

УДК 538.22 : 539.22 : 539.216.22

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПЛЕНОК $(\text{YbPrGd})_{3-x}\text{Bi}_x(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$

Ю. А. Бурым, Н. В. Пронина, А. Н. Шапошников

Представлены результаты исследования особенностей процесса перемагничивания монокристаллических пленок феррит-гранатов состава $(\text{YbPrGd})_{3-x}\text{Bi}_x(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$. Установлено, что в исследованных образцах причиной отклонения эффективной оси легкого намагничивания от плоскости образца является наличие положительной кубической анизотропии. Определены зависимости угла отклонения α от величины константы одноосной анизотропии. Показано, что угол α не может превышать 35° . Предложен простой способ контроля угла α .

В настоящее время висмут-содержащие монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ) применяются для создания на их основе невзаимных элементов ряда оптических устройств [1, 2]. Для работы невзаимных элементов с использованием экваториального эффекта Керра МПФГ должны обладать анизотропией типа «легкая плоскость». Целью настоящей работы явилось исследование особенностей процесса перемагничивания МПФГ, обладающих кубической и малой одноосной анизотропией, а также определение пространственного расположения эффективной оси легкого намагничивания (ЭОЛН) в подобных МПФГ.

1. Эксперимент

Измерения проводили на МПФГ состава $(\text{YbPrGd})_{3-x}\text{Bi}_x(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках $\text{Cd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ориентации (111). Выбор данного состава обусловлен тем, что ионы Bi^{3+} обеспечивают большую величину магнитооптических эффектов, ионы Pr^{3+} индуцируют анизотропию типа «легкая плоскость» [3]. Для измерений использовали магнитооптический гистериограф Фарадея [4] и вибромагнитомер.

Условия роста и основные характеристики МПФГ

Номер образца	T_g , °C	ω , об./мин	$4\pi M_s$, Гс	θ_F , град/мм	α , град
1 — 17	779	70	284	0.54	13.8
2 — 22	791	70	320	0.51	4.0
3 — 25	853	70	350	0.42	3.1
4 — 25	843	70	290	0.385	1.9
5 — 25	841	70	285	0.317	1.9

Условия выращивания МПФГ и значения основных характеристик приведены в таблице: T_g — температура роста, ω — скорость вращения подложки, $4\pi M_s$ — намагниченность насыщения, θ_F — удельное фарадеевское вращение, α — угол отклонения ЭОЛН от плоскости образца. Растворитель $\text{PbO} : \text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{V}_2\text{O}_5 = 7.6 : 3.85 : 1.0$.

На рис. 1 представлена типичная зависимость угла фарадеевского вращения θ_F от величины магнитного поля, перпендикулярного плоскости образца. Наблюдаемые участки различного наклона кривой к оси X можно объяснить отклонением ЭОЛН от плоскости образца. Действительно, если ОЛН составляет некоторый малый угол α с плоскостью образца, то намагничивание образца в перпендикулярном поле будет происходить в две стадии. Первая стадия обусловлена движением доменных границ, она завершается намагничиванием образца до насыщения вдоль ЭОЛН (на рис. 1 эта стадия имеет место в поле ~ 0.2 кА/м). Вторая стадия обусловлена поворотом вектора намагниченности до направления магнитного поля, она завершается в поле ~ 70 кА/м.

Наблюдения процесса перемагничивания с помощью поляризационного микроскопа показали наличие нерегулярной доменной структуры на первой стадии перемагничивания и ее отсутствие на второй. Таким образом, плавные безгистерезисные участки кривой перемагничивания вплоть до насыщения соответствуют процессу вращения вектора намагниченности, а ступеньки в поле ± 0.2 кА/м — скачкообразному росту зародышей обратной намагниченности; этот процесс происходит с гистерезисом ($H_c \approx 0.2$ кА/м), что объясняется взаимодействием доменной границы с дефектами пленки. Точка

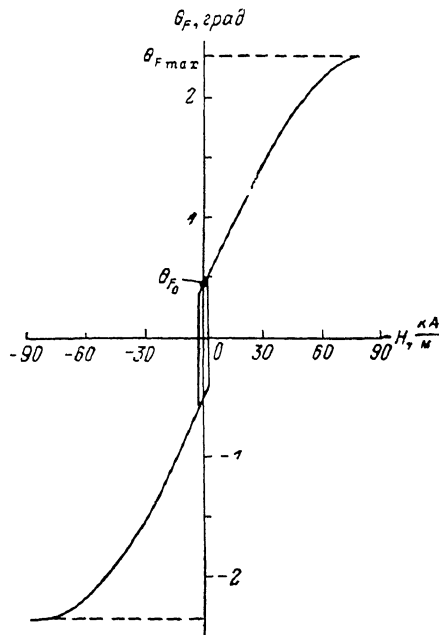


Рис. 1. Типичная зависимость угла фарадеевского вращения θ_F от величины перпендикулярного магнитного поля. $\alpha = 10.5^\circ$.

на оси Y со значением $\theta_F = \theta_{F_0}$ соответствует равновесному наклонному расположению вектора намагниченности в монодоменном состоянии в отсутствие внешнего поля. Поэтому

$$\theta_{F_0} = \theta_{F_{\max}} \sin \alpha, \quad (1)$$

где $\theta_{F_{\max}}$ — угол фарадеевского вращения при насыщении МПФГ в перпендикулярном поле, α — угол наклона ЭОЛН к плоскости образца.

На рис. 2 приведена зависимость угла α , вычисленного согласно (1), от величины удельного фарадеевского вращения для серии образцов исследуемого состава. Учитывая, что константа одноосной анизотропии K_u линейно растет с ростом содержания висмута [3], т. е. в данном случае с ростом θ_F , получаем, что ход кривой на рис. 2 отражает зависимость α от K_u .

2. Теория

Для выяснения причин, приводящих к отклонению вектора намагниченности от плоскости образца, были проведены расчеты кривых, описывающих процесс перемагничивания магнитной пленки путем вращения вектора намагниченности при разных значениях констант одноосной K_u и кубической K_1 анизотропии. Исходное выражение для энергии МПФГ на подложке ориентации (111) (рис. 3) следующее [5]:

$$E = -HM_z \cos \theta + 2\pi M_z^2 \cos^2 \theta + K_u \sin^2 \theta + K_1 \left(\frac{1}{4} \sin^4 \theta + \frac{1}{3} \cos^4 \theta + \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \cos 3\varphi \right), \quad (2)$$

где слагаемые — зеемановская энергия, энергия размагничивания, энергия одноосной и кубической анизотропии соответственно; θ и φ — полярный и азимутальный углы.

При $K_1 < 0$ ЭОЛН направлена вдоль оси $[111]$, и поэтому отклонение ЭОЛН от плоскости (111) не может быть вызвано кубической анизотропией. Это подтверждается и рассмотрением процесса перемагничивания при $K_1 < 0$. Как показано в [6], монокристаллические образцы $\text{Pr}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ обладают значениями $K_1 > 0$ в интервале температур от 100 до 350 К. Основываясь на этих данных, рассмотрим монодоменное состояние исследуемых МПФГ $(\text{YbPrGd})_{3-x}\text{Bi}_x(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$, при условии $K_1 > 0$, что соответствует минимуму энергии кубической анизотропии в направлении

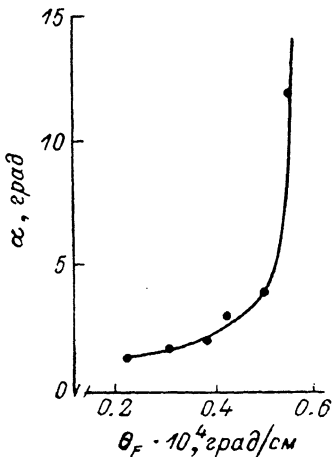


Рис. 2. Зависимость угла α отклонения ЭОЛН от плоскости МПФГ от величины удельного фарадеевского вращения θ_F .

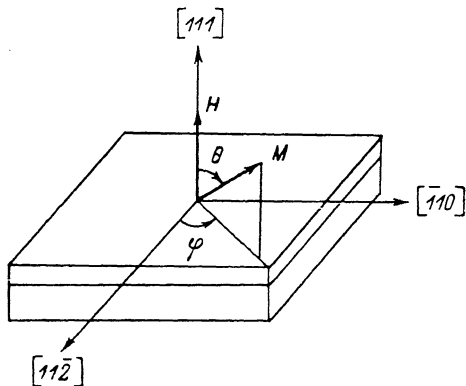


Рис. 3. Координатная система для пленок ориентации (111) . $H \perp (111)$.

типа $[001]$. Поскольку в исследуемых МПФГ ЭОЛН лежит вблизи плоскости образца, будем рассматривать значения $Q < 1$, где $Q = K_u/2\pi M_s^2$ — фактор качества. Минимизируя (2) по φ и θ , получаем

$$\varphi = \frac{\pi}{3} + n \frac{2\pi}{3}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$\frac{H}{4\pi M_s} = (1 - Q) \cos \theta + \frac{K}{2} \left(\frac{4}{3} \cos^3 \theta + \sqrt{2} \sin \theta \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cos \theta - \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \right), \quad \theta = 0, \quad K = K_1/2\pi M_s^2. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает, таким образом, процесс перемагничивания МПФГ в перпендикулярном поле путем вращения вектора намагниченности. На рис. 4 представлены расчетные кривые намагничивания. При $K=0$ уравнение (4) имеет вид

$$H/4\pi M_s = (1 - Q) \cos \theta, \quad (5)$$

а соответствующая кривая проходит через начало координат. При $K > 0$ точка пересечения кривой с осью Y смещается из начала координат, что соответствует возникновению отклонения ЭОЛН от плоскости образца. Будем считать (см. (1)), что при $H=0$

$$(M/M_s)_0 = \sin \alpha, \quad (6)$$

где $M/M_s = \cos \theta$. Из рис. 4 видно, что с увеличением K кривая намагничивания вращается вокруг точки при $M/M_s = 0.574$. Отсюда следует, что угол предельного отклонения ЭОЛН от плоскости $\alpha = 35^\circ$, что соответствует направлению $[001]$ и имеет место при $K \rightarrow \infty$. Этот результат очевиден, так как в данном случае энергия кубической анизотропии преобладает над всеми другими видами энергии.

На рис. 5 приведены зависимости $\alpha=f(Q)$ при разных K . Значения α вычислялись из кривых на рис. 4 с помощью соотношения (6). Отметим, что кривая на рис. 5 качественно совпадает с экспериментальной кривой

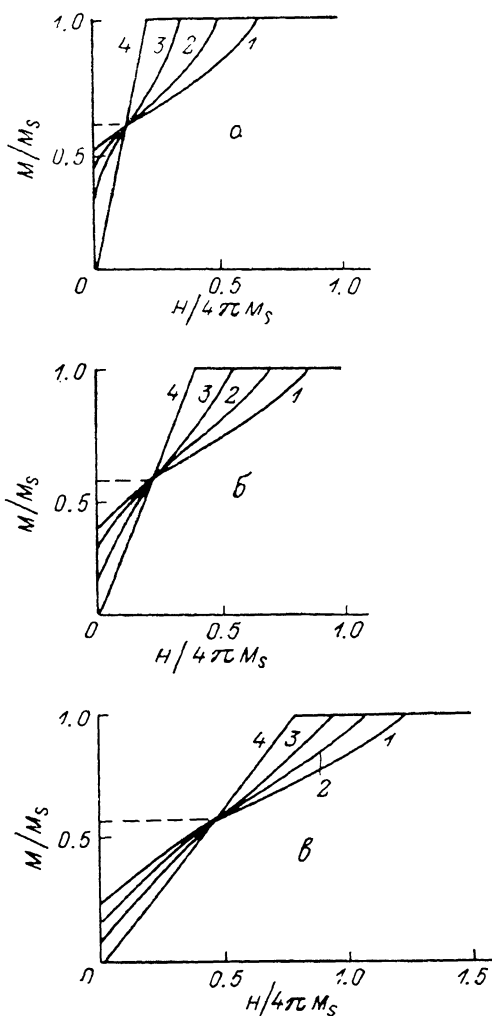


Рис. 4. Расчетные кривые намагничивания для $Q=0.8$ (а), 0.6 (б), 0.2 (в) и $K=0.6$ (1), 0.4 (2), 0.2 (3), 0 (4). $M/M_s = \cos \theta$.

рис. 2, что свидетельствует в пользу предложенной теории.

Отметим, что введение в уравнение (2) орторомбической анизотропии не дает объяснения причины отклонения ЭОЛН от плоскости образца. Поэтому предложенное объяснение процесса перемагничивания исследованных пленок представляется единственно возможным.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что возможной причиной отклонения ЭОЛН от плоскости образца является наличие положительной кубической анизотропии.

2. Определены зависимости угла отклонения ЭОЛН от ве-

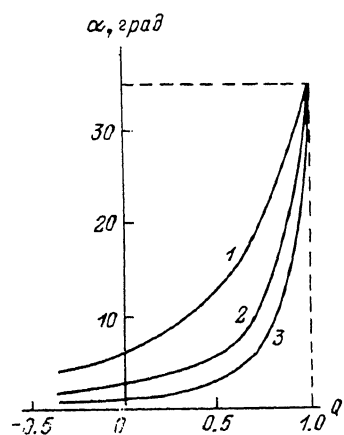


Рис. 5. Зависимость α от фактора качества Q при $K=0.4$ (1), 0.2 (2), и 0.1 (3).

личины константы одноосной анизотропии. Показано, что угол отклонения ОЛН от плоскости не может превышать 35° .

3. Получено качественное совпадение экспериментальной кривой $\alpha=f(\theta_F)$ с расчетной $\alpha=f(Q)$.

4. В работе предложен простой способ контроля угла отклонения ЭОЛН от плоскости образца.

Л и т е р а т у р а

- [1] Krebs J. J., Maisch W. G., Prinz G. A., Forester D. W. IEEE Trans. Magn., 1980, vol. Mag-16, N 5, p. 1179—1184.
- [2] U. S. Patents N 3927 946. Dec. 23, 1975. INT.CL.HO1S 3/10. Ring Lazer frequency biasing mechanism. E. Robert McClure, Locust Valley (USA): Sperry Rand Corporation, New York.
- [3] Hansen P., Clages C.-P., Witter K. J. Magn. and Magn. Mater., 1986, vol. 54—57, N 3, p. 1405—1406.

- [4] Червинский М. М., Глаголев С. Ф., Горбунов И. П. Магнитооптические методы и средства определения магнитных характеристик материалов. Л.: Энергия, 1980. 119 с.
- [5] Makino H., Hidaka Y. Mat. Res. Bull., 1981, vol. 16, N 8, p. 957—966.
- [6] Slusky S. E. G., Dillon J. F. Jr., Brandle G. D. et al. Phys. Rev. B, 1986, vol. 34, N 11, p. 7918—7923.

Симферопольский государственный
университет им. М. В. Фрунзе
Симферополь

Поступило в Редакцию
20 июля 1987 г.
В окончательной редакции
21 декабря 1987 г.