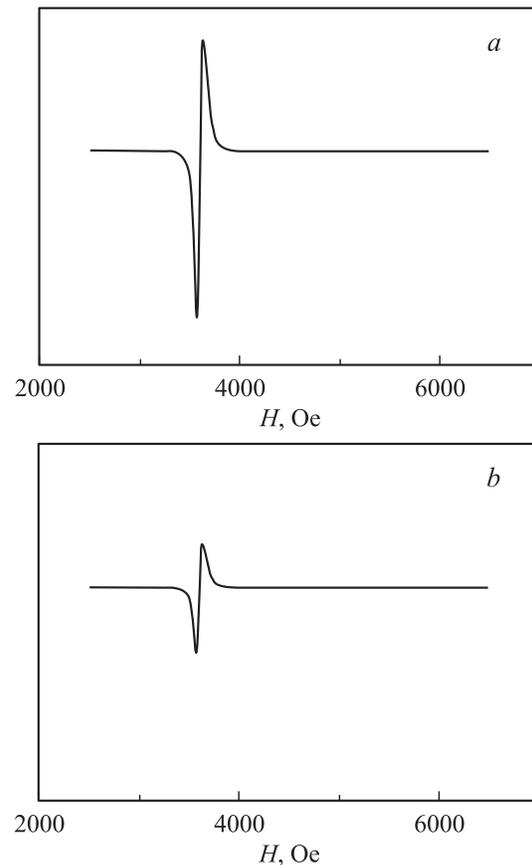


Рис. 1. Спектры параллельного резонанса ( $\theta = 90^\circ$ ) при различных азимутальных углах:  $a = 30^\circ$ ;  $b = 210^\circ$ .

На рис. 1 показаны спектры ФМР, наблюдающиеся при параллельном резонансе ( $\theta = 90^\circ$ ) при направлениях внешнего магнитного поля, различающихся на  $180^\circ$ . Из рис. 1 видно, что в отличие от Lu-содержащих пленок с ориентацией (210) [8], спектр ФМР исследуемых пленок содержит только одну линию, а амплитуды линий на рис. 1, *a, b* различаются. Между тем резонансные поля для этих линий и их ширина практически совпадают.

Наличие только одной линии в спектре ФМР, однако, не означает, что в исследуемых Tm-содержащих пленках не формируется переходный поверхностный слой. Скорее всего, из-за различия магнитных моментов подрешеток для основного объема пленки и переходного поверхностного слоя значения  $\gamma$  для них сильно различаются. При высоком  $\gamma$  в переходном поверхностном слое резонансное поле выходит за пределы развертки спектрометра, линия ФМР сильно уширяется, а интенсивность линии снижается до уровня шума.

Азимутальные зависимости резонансного поля для исследуемых Tm-содержащих пленок, как и для Lu-содержащих пленок с ориентацией (210) [8], обладают  $180^\circ$ -ной симметрией (рис. 2). Видно, что резонансное поле в зависимости от  $\varphi$  изменяется от  $H_{\min} \cong 3130$  до  $H_{\max} \cong 3630$  Ое, т. е. магнитная анизотропия в плоскости пленки не слишком велика. Заметим, что на рис. 2 приведены данные как для  $\theta = 90^\circ$ , так и для  $270^\circ$ .

При изменении полярного угла  $\theta$  в плоскостях, перпендикулярных плоскости пленки при разных  $\varphi$ , формы линий ФМР и диапазоны магнитных полей, которые они занимают, для  $\theta$  и  $\theta + 180^\circ$  не отличаются.

При варьировании полярного угла резонансное поле (рис. 3) изменяется сильнее, чем при варьировании азимутального угла (рис. 2). Другими словами, исследуемые Tm-содержащие пленки обладают достаточно сильной магнитной анизотропией типа „легкая плоскость“. Резонансное поле при перпендикулярном резонансе (рис. 3) составляет  $H_{\perp} \cong 5980$  Ое.

Поскольку магнитная анизотропия в плоскости исследуемых Tm-содержащих пленок невелика (рис. 2), то для оценки поля магнитной анизотропии  $H_K$  и эффективного значения гиромагнитного отношения можно использо-

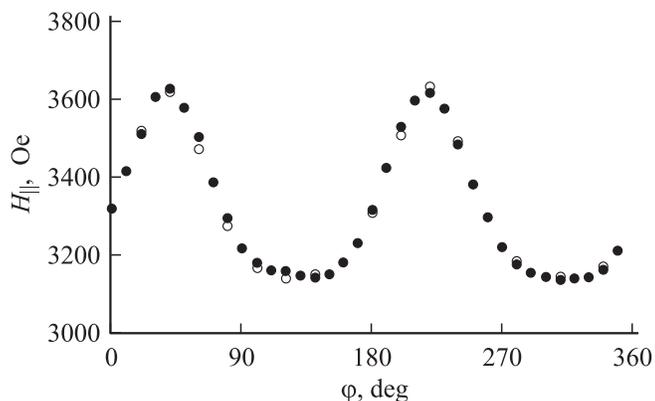


Рис. 2. Азимутальные зависимости резонансного поля  $H_{\parallel}(\varphi)$  при параллельном резонансе для  $\theta = 90^\circ$  ( $\circ$ ) и  $270^\circ$  ( $\bullet$ ).

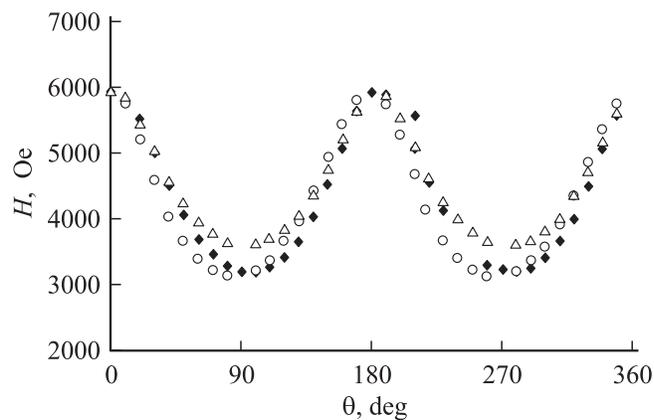


Рис. 3. Полярные зависимости резонансных полей для  $\varphi = 40^\circ$  ( $\circ$ ),  $85^\circ$  ( $\blacklozenge$ ),  $310^\circ$  ( $\triangle$ ).

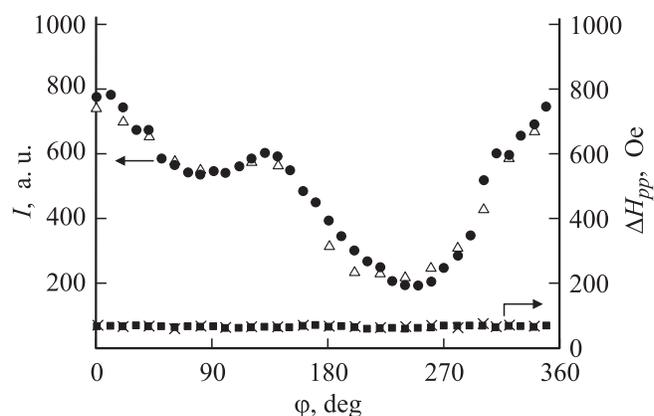


Рис. 4. Азимутальные зависимости интенсивности линии ФМР  $I(\varphi)$  при параллельном резонансе для  $\theta = 90^\circ$  ( $\triangle$ ) и  $270^\circ$  ( $\bullet$ ). Азимутальные зависимости ширины линии ФМР  $\Delta H_{pp}(\varphi)$  при параллельном резонансе для  $\theta = 90^\circ$  ( $\times$ ) и  $270^\circ$  ( $\blacksquare$ ).

вать следующие резонансные соотношения [9–11]:

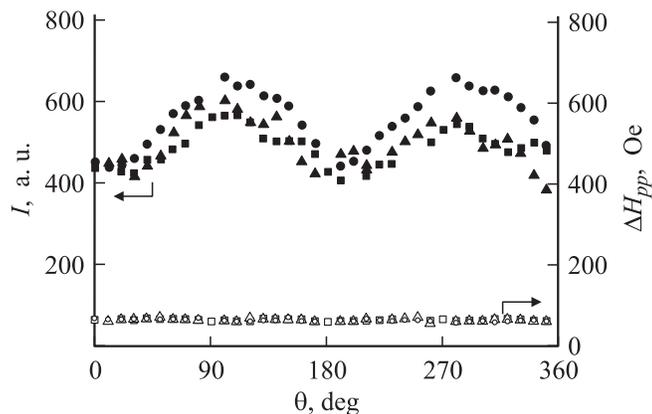
$$2\pi f / \gamma = H_{\perp} + H_{K\text{eff}}, \quad (1)$$

$$(2\pi f / \gamma)^2 = H_{\parallel}(H_{\parallel} - H_{K\text{eff}}),$$

где  $H_{K\text{eff}}$  — эффективное поле магнитной анизотропии,  $H_{\parallel}$  — резонансное поле при параллельном резонансе. Подставив в соотношения (1) и (2) значения  $f$ ,  $H_{\perp}$ ,  $H_{\parallel} = H_{\min}$  и  $H_{\parallel} = H_{\max}$ , получим  $\gamma = (1.37 - 1.50) \cdot 10^7$  Ое $^{-1}$ с $^{-1}$ .

Ширину линии ФМР  $\Delta H_{pp}$  определяли, измеряя разность значений резонансного поля, соответствующих экстремумам производной кривой поглощения.

В исследуемых Tm-содержащих пленках ширина линии ФМР практически не изменяется при варьировании как азимутального (рис. 4), так и полярного (рис. 5) углов и составляет  $\Delta H_{pp} \cong 65$  Ое.



**Рис. 5.** Полярные зависимости интенсивности линии ФМР  $I(\theta)$  для  $\varphi = 40^\circ$  (●),  $85^\circ$  (■) и  $310^\circ$  (▲). Полярные зависимости ширины линии ФМР  $\Delta H_{pp}(\theta)$  для  $\varphi = 40^\circ$  (○),  $85^\circ$  (□) и  $310^\circ$  (△).

В отличие от  $\Delta H_{pp}$ , интенсивность линии ФМР  $I$  изменяется при варьировании углов  $\varphi$  (рис. 4) и  $\theta$  (рис. 5). В частности, при варьировании азимутального угла интенсивность линии ФМР изменяется примерно в 4 раза (рис. 4), причем кривая  $I(\varphi)$  не обладает  $180^\circ$ -ной симметрией.

Таким образом, исследование ФМР в эпитаксиальных пленках феррита-граната  $(\text{Bi,Tm})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных на подложках ГГГ с ориентацией (210) показало, что:

- спектр ФМР содержит только одну линию ФМР, ширина которой практически не зависит от ориентации внешнего магнитного поля;
- пленки обладают магнитной анизотропией типа „легкая плоскость“;
- азимутальная и полярные зависимости резонансных полей обладают  $180^\circ$ -ной симметрией;
- интенсивность линии ФМР зависит от ориентации внешнего магнитного поля.

## Список литературы

- [1] Takeushi H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1975. Vol. 14. P. 1903.
- [2] Рандошкин В.В., Козлов В.И., Мочар В.Ю. и др. // Физическая мысль России. 1999. № 1/2. С. 28.
- [3] Логинов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 10. С. 58.
- [4] Рандошкин В.В., Гусев М.Ю., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. // Контроль и диагностика. 2000. № 3. С. 26.
- [5] Рандошкин В.В., Гусев М.Ю., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. // Дефектоскопия. 2000. № 6. С. 46.
- [6] Рандошкин В.В., Гусев М.Ю., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. // Заводская лаборатория (Диагностика материалов). 2000. Т. 66. № 9. С. 33.
- [7] Рандошкин В.В., Гусев М.Ю., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 118.
- [8] Randoshkin V.V., Vasil'eva N.V., Gusev M.Yu. et al. // Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. Obninsk, 2003. N 2. С. 430.

- [9] Gangulee K., Kobliska R.J. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 6. P. 3333.
- [10] Рандошкин В.В., Старостин Ю.В. // Радиоэлектроника за рубежом. 1982. № 18. С. 1.
- [11] Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник / Под ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.