

05;06;12

## Магнитная анизотропия пленок (Gd, Bi)<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> с ориентацией (100) и (110)

© В.В. Рандошкин, В.И. Козлов, В.Ю. Мочар, Н.В. Васильева, В.В. Воронов

Совместная хозрасчетная лаборатория "Магнитооптоэлектроника" Института общей физики РАН при Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева, 430000 Саранск, Россия

(Поступило в Редакцию 28 мая 1996 г.)

Один из путей повышения быстродействия магнитооптических устройств на базе висмутосодержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов состоит в использовании пленок с ромбической магнитной анизотропией [1–5]. Такая магнитная анизотропия, в частности, имеет место, если в состав пленок с ориентацией, отличной от (111), вместе с ионами Bi<sup>3+</sup> входят ионы Y<sup>3+</sup> [2, 6–9]. Ромбическая анизотропия обнаружена также в пленках, содержащих дополнительно ионы Gd<sup>3+</sup> [10,11]. Однако остается неясным, вносят ли ионы Gd<sup>3+</sup> вклад в анизотропию или же она полностью определяется парой ионов Bi<sup>3+</sup> и Y<sup>3+</sup>. Поиску ответа на этот вопрос и посвящена настоящая работа.

Пленки состава Bi<sub>x</sub>Gd<sub>3-x</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> выращивали методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на основе PbO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на подложках Nd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> с ориентацией, близкой к (100) и (110). Кристаллографическую ориентацию (угол  $\theta$  отклонение их плоскости от базисной) контролировали на дифрактометре ДРОН-2.0 с точностью 0.1°.

Рассогласование параметров решеток пленки и подложки  $\delta a/a$  определяли стандартным методом по кривым качания, измеренным на двукристалльном рентгеновском спектрометре. Спектрометр был собран на базе дифрактометра ДРОН-3М и блока монохроматора с использованием совершенного кристалла Ge и отражения (333). Для идентификации пиков от пленки и подложки записывали кривые качания для двух порядков отражений и сравнивали соотношения интенсивностей пиков.

Для исследованных пленок наблюдается только один практически не искаженный дифракционный пик. Расчет линейного коэффициента поглощения для пленок состава Bi<sub>x</sub>Gd<sub>3-x</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> при  $0,5 < x < 1$  дает значение линейного коэффициента поглощения  $\mu \approx 1500 \text{ см}^{-1}$  для излучения Cu K $\alpha$ . Оценку максимальной толщины пленки  $h_{\text{max}}$ , позволяющей проводить запись кривых качания от пленки и подложки, проводили по формуле [12–14]

$$h_{\text{max}} = k(\sin \theta)/(2\mu), \quad (1)$$

где  $k = 4.61$  для случая, когда доля интенсивности излучения рассеянного излучения от пленки составляет 99%; для этого случая  $h_{\text{max}} \approx 7 \text{ мкм}$ .

Отсутствие второго пика можно трактовать как малую величину рассогласования, не позволяющую разрешить

пики пленки и подложки. Верхний предел этого рассогласования можно оценить, приняв его равным половине полуширины наблюдаемой кривой качания  $\Delta\theta = 20''$ , что дает  $\delta a/a \approx 8 \cdot 10^{-5}$ . Значения  $\theta$  и  $\delta a/a$  приведены в таблице. Учитывая отсутствие рассогласования параметров решеток пленки и подложки по данным табл. 9.4 в [12], определили, что  $x = 0.78$ .

Для оценки намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  исследованных пленок использовали данные табл. 9.3 в [15]. Полагали, что в системе Bi<sub>x</sub>Gd<sub>3-x</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> намагниченность насыщения увеличивается с ростом  $x$  по линейному закону от значения, соответствующего Gd<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, до значения, соответствующего гипотетическому гранату Bi<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. Намагниченность насыщения для последнего считали такой же, как у Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. Оценка дает  $4\pi M_s = 500 \text{ Гс}$ .

Параметры магнитной анизотропии исследовали методом ферромагнитного резонанса на частоте 9.34 ГГц. При этом регистрировали резонансные поля при ориентации внешнего магнитного поля перпендикулярно ( $H_n$ , перпендикулярный резонанс) и параллельно ( $H_m$ , параллельный резонанс) плоскости пленки, а также соответствующие значения ширины линии резонанса  $2\Delta H_n$  и  $2\Delta H_m$ . Для определения анизотропии в плоскости пленки регистрировали азимутальные зависимости  $H_m(\varphi)$  при параллельном резонансе. Результаты измерений приведены в таблице, где  $H_{m \text{ min}}$  и  $H_{m \text{ max}}$  — минимальное и максимальное значения резонансного поля при параллельном резонансе соответственно,  $\delta H_m$  — разность этих значений.

Результаты рентгеновских и резонансных измерений для пленок (Gd, Bi)<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>

Ориентация	(100)	(110)
$\theta, \text{ grad}$	2.3	1.6
$\delta a/a \cdot 10^4$	< 0.8	< 0.8
$H_{m \text{ min}}, \text{ Oe}$	3130	2240
$H_{m \text{ max}}, \text{ Oe}$	3490	3330
$\delta H_{m \text{ min}}, \text{ Oe}$	360	1090
$2\Delta H_{m \text{ min}}, \text{ Oe}$	170	70
$H_n, \text{ Oe}$	3390	4300
$2\Delta H_n, \text{ Oe}$	170	70
$H_{\text{eff}}, \text{ Oe}$	-207	-870

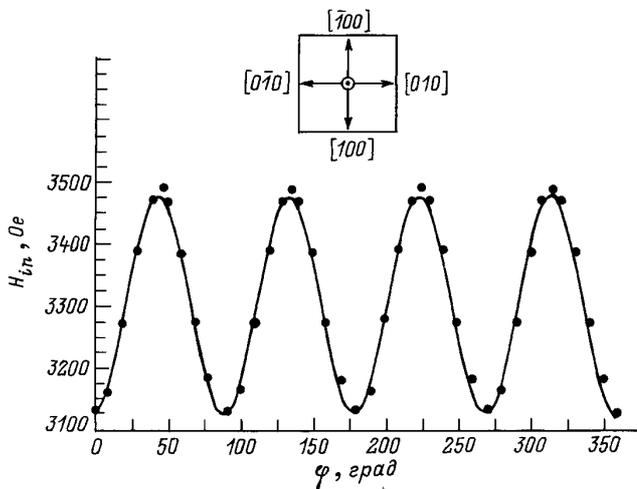


Рис. 1. Азимутальная зависимость  $H_{in}(\varphi)$  резонансного поля при параллельном резонансе для пленок с ориентацией (100).

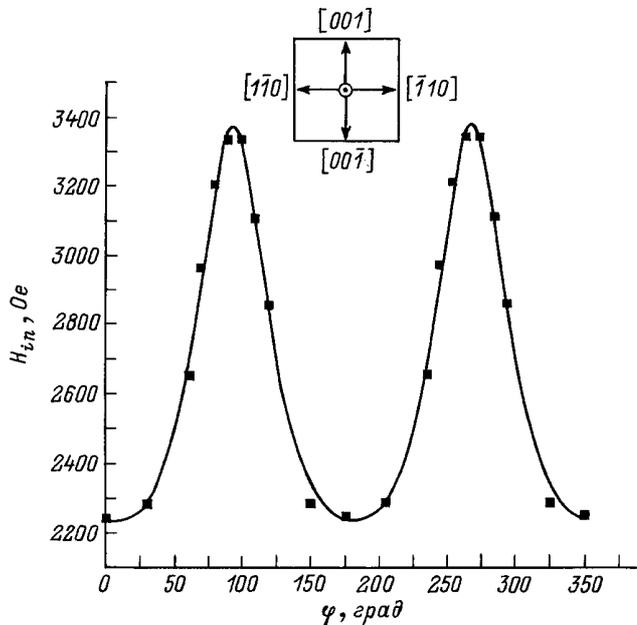


Рис. 2. Азимутальная зависимость  $H_{in}(\varphi)$  резонансного поля при параллельном резонансе для пленок с ориентацией (110).

Поскольку исследуемые пленки не содержат быстро-релаксирующих магнитных ионов, а гиромангнитное отношение медленнорелаксирующих ионов  $Gd^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  одинаково и составляет  $\gamma_0 = 1.76 \cdot 10^7 \text{ Oe}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ , то и для феррит-граната в соответствии с формулой Уангссенса [1,16]

$$\gamma = (M_{Gd} + M_{Fe}) / (M_{Gd} / \gamma_{Gd} + M_{Fe} / \gamma_{Fe}), \quad (2)$$

эффективное значение гиромангнитного отношения  $\gamma$  равно  $\gamma_0$ . Здесь  $M_{Gd}$  — суммарный магнитный момент ионов  $Gd^{3+}$  в додекаэдрической подрешетке структуры граната,  $M_{Fe}$  — суммарный магнитный момент ионов

$Fe^{3+}$  в тетра- и октаэдрической подрешетках. Это обстоятельство позволяет в отличие от [17,18] определить эффективное поле магнитной анизотропии  $H_{eff}$  только по данным перпендикулярного резонанса, для которого резонансное соотношение можно записать как

$$\omega / \gamma = H_{eff} + H_n, \quad (3)$$

где  $\omega$  — круговая частота ферромагнитного резонанса.

Тот факт, что ионы  $Gd^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  в динамике ведут себя одинаково, подтверждается результатами исследований вблизи точки компенсации момента импульса [5,18,19]. В частности, при введении ионов  $Gd^{3+}$  в состав пленки уровень замещения железа немагнитными ионами, необходимый для обеспечения компенсации момента импульса, снижается. Значения  $H_{eff}$  приведены в таблице.

Типичные зависимости  $H_{in}(\varphi)$  для пленок с ориентацией (100) и (110) приведены на рис. 1 и 2 соответственно, где на вставках показано расположение кристаллографических осей в плоскости пленки. Видно, что для пленок с ориентацией (100) наличие четырех эквидистантных максимумов на кривой  $H_{in}(\varphi)$  (рис. 1) отражает кристаллографическую анизотропию пленки, а их положение соответствует осям типа (100). При этом значение  $\delta H_{in}$  относительно невелико (см. таблицу).

В пленках с ориентацией (110) по сравнению с ориентацией (100) магнитная анизотропия в плоскости пленки выше более чем в 3 раза (ср. значения  $\delta H_{in}$  в таблице). При этом на азимутальной зависимости резонансного поля при параллельном резонансе (рис. 2) наблюдается только два пика, что характерно для пленок с ромбической магнитной анизотропией.

Сравнение приведенной выше оценки  $4\pi M_s$  и приведенных в таблице значений  $H_{eff}$  позволяет заключить, что основной вклад в эффективное поле магнитной анизотропии вносят поля размагничивания.

Таким образом, в настоящей работе показано, что в пленках феррит-гранатов с ориентацией (110), содержащих в додекаэдрической подрешетке только ионы  $Gd^{3+}$  и  $Vi^{3+}$ , в процессе эпитаксиального роста наводится ромбическая магнитная анизотропия.

## Список литературы

- [1] Рандошкин В.В., Червоненкис А.А. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- [2] Рандошкин В.В., Чани В.И., Логунов М.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 14. С. 42–44.
- [3] Randoshkin V.V. // Proc. SPIE. 1990. Vol. 1307. P. 10–19.
- [4] Randoshkin V.V. // Proc. SPIE. 1991. Vol. 1469. P. 796–803.
- [5] Рандошкин В.В. Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. Тр. ИОФАН. Т. 35. М.: Наука, 1992. С. 49–107.
- [6] Hibiya T., Makino H., Konishi S. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N12. P. 7347–7352.
- [7] Kikukawa S., Isomura S., Iwata S. // J. Appl. Soc. Jap. 1983. Vol. 7. N2. P. 83–86.
- [8] Рандошкин В.В., Сигачев В.Б., Чани В.И., Червоненкис А.А. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 7. С. 70–76.

- [9] Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н. // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 5. С. 1456–1460.
- [10] Natamoto M., Iwata S., Kikukawa S. // IEEE Trans. Magn. 1984. Vol. MAG-20. N5. P. 1105–1107.
- [11] Кукушкина И.Ю., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б., Тимошечкин М.И. // Современный уровень разработок запоминающих и логических устройств на цилиндрических магнитных доменах. Тез. докл. Всесоюз. семинара. М., 1985. С. 37.
- [12] Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М., 1994.
- [13] Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных структурах. Киев: Наукова думка, 1983.
- [14] Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: ГИФМИ, 1961. 38 с.
- [15] Балбашов А.М., Лисовский Ф.В., Раев В.К. и др. // Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник / Под. ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.
- [16] Wangness R.K. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. N5. P. 1085–1091.
- [17] Gangulee K., Kobliska R.J. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N6. P. 3333–3337.
- [18] Логинов Н.А., Лагунов М.В., Рандошкин В.В. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 10. С. 58–63.
- [19] Рандошкин В.В., Сигачев В.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. Вып. 1. С. 34–37.