

Особенности ферромагнитного резонанса в пленках феррит-гранатов с ромбической магнитной анизотропией

© В.В. Рандошкин, В.И. Козлов, В.Ю. Мочар, Н.В. Васильева, Н.А. Еськов, Ю.А. Дурасова

Совместная хозрасчетная лаборатория "Магнитооптоэлектроника" института общей физики Российской академии наук при Мордовском государственном университете, 430000 Саранск, Россия

(Поступила в окончательном виде 13 ноября 1998 г.)

Изучаются особенности ферромагнитного резонанса (ФМР) в висмут-содержащих монокристаллических пленках феррит-гранатов (ВМПФГ) без быстрорелаксирующих ионов, выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора–расплава на подложках с ориентацией (110) и (210) и обладающих относительно невысокой ромбической магнитной анизотропией (РМА). Основное внимание уделяется однонаправленной магнитной анизотропии в плоскости пленки, а также влиянию на спектр ФМР переходного поверхностного слоя пленка/подложка.

Один из путей повышения быстродействия магнитооптических устройств на базе висмут-содержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов (ВМПФГ) состоит в использовании ВМПФГ с ромбической магнитной анизотропией (РМА) [1–7]. Эти материалы в общем случае обладают как осью легкого намагничивания, ориентированной под некоторым углом к нормали к плоскости пленки [8,9], так и магнитной анизотропией в плоскости пленки, намного превышающей кристаллографическую кубическую. Такая магнитная анизотропия, в частности, имеет место, если в состав пленок с ориентацией, отличной от (111), вместе с ионами Vi^{3+} входят ионы Y^{3+} [2,10–13].

Исследование динамики доменных стенок (ДС) в ВМПФГ с РМА [2–7,10–14] обнаружило ряд особенностей: а) отсутствие эффекта генерации микродоменов перед движущейся ДС в МПФГ с РМА даже в том случае, когда пленка не содержит быстрорелаксирующих редкоземельных ионов [7,12,13]; б) необычную ромбовидную форму динамических доменов [12]; в) так называемую однонаправленную анизотропию скорости ДС [7,13,14]; г) сильную зависимость формы динамических доменов и скорости ДС от магнитного поля H_{in} , приложенного в плоскости пленки (планарное магнитное поле) [13].

Необычные динамические свойства ВМПФГ с РМА, в том числе и однонаправленная анизотропия скорости ДС, находят свое объяснение в рамках спин-волнового механизма движения ДС [15,16], если предположить, что и диапазон магнитных полей, где имеет место излучение спиновых волн, и параметр затухания зависят от направления в плоскости пленки [17,18].

При исследовании ВМПФГ с РМА методом ФМР для предотвращения возбуждения спин-волнового резонанса (СВР) выбирают пленки, содержащие в своем составе быстрорелаксирующие редкоземельные ионы (например, ионы Dy^{3+} , как и [19]).

Цель настоящей работы — изучение ФМР в ВМПФГ с РМА, когда в состав пленок не входят быстрорелаксирующие ионы. Для исследований были выбраны ВМПФГ составов $(\text{Bi}, \text{Y})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_3\text{O}_{12}$ (I) и $(\text{Bi}, \text{Y}, \text{Lu})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_3\text{O}_{12}$ (II).

Пленки состава I выращивали методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора–расплава на основе $\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ на подложках $(\text{Gd}, \text{Ca})_3(\text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210). В отличие от Pr-содержащих пленок с РМА [20] исследуемые ВМПФГ обладают относительно слабой анизотропией в плоскости пленки, что позволяет наблюдать ФМР при любой ориентации внешнего магнитного поля.

Пленки состава II выращивались с использованием того же растворителя на подложках $\text{Ca}_3(\text{Nb}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (110). Процесс эпитаксиального роста ВМПФГ на этой подложке имеет ряд особенностей, включая необходимость сильного разбавления раствора–расплава и большого переохлаждения $\Delta T \geq 100 \text{ K}$ [21,22]. Обнаружено [21,22] также, что качество МПФГ выше, если использовать подложки с ориентацией (110), а не (111) (для других подложек, в частности $(\text{Gd}, \text{Ca})_3(\text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, имеет место обратная ситуация). Кроме того, пленки, выращенные на подложках $\text{Ca}_3(\text{Nb}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, обладают относительно толстым (2–10 μm) переходным поверхностным слоем пленка–подложка (ПП) [21,22]. При исследовании пленок состава II влиянию именно этого обстоятельства на спектр ФМР уделялось основное внимание.

Содержание оксидов железа и галлия при выращивании пленок обоих составов было примерно одинаково. Содержание лютетия в пленках состава II было примерно на порядок меньше, чем иттрия. Анализ химического состава исследованных пленок не проводился. Заметим, что из-за деградации кристаллообразующих свойств висмут-содержащего раствора–расплава, приводящей к изменению химического состава и параметров ВМПФГ, последовательно выращенных в одинаковых условиях [23], однозначная связь между составами шихты и выращенных пленок отсутствует.

Обычно исследуемые образцы имели форму дисков диаметром 2–3 mm с пленками с обеих сторон подложки. ФМР наблюдали на частоте 9.24 GHz. Диапазон развертки ФМР-спектрометра составлял от 0 до 9000 Oe. Регистрировали производные поглощения при увеличении внешнего магнитного поля. Определяли резонанс-

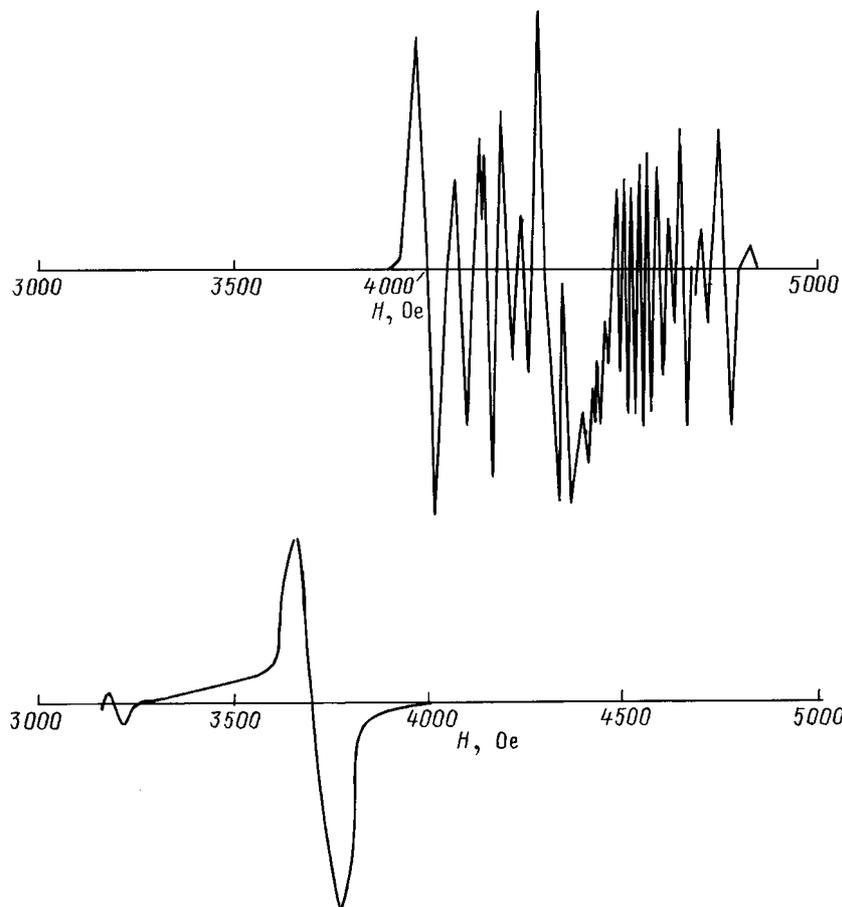


Рис. 1. Спектры ФМР при параллельном резонансе для ВМПФГ состава I для двух взаимно противоположных направлений.

ные поля при ориентации внешнего магнитного поля перпендикулярно (H_{\perp} , перпендикулярный резонанс) и параллельно (H_{\parallel} , параллельный резонанс) плоскости пленки. Об анизотропии в плоскости пленки судили по азимутальной зависимости $H_{\parallel}(\varphi)$ при параллельном резонансе.

Поскольку исследуемые ВМПФГ не содержат быстрорелаксирующих магнитных ионов, а единственными медленнорелаксирующими ионами являются ионы Fe^{3+} , то эффективное значение гиромагнитного отношения γ в пленках такое же, как у ионов железа: $(1.76 \cdot 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1})$. Это обстоятельство позволяет в отличие от [24,25] определить эффективное поле магнитной анизотропии H_{eff} только по данным перпендикулярного резонанса, для которого резонансное соотношение можно записать как

$$\omega/\gamma = H_{eff} + H_{\perp}, \tag{1}$$

где ω — круговая частота ФМР. Если же известно резонансное поле при параллельном резонансе, то

$$H_{eff} = H_{\parallel} - (\omega/\gamma)^2/H_{\parallel}. \tag{2}$$

На рис. 1 приведены спектры параллельного резонанса для ВМПФГ состава I, которые получены для двух

значений φ , различающихся на 180° , причем нижний спектр соответствует направлению, для которого значение резонансного поля крайней слева линии в спектре минимально. Видно, что верхний спектр содержит более 20 линий, что характерно и для пленок, не содержащих быстрорелаксирующих ионов и не обладающих РМА [26]. Однако ширина линий, превышающая 10 Oe, существенно выше значений (порядка 1 Oe), характерных для пленок без РМА, не содержащих быстрорелаксирующих ионов [26]. Это подтверждает предположение, что параметр затухания зависит от наличия эффективного внутреннего магнитного поля в плоскости пленки [17,18]. При изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное в спектре ФМР (нижний спектр на рис. 1) остается всего две линии, интенсивность которых различается на порядок, а сами линии существенно уширяются по сравнению с любой из линий на верхнем спектре.

Уширение линий ФМР можно объяснить, следуя [17,18], возрастанием безразмерного параметра затухания Гильберта α при наличии эффективного поля магнитной анизотропии в плоскости пленки и зависимостью параметра затухания от этого поля. Существенное различие спектров параллельного резонанса

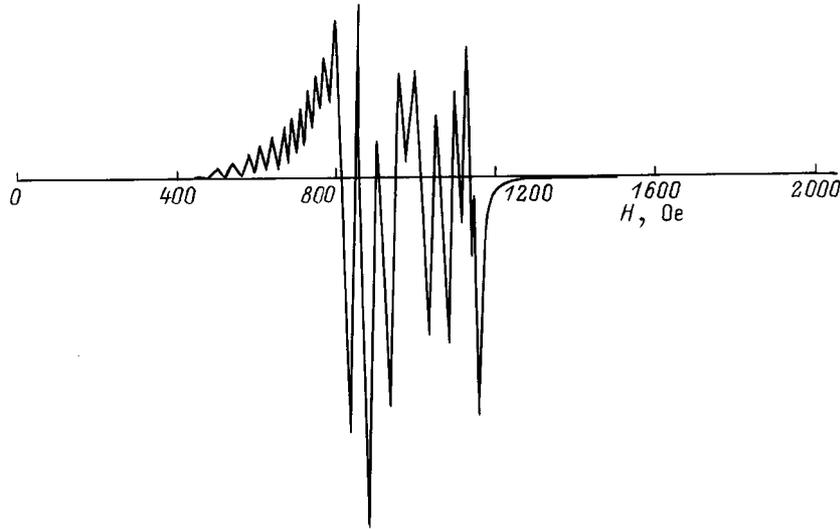


Рис. 2. Спектр ФМР при перпендикулярном резонансе для ВМПФГ состава I.

для взаимно противоположных направлений в плоскости пленки свидетельствует о наличии в плоскости пленки как однонаправленной магнитной анизотропии, так и однонаправленной анизотропии ширины линий в спектре ФМР. Зависимость ширины линий ФМР от ориентации внешнего поля в плоскости пленки при параллельном резонансе коррелирует с анизотропным уширением изображения движущейся ДС (переходная область между динамическими доменами с противоположной полярностью, в которой протекает процесс локального вращения намагниченности; эта область визуализируется с помощью магнитооптического эффекта Фарадея при скрещенных поляризаторе и анализаторе) в ВМПФГ с РМА, приводящим к однонаправленной анизотропии скорости ДС [7,13,14].

При перпендикулярном резонансе спектр ФМР также содержит ряд достаточно широких линий (рис. 2). Их него следует, что эффективное поле одноосной магнитной анизотропии для данного образца находится в диапазоне 2100–2500 Oe (точное значение H_{eff} указать невозможно, поскольку для определения, какая из линий является "нулевой" модой для основного объема пленки, требуются дополнительные исследования, включающие послойное уменьшение толщины пленки). Однако ясно, что спектр ФМР (рис. 2) включает как нулевые моды для основного объема пленок на обеих сторонах подложки и переходных поверхностных слоев, так и моды СВР.

Достаточно высокая ширина линий ФМР при перпендикулярном резонансе коррелирует с отсутствием генерации микродоменов перед движущейся ДС в ВМПФГ с РМА, не содержащих быстрорелаксирующих ионов [7,12,13].

Параметры ВМПФГ состава II, результаты исследования которых обсуждаются в данной работе, приведены в таблице, где $2h$ — суммарная толщина пленок на обеих сторонах подложки, Θ_F — удельное фарадеевское

вращение на длине волны 633 nm, P_0 — равновесный период полосовых доменов. Здесь же приводятся данные для образца, выращенного на подложке $Nd_3Ga_5O_{12}$ с ориентацией (110).

На рис. 3 приведен спектр параллельного резонанса для МПФГ, выращенной из раствора–расплава I (образец № 1 в таблице). Видно, что в спектре присутствуют две линии ФМР разной ширины, причем первая, которой соответствует меньшее резонансное поле (низкополевая), обладает примерно вдвое большей шириной и относится к пленке (или слою) с анизотропией типа "легкая плоскость" ($H_{eff} = -1050$ Oe), а вторая, которой соответствует более высокое резонансное поле (высокополевая), — к пленке (слою) с анизотропией типа "легкая ось" ($H_{eff} = 2920$ Oe). Однако трудно предположить, что различие условий роста пленок на нижней и верхней сторонах подложки [27] может привести к столь кардинальному изменению магнитной анизотропии. Между тем имеются физические механизмы, приводящие к формированию слоя ПП, магнитная анизотропия которого сильно отличается от анизотропии основного объема пленки. К их числу относятся растравливание подложки на начальной стадии эпитаксиального роста с дальнейшим вхождением растворенных компонентов подложки в состав эпитаксиальной пленки [28,29]. Более того, одновременно на одних участках подложки может протекать процесс растворения подложки, а на других — процесс эпитаксиального роста. Заметим, что

Параметры исследованных образцов состава II

№ образца	Подложка	$2h, \mu\text{m}$	$\Theta_F, \text{grad}/\text{mum}$	$P_0, \mu\text{m}$
1	$\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$	6.0	1.7	7.8
2	$\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$	4.8	1.5	13.0
3	$\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$	5.8	2.1	5.7
4	$\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	1.8	1.8	5.7

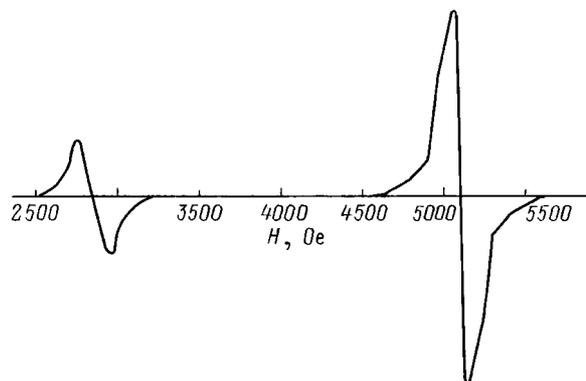


Рис. 3. Спектр параллельного резонанса для ВМПФГ состава II (образец № 1 в таблице).

как такой ”островковый” рост исследуемых ВМПФГ, так и интенсивное растворение подложки $\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$ наблюдались в ростовых экспериментах [21,22]. Кроме того, по мере наращивания ВМПФГ может протекать процесс твердотельной диффузии, приводящий к сильному изменению химического состава слоя ПП [30].

Полученные по данным рис. 3 значения H_{eff} позволяют рассчитать резонансные поля при перпендикулярном резонансе: $H_{\perp} = 410$ Oe для узкой линии ФМР и 4380 Oe для широкой. Несмотря на то что рассчитанные

значения H_{\perp} не выходят за пределы развертки ФМР-спектрометра, перпендикулярный резонанс в образце № 1 не наблюдается. При переходе от ориентации, когда внешнее магнитное поле приложено в плоскости пленки, к ориентации, когда оно перпендикулярно этой плоскости (по мере увеличения угла θ между направлением внешнего магнитного поля и плоскостью МПФГ), амплитуда сигнала ФМР резко уменьшается при одновременном уширении резонансной линии, так что при $\theta = 20^\circ$ сигнал исчезает.

Для более тонкого образца № 2 при параллельном резонансе наблюдалась только одна линия ФМР с $H_{\parallel} = 5300$ Oe, что дает расчетное значение $H_{\perp} = 130$ Oe. Перпендикулярный резонанс для него, как и для образца № 1, не наблюдается.

Однако для образца № 3, синтезированного из раствора-расплава с меньшей концентрацией Y_2O_3 и Lu_2O_3 , перпендикулярный резонанс наблюдается, причем имеется два достаточно разделенных пакета линий ФМР (эти пакеты мы связываем с основным объемом пленки и слоем ПП соответственно) с резонансными полями для наиболее интенсивных линий, равными 2100 и 4200 Oe (рис. 4, а). Рассчитанные по этим данным значения H_{eff} и H_{\parallel} составляют соответственно 1230 и 4000 Oe для первой линии и -870 и 2930 Oe для второй. Наличие двух пакетов линий

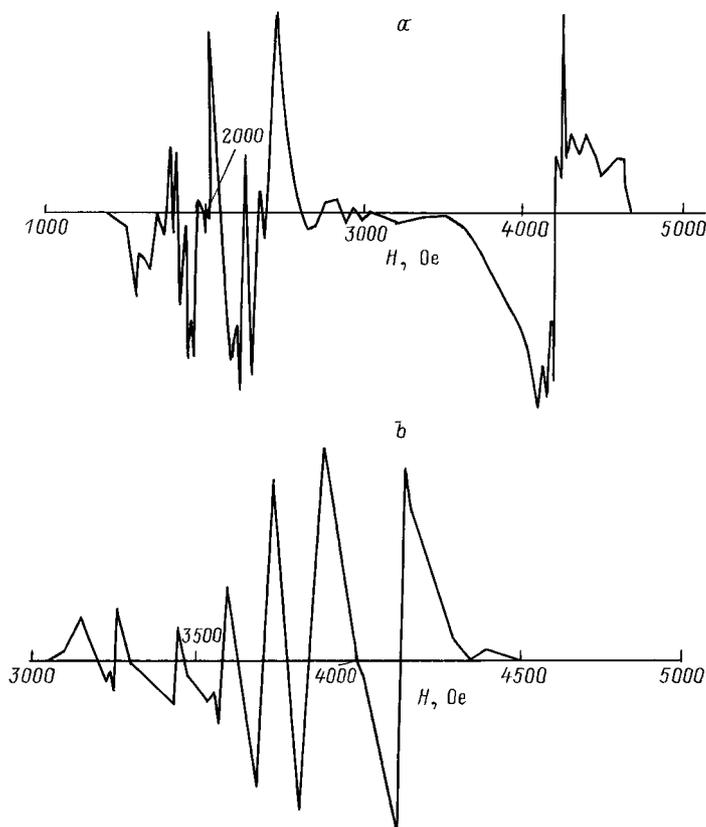


Рис. 4. Спектры параллельного (а) и перпендикулярного (b) резонансов для ВМПФГ состава II (образец № 3 в таблице).

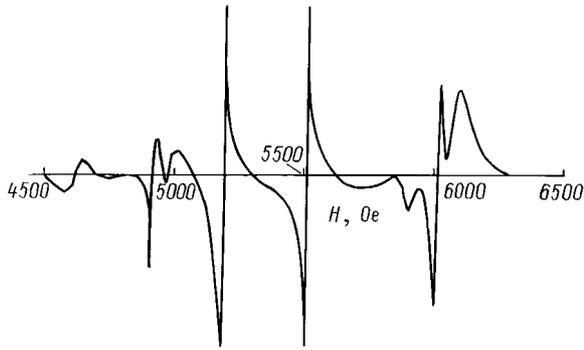


Рис. 5. Спектр перпендикулярного резонанса для ВМПФГ состава II (образец № 4 в таблице).

с примерно равной интенсивностью свидетельствует об относительно большой толщине переходного поверхностного слоя ПП, который обладает анизотропией типа "легкая плоскость".

Для параллельного резонанса эксперимент (рис. 4, б) дает серию линий, расположенных в диапазоне от 3000 до 4500 Ое, причем наиболее интенсивная линия расположена ближе к верхней границе этого диапазона.

Для сравнения на рис. 5 показан спектр ФМР при параллельном резонансе для ВМПФГ, выращенной на подложке $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, для которой не наблюдается особенностей эпитаксиального роста, свойственных $\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$. Как и следовало ожидать, из-за меньшей толщины слоя ПП для образца № 4 спектр ФМР является более "регулярным", чем приведенный на рис. 4. Из-за высокой одноосной магнитной анизотропии этого образца ($H_{\text{eff}} \geq 3200$ Ое) сигнал ФМР при перпендикулярном резонансе не наблюдается.

Для всех образцов состава II наблюдается анизотропия в плоскости пленки, однако она невелика (~ 150 Ое) по сравнению со средним значением резонансного поля, однако однонаправленная магнитная анизотропия отсутствует. Для пленок на подложке $\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$ азимутальная зависимость резонансного поля содержит четыре почти эквидистантных максимума, что отражает кристаллографическую анизотропию пленки. Это коррелирует с эллиптической формой динамических доменов в исследуемых пленках. Для пленки на подложке $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ азимутальная зависимость резонансного поля имеет более сложный вид, что объясняется возбуждением СВР, приводящего к возникновению достаточно большого числа линий в спектре ФМР (рис. 5).

Как для пленок состава I (рис. 1 и 2), так и для пленок состава II (рис. 3, 4 и 5) ширина линии ФМР намного выше, чем для пленок без РМА, не содержащих быстрорелаксирующих ионов (см., например, [26]).

Таким образом, в настоящей работе показано, что а) в ВМПФГ состава I, выращенных на подложках $(\text{Gd, Ca})_3(\text{Mg, Zr, Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210), в плоскости пленки наблюдается как однонаправленная магнитная анизотропия, так и анизотропия ширины линий ФМР; б) в ВМПФГ состава II, выращенных на подложках

$\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (110), однонаправленная магнитная анизотропия в плоскости пленки отсутствует; с) в ВМПФГ состава II, выращенных на подложках $\text{Ca}_3(\text{Nb, Ga})_5\text{O}_{12}$, толщина переходного поверхностного слоя пленка/подложка сравнима с толщиной основного объема пленки; д) в ВМПФГ составов I и II, обладающих РМА, линии в спектре ФМР существенно шире, чем в пленках без РМА.

Список литературы

- [1] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат, М. (1990). 320 с.
- [2] В.В. Рандошкин, В.И. Чани, М.В. Логунов, В.П. Клиш, Б.П. Нам, А.Г. Соловьев, А.Я. Червоненкис. Письма в ЖТФ **15**, 14, 42 (1989).
- [3] V.V. Randoshkin. Proc. SPIE **1307**, 10 (1990).
- [4] V.V. Randoshkin. Proc. SPIE **1469**, 796 (1991).
- [5] В.В. Рандошкин. Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. Труды ИОФАН **45**, 49 (1992).
- [6] В.В. Рандошкин. Дефектоскопия **6**, 58 (1997).
- [7] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов, Ю.Н. Сажин. ЖТФ **66**, 4, 201 (1996).
- [8] Е.Н. Ильичева, А.В. Дубова, В.К. Петерсон, Ю.Н. Федюнин, А.Г. Шишков. ФТТ **35**, 5, 1167 (1993).
- [9] Е.Н. Ильичева, А.Г. Шишков, А.М. Балбашов, Ю.Н. Федюнин, А.В. Клушина. ЖТФ **63**, 11, 143 (1993).
- [10] T. Hibiya, H. Makino, S. Konishi. J. Appl. Phys. **52**, 12, 7347 (1981).
- [11] S. Kikukawa, S. Isomura, S. Iwata. J. Appl. Soc. Japan **7**, 2, 83 (1983).
- [12] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев, В.И. Чани, А.Я. Червоненкис. ФТТ **31**, 7, 70 (1989).
- [13] М.В. Логунов, В.В. Рандошкин, Ю.Н. Сажин. ФТТ **32**, 5, 1456 (1990).
- [14] Ф.В. Лисовский, А.С. Логгинов, Г.А. Непокойчицкий, Т.В. Розанова. Письма в ЖЭТФ **45**, 7, 339 (1987).
- [15] Г.Е. Ходенков. ФММ **39**, 3, 466 (1975).
- [16] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев. ФТТ **28**, 5, 1522 (1986).
- [17] В.В. Рандошкин. Изв. вузов. Физика **9**, 45 (1997).
- [18] В.В. Рандошкин. ФТТ **39**, 8, 1421 (1997).
- [19] В.Н. Ваньков, А.М. Зюзин. ЖТФ **63**, 5, 119 (1992).
- [20] В.В. Рандошкин, Ю.Н. Сажин. ЖТФ **66**, 8, 89 (1996).
- [21] В.В. Рандошкин, Н.А. Еськов, В.И. Чани. Письма в ЖТФ **15**, 2, 27 (1989).
- [22] N.V. Vasiljeva, V.I. Chani, V.V. Randoshkin, N.A. Es'kov. Proc. SPIE **1126**, 99 (1989).
- [23] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, К.В. Сташун, М.В. Сташун. Изв. РАН. Неорган. материалы **35**, 1, 1 (1999).
- [24] K. Gangulee, R.J. Kobliska. J. Appl. Phys. **51**, 6, 3333 (1980).
- [25] Н.А. Логинов, М.В. Логунов, В.В. Рандошкин. ФТТ **31**, 10, 58 (1989).
- [26] В.Н. Дудоров, В.В. Рандошкин. ФТТ **36**, 6, 1790 (1994).
- [27] В.В. Рандошкин, В.И. Чани. Дефектоскопия **4**, 55 (1995).
- [28] Ю.В. Старостин. Запоминающие и логические устройства на цилиндрических магнитных доменах. ИНЭУМ, М. (1981). С. 85–93.
- [29] Ю.В. Старостин. Вопросы построения устройств на ЦМД. ИНЭУМ, М. (1982). С. 15–18.
- [30] Н.А. Грошенко, А.М. Прохоров, В.В. Рандошкин, М.И. Тимошечкин, А.Н. Шапошников, А.В. Ширков, Ю.И. Степанов. ФТТ **27**, 6, 1712 (1986).