

УДК 535.42

## ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНКАХ С АНИЗОТРОПИЕЙ «УГЛОВАЯ ФАЗА»

Семук Е.Ю.<sup>1</sup>, Бержанский В.Н.<sup>1</sup>, Прокопов А.Р.<sup>1</sup>, Голуб В.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Украина

<sup>2</sup> Институт магнетизма НАН Украины, Киев, Украина

E-mail: roton@crimea.edu, domain@home.cris.net, golub@imag.kiev.ua

Методом ферромагнитного резонанса определено наличие в феррит-гранатовых пленках с анизотропией "угловая фаза" магнитных слоев. По угловым зависимостям напряженности резонансного магнитного поля рассчитаны величины констант магнитной анизотропии, намагниченности насыщения и гиромагнитного отношения для каждого из слоев. Показано, что существуют двухслойные структуры с реализацией в них констант магнитной анизотропии противоположных знаков.

**Ключевые слова:** пленки ферритов-гранатов, ФМР, анизотропия.

Эпитаксиальные пленки феррит-гранатов (ЭПФГ) с магнитной анизотропией «легкая плоскость» и «угловая фаза» перспективны при использовании их в устройствах визуализации и топографирования пространственно-неоднородных магнитных полей, когда необходим аналоговый вид преобразованного изображения. Кроме того они интересны при изучении процессов намагничивания [1,2]. Пленки, выращенные методом жидкофазной эпитаксии достаточно часто имеют слоистую структуру [3-5], что понижает эффективность их работы в приведенных выше устройствах. Наличие слоев и их свойства могут быть исследованы методом ферромагнитного резонанса ФМР. Целью данной работы являлось исследование однородности пленок, применяемых в устройствах магнитооптической визуализации, методом ФМР.

Было исследовано шесть образцов, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевых подложках ориентации (111) (см. таблицу 1). Базовый формульный состав синтезированных пленок имел вид  $(\text{BiLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ . Толщина пленок  $h$  составляла 5-7 мкм.

Период доменной структуры  $w$ , толщина  $h$ , рассогласование параметров решеток пленки и подложки  $\Delta a$  ЭПФГ определялись стандартными методами. Значения этих параметров приведены в таблице 1.

В пленках несколько варьировалось процентное содержание гранатообразующих элементов. В ряде случаев это приводило к появлению рассогласования параметров решетки  $\Delta a$ , изменению намагниченности  $4\pi M_s$ , периода доменной структуры  $w$  и других свойств. Вариации состава возникали при изменении технологических параметров роста, в частности температуры синтеза ЭПФГ. Исследование доменной структуры показало, что все образцы имели

анизотропию «угловая фаза» [4]. Магнитные параметры пленок оценивались по спектрам ФМР, которые регистрировались на ЭПР спектрометре BRUKER ELEXIS E500 в институте магнетизма НАНУ и МОНУ. Измерения проводились при комнатной температуре на частоте 9,3 ГГц.

Спектры ФМР ряда образцов состоят из двух групп линий, одна из которых наиболее интенсивная лежит в высоких полях, другая в низких полях. Исследование зависимости спектров от углов  $\beta$  и  $\varphi$  (где  $\beta$  и  $\varphi$  - соответственно полярный и азимутальный углы, определяющие направление внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}$ ) показало, что они существенно отличаются. Наличие двух групп линий в спектрах ФМР может быть связано со слоистой структурой ЭПФГ. При этом различные слои отличаются значениями интенсивности поглощения. На рис.1 приведен спектр ФМР для одного из образцов (образец №4), на котором видны два пика поглощения, соответствующие двум различным слоям ЭПФГ, условно обозначенным слой 1 и слой 2.

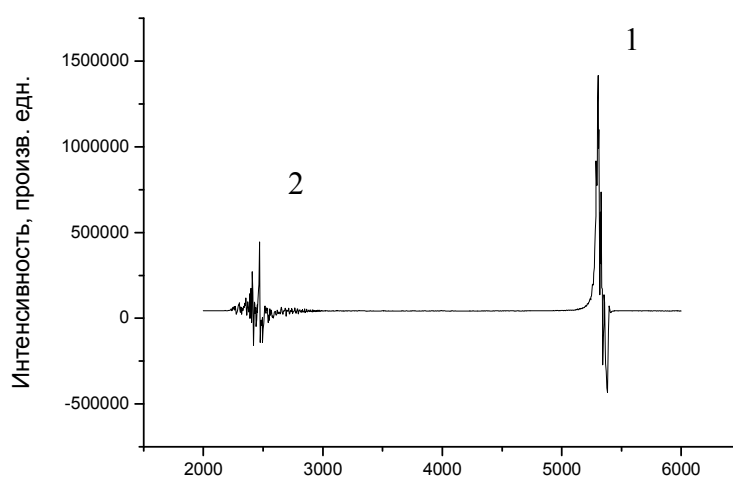


Рис. 1. Спектр ФМР- образца №4 в магнитном поле, перпендикулярном плоскости пленки (слой 1 – высокополевой сигнал, слой 2 - низкополевой).

Были исследованы азимутальные зависимости резонансного поля  $H_{rez}(\varphi)$  при ориентации магнитного поля в плоскости пленки. На рис.2 представлены такие зависимости для образца №4.

На азимутальных зависимостях  $H_{rez}(\varphi)$  всех образцов для обоих слоев наблюдается  $180^\circ$ -ая симметрия, что свидетельствует о наличии одноосной анизотропии в плоскости пленки. Это характерно для пленок с ромбической магнитной анизотропией (РМА).

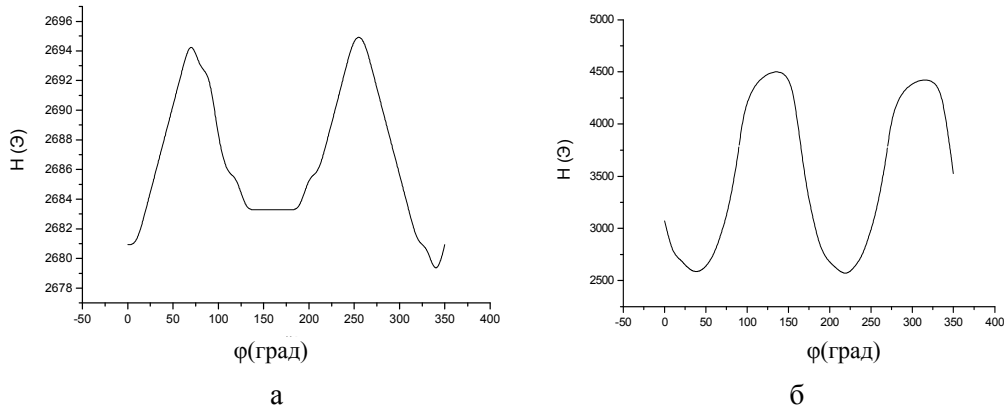


Рис. 2. Угловые зависимости резонансного поля  $H_{res}(\varphi)$  для образца №4. а) слой 1 б) слой 2.

Результаты измерений резонансных полей приведены в табл. 1, где  $H_{\varphi_{min1}}$ ,  $H_{\varphi_{max1}}$ ,  $H_{\varphi_{min2}}$ ,  $H_{\varphi_{max2}}$  – минимальное и максимальное значения резонансного поля при параллельном резонансе для слоя 1 и 2, соответственно,  $\delta H_{\varphi1}$ ,  $\delta H_{\varphi2}$  – разности максимального и минимального значений резонансных полей соответствующих слоев. Поле одноосной анизотропии в плоскости пленки  $\delta H_{\varphi1}$  для всех образцов в слое 1 невелико и составляет приблизительно 20 Э. Для слоя 2  $\delta H_{\varphi2}$  составляет 1725 Э. Амплитуды пиков на азимутальных зависимостях  $H_{res}(\varphi)$  отличаются незначительно, что свидетельствует о малом вкладе кубической анизотропии. Анализ азимутальных зависимостей  $H_{res}(\varphi)$  обоих слоев также показал, что ориентации легких осей для различных слоев в плоскости ЭПФГ отличаются на  $60^\circ$ .

На рис. 3 представлены зависимости напряженности резонансного магнитного поля  $H_{res}(\beta)$  в интервале углов от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $10^\circ$  для слоя 1 и 2 образца №4. Для других образцов вид таких зависимостей качественно не отличается.

Анализ угловых зависимостей  $H_{res}(\beta)$  позволяет определить константу магнитной анизотропии ЭПФГ  $K_u$ , а также гиромангнитное отношение  $\gamma$  [6,7].

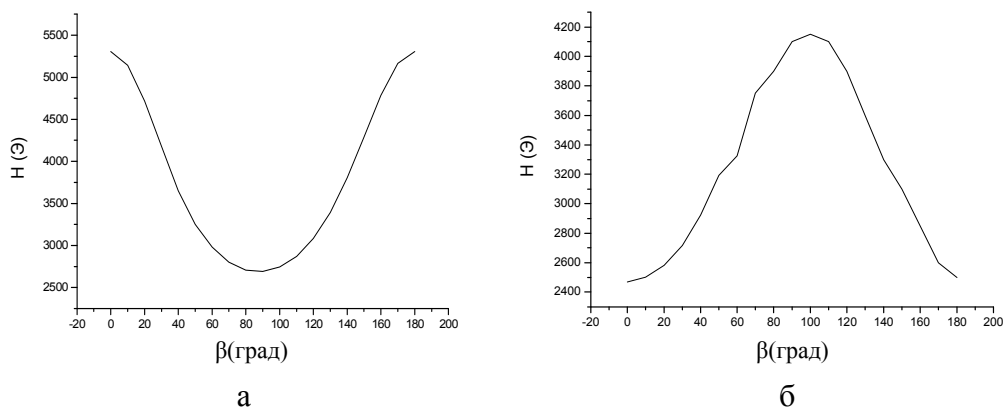


Рис. 3. Угловые зависимости резонансного поля  $H_{res}(\beta)$  для образца №4 а) слой 1 б) слой 2.

При этом, поскольку у всех образцов для слоя 1 значения ромбической магнитной анизотропии и кубической магнитной анизотропии оказались малы, можно пренебречь их влиянием. Поэтому включим в систему уравнений для определения  $K_{u1}$  и  $\gamma_1$  в качестве неизвестного параметра намагниченность насыщения  $4\pi M_{s1}$ . Определенные таким образом значения  $4\pi M_{s2}$ ,  $K_{u2}$ , с одной стороны, позволяют предполагать, что вектор намагниченности слоя 2  $\mathbf{M}_{s2} \parallel \mathbf{n}$  ( $\mathbf{n}$  – нормаль поверхности ЭПФГ). С другой стороны легкая ось в плоскости для этого слоя (рис. 2) указывает на наличие плоскостной компоненты  $\mathbf{M}_{s2}$ . Таким образом вектор намагниченности в слое 2 скорее всего направлен под углом  $\theta$  к  $\mathbf{n}$  ( $0 < \theta < 90^\circ$ ), и для описания анизотропии слоя 2 недостаточно ограничиваться константой  $K_{u2}$ , поскольку для этого слоя поле ромбической магнитной анизотропии в плоскости значительно выше, чем для слоя 1 и его нельзя не учитывать. Полученные значения  $K_{u1}$ ,  $4\pi M_{s1}$ ,  $\gamma_1$ ,  $4\pi M_{s2}$ ,  $K_{u2}$ ,  $\gamma_2$ ,  $H_{a1}$ ,  $H_{a2}$  ( $H_{a1}$ ,  $H_{a2}$  – поля анизотропии соответствующих слоев) приведены в таблице 1.

Если предположить, что слой 2 является переходным слоем подложка-пленка, то малая намагниченность насыщения этого слоя может быть обусловлена диффузией ионов Ga и Gd из подложки в пленку в процессе эпитаксии. Малые значения  $4\pi M_{s2}$  также могут объяснять меньшую интенсивность поглощения этого слоя (рис.1). Для всех исследуемых образцов слой 1 характеризуется высоким значением намагниченности насыщения и анизотропией легкая плоскость.

Таблица 1

Параметры висмутсодержащих ЭПФГ состава  $(\text{BiLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$

	1	2	3	4	5	6
w (мкм)	10	8	10	8	4	8
h (мкм)	5	–	6	6.3	5	6.8
$\Delta a$ (мкм)	0	0.011	0.012	0.011	0	–
$4\pi M_{s1}$ (Гс)	1536	1836	780	1116	924	936
$K_{u1}$ (эрг/см <sup>3</sup> )	1000	2900	-25000	-30000	-31000	-36000
$H_{a1}$ (Э)	16.34	39.6	-804.0	-674.7	-842.0	-965.3
$H_{\varphi\text{min}1}$ (Э)	2775	2697	2751	2682	2706	2640
$H_{\varphi\text{max}1}$ (Э)	2792	2722	2762	2695	2723	2658
$\delta H_{\varphi1}$ (Э)	17	25	11	13	17	18
$\gamma1$ (Э <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup> )	0.1769	0.1758	0.1780	0.1780	0.1774	0.1749
$4\pi M_{s2}$ (Гс)	408	–	300	170	168	–
$K_{u2}$ (эрг/см <sup>3</sup> )	25000	–	10000	9000	4000	–
$H_{a2}$ (Э)	1537.9	–	836.7	1328	597.6	–
$H_{\varphi\text{min}2}$ (Э)	2530	–	2640	2525	2780	–
$H_{\varphi\text{max}2}$ (Э)	4400	–	3400	4250	3300	–
$\delta H_{\varphi2}$ (Э)	1870	–	760	1725	520	–
$\gamma2$ (Э <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup> )	0,1746	–	0,2237	0,1740	0,2099	–
$\Delta H_1$ (Э)	40(90)	30(50)	35(200)	80(130)	10(70)	60(170)
$\Delta H_2$ (Э)	10-15	–	10-20	10	20	20

Таким образом установлено, что ЭПФГ состава  $(\text{BiLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ , выращенные на гадолиний-галлиевых подложках ориентации (111) с анизотропией «угловая фаза» имеют двухслойную структуру.

Определены магнитные параметры обоих слоев  $K_u$ ,  $4\pi M_s$ ,  $\gamma$ .

Основной слой характеризуется большей намагниченностью насыщения и большим поглощением, чем переходный слой пленка-подложка, при этом в нем  $\mathbf{M}_s \perp \mathbf{n}$ . Намагниченность насыщения переходного слоя пленка-подложка ориентирована под углом  $\theta$  ( $0 < \theta < 90^\circ$ ) по отношению к  $\mathbf{n}$ .

Работа выполнена за счет бюджетных средств (грант ГФФИ Ф14/299-2007).

Список литературы

1. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. – М.: Мир, 1976. – Т. 2. – 504 с.
2. Барьяхтар В.Г. Физика магнитных доменов / Барьяхтар В.Г., Богданов А.И., Яблонский Д.А. // УФН. – 1988. – Т. 156, вып. 1. – С 47-89.
3. В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная Магнитооптика. -М., Энергоатомиздат.-1990.- С.118.
4. Прокопов А.Р., Дубинко С.В., Хребтов А.О., Еремина М.И. Особенности магнитоиндуцированного спинпереориентационного перехода в феррит-гранатовых пленках с анизотропией «угловая фаза» // ФТТ. – 1997. – Т.39, №8. – С. 1415-1420.
5. Ф.Г. Барьяхтар, Л.А. Суслин, А.О. Хребтов. Переходные слои в LuSmCaGe-феррит-гранатовых пленках//ФТТ. – 1986. – Т.28, №7. – С. 2246-2249.
6. Makino H., Hidaka Y. // Mat. Res. Bull. 1981. Vol. 16. №8. P.957-966.
7. Бержанский В.Н. Особенности процесса намагничивания ЭПФГ с анизотропией “угловая фаза” / Бержанский В.Н., Прокопов А.Р., Семук Е.Ю. // Уч. записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Сер. «Физика». - 2007. - Т. 20 (59), № 1. - С. 136-146.

**Семук Є.Ю., Бержанський В.Н., Прокопов А.Р. Особливості процесу намагнічування ЕПФГ з анізотропією “кутова фаза”** // Учені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. – 2008. – Серія «Фізика». - Т. 21 (60). - № 1. - С. 166 - 171.

Методом ферромагнітного резонансу визначено наявність у ферит-гранатових плітках з анізотропією "кутова фаза" магнітних шарів. По кутових залежностях напруженості резонансного магнітного поля розраховані величини констант магнітної анізотропії, намагніченості насичення і гіромагнітного відношення для кожного із шарів. Показано, що існують двошарові структури з реалізацією в них констант магнітної анізотропії протилежних знаків.

**Ключові слова:** плівки феритів-гранатів, ФМР, анізотропія.

**Semuk Ye.Yu., Berzhansky V.N., Prokopov A.R. Peculiarity of magnetization process in epitaxial garnet films with "angle phase" anisotropy** // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – Series «Fizika». – V. 21 (60). - № 1. – С. 166 - 171.

A presence of magnetic layers in "angle phase" anisotropy epitaxial garnet ferrite films (111) was determined with the method of ferromagnetic resonance. For each layer the uniaxial anisotropy constants of magnetic crystallographic anisotropy  $K_u$ , magnetization  $M_s$  and gyromagnetic ratio  $\gamma$  are determined for the samples with FMR method. It is rotined that there is two layers structures are with realization of constants of magnetic anisotropy of opposite signs in them.

**Keywords:** garnet ferrite films, FMR, anisotropy.

*Поступила в редакцию 6.11.2008 г.*