

05;07;12

©1995 г.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА БАЗЕ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ С ПОВЫШЕННЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

В.В.Рандошкин

Совместная хозрасчетная лаборатория "Магнитооптоэлектроника"
Института общей физики РАН при Мордовском государственном
университете им. Н.П. Огарева,
430000, Саранск, Россия
(Поступило в Редакцию 22 декабря 1994 г.)

Обсуждаются динамические свойства магнитооптических датчиков магнитного поля, выполненных на базе ВсМПФГ, не содержащих быстрорелаксирующих ионов, с повышенным эффективным значением гиромагнитного отношения и с ромбической магнитной анизотропией.

Висмутсодержащие монокристаллические пленки феррит-гранатов (ВсМПФГ) используются в магнитооптических датчиках магнитного поля [1]. Часто такие датчики применяются для регистрации слабых медленно меняющихся магнитных полей, поэтому к их быстрдействию не предъявляют особых требований. Однако в некоторых случаях, например при регистрации достаточно мощных импульсов магнитного поля, формирующихся при образовании плазмы, высокое быстрдействие становится одним из важнейших требований.

Если действующее магнитное поле невелико, то динамическим параметром, лимитирующим быстрдействие, является подвижность доменных стенок (ДС), в то время как при достаточно большом магнитном поле (выше порогового поля срыва стационарного движения ДС) — предельная скорость ДС [1-4].

В настоящей работе проведено сравнительное исследование динамических свойств магнитооптических датчиков магнитного поля, выполненных на базе ВсМПФГ трех типов: 1) не содержащих быстрорелаксирующих ионов и обладающих вследствие этого малым затуханием и высокой подвижностью ДС; 2) обладающих повышенным эффективным значением гиромагнитного отношения γ (вблизи точки компенсации момента импульса); 3) обладающих ромбической магнитной анизотропией (РМА). Пленки двух последних типов имеют

Образец	1	2	3
<i>R</i>	Y, Gd	Tm, Gd	Y, Lu, Pr
Подложка	ГКМЦГГ	ГГГ	ГКМЦГГ
Ориентация	(111)	(111)	(210)
<i>h</i> , мкм	10.0	12.7	16.5
<i>W</i> , мкм	8.7	18.5	11.5
<i>l</i> , мкм	0.9	2.4	1.0
<i>H</i> ₀ , Э	32	32	63
4π <i>M</i> _s , Гс	58	82	103
<i>T</i> _{<i>N</i>} , К	412	433	405
<i>A</i> , 10 ⁻⁷ эрг/см	2.72	2.86	2.68
<i>H</i> _{<i>K</i>} , Э	7120	2700	1400
<i>K</i> _{<i>p</i>} / <i>K</i> _{<i>u</i>}	0.047	0.005	0.23
<i>K</i> ₁ / <i>K</i> _{<i>u</i>}	0.016	0.014	0.11
θ _{<i>u</i>} , град	0.86	1.1	9.8
<i>H</i> _{<i>c</i>} , Э	1.1	1.0	2.6
γ, 10 ⁷ Э ⁻¹ · с ⁻¹	1.8	> 10	1.9

повышенную предельную скорость ДС. Изучено также влияние на характеристики датчика постоянного магнитного поля, приложенного в плоскости пленки (планарное магнитное поле).

Статические магнитные параметры ВcМПФГ, включая толщину пленки *h*, равновесную ширину полосовых доменов *W*, поле коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) *H*₀, коэрцитивную силу *H*_{*c*}, температуру Нееля *T*_{*N*}, характеристическую длину *l*, намагниченность насыщения 4π*M*_{*s*} и константу обменного взаимодействия *A*, определяли с помощью стандартных методов [5,6]. Параметры магнитной анизотропии находили с помощью метода ориентационных фазовых переходов [7-9]. Для этого регистрировали ориентационные зависимости перпендикулярной *H*_{*b*}^{*}(φ) и планарной *H*_{*in*}^{*}(φ) составляющих критического магнитного поля, при котором зарождение доменной структуры в пленке происходит путем фазового перехода II рода. Из этих зависимостей находили соотношения одноосной *K*_{*u*}, ромбической *K*_{*p*} и кубической *K*₁ магнитной анизотропии, а также поле одноосной магнитной анизотропии *H*_{*K*} и угол θ_{*u*} отклонения оси легкого намагничивания от нормали к плоскости пленки.

Статические магнитные параметры и параметры магнитной анизотропии для некоторых исследованных образцов приведены в таблице. Образцами первого типа служили ВcМПФГ (Bi, Y, Gd)₃(Fe, Ga)₅O₁₂, выращенные на подложках (Gd, Ca)₃(Mg, Zr, Ga)₅O₁₂ (ГКМЦГГ) с ориентацией (111), второго типа — ВcМПФГ (Bi, Tm, Gd)₃(Fe, Ga)₅O₁₂, выращенные на подложках Gd₃Ga₅O₁₂ (ГГГ) с ориентацией (111) [10-15], третьего типа — ВcМПФГ (Bi, Y, Lu, Pr)₃(Fe, Ga)₅O₁₂, выращенные на подложках ГКМЦГГ с ориентацией (210) [14-18].

Динамические и амплитудные характеристики фотоотклика ВcМПФГ на импульсное магнитное поле измеряли с помощью уни-

веральной магнитооптической установкой [19]. Импульсное магнитное поле H_p прикладывали вдоль нормали к плоскости пленки. При необходимости соосно импульсному полю прикладывали поле смещения H_b , а перпендикулярно — постоянное планарное магнитное поле H_{in} . При $H_p \leq 20 \text{ Э}$ длительность фронта импульса магнитного поля $\tau_{f.p}$ составляла не более 5 нс, а при $H_p \leq 200 \text{ Э}$ она не превышала 10 нс.

Для изученного диапазона изменения H_p во всех исследованных датчиках магнитного поля изменение магнитного состояния ВСМПФГ происходило за счет движения ДС. Регистрируемые амплитудно-временные характеристики определялись, как правило, динамикой полюсовых доменов. Если амплитуда и длительность импульса магнитного поля были достаточны для намагничивания пленки до насыщения, происходили также коллапс ЦМД и зарождение доменов после окончания импульса.

Типичные сигналы фотоотклика для трех типов ВСМПФГ приведены на рис. 1. Видно, что для пленок с малым затуханием наклон начальной участка сигнала не зависит от амплитуды регистрируемого импульса магнитного поля (рис. 1,а), в то время как для пленок с повышенным гиромагнитным отношением (рис. 1,б) и для пленок с ромбической магнитной анизотропией (рис. 1,в) такая зависимость имеет место.

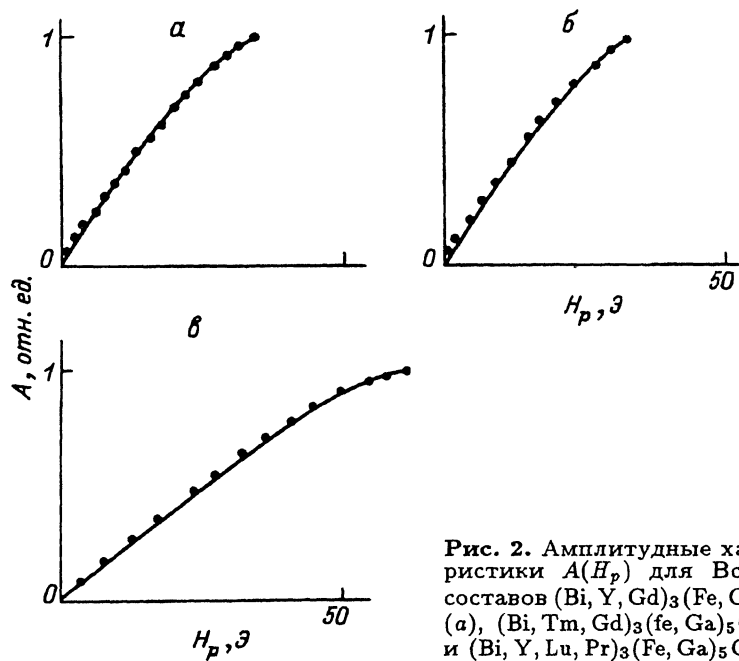
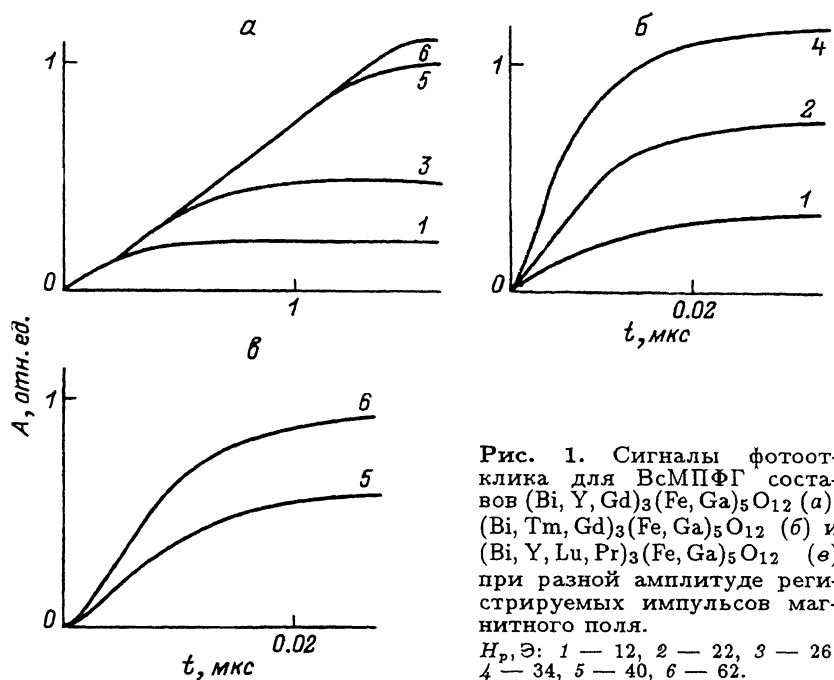
На рис. 2 приведены зависимости амплитуды сигнала фотоотклика от H_p (амплитудные характеристики). Видно, что для всех трех типов ВСМПФГ эти зависимости близки.

Зависимости длительности фронта сигнала* фотоотклика $\tau_{f.s}$ от амплитуды импульса магнитного поля H_p (динамические характеристики) показаны на рис. 3. Для ВСМПФГ с малым затуханием кривая $\tau_{f.s}(H_p)$ (рис. 3,а) подобна кривой $A(H_p)$ (рис. 2,а). Это связано с тем, что в пленках с малым затуханием скорость ДС V не зависит от амплитуды действующего магнитного поля (имеет место насыщение скорости ДС) [20–23].

Для ВСМПФГ с повышенным гиромагнитным отношением $\tau_{f.s}$ практически не зависит от H_p (рис. 3,б), хотя перемещение ДС линейно увеличивается с ростом амплитуды импульса магнитного поля (рис. 2,б). Такой ход зависимости $\tau_{f.s}(H_p)$ объясняется тем, что вблизи компенсации момента импульса скорость ДС увеличивается с ростом H_p по линейному закону [1,11,14], причем для выбранного образца с повышенным гиромагнитным отношением максимальная скорость ДС превышает 2000 м/с.

Аналогичная ситуация наблюдается и для ВСМПФГ с достаточно высокой РМА (рис. 3,в), где зависимость $V(H_p)$ также близка к линейной [4,7–10]. Заметим, что если РМА невелика, то $\tau_{f.s}$, как и на рис. 3,а, увеличивается с ростом H_p .

На рис. 4 приведены зависимости длительности фронта сигнала фотоотклика от планарного магнитного поля. Для ВСМПФГ с малым затуханием $\tau_{f.s}$ уменьшается с ростом H_{in} (рис. 4,а). Это обусловлено повышением предельной скорости срыва стационарного движения ДС. В ВСМПФГ с повышенным гиромагнитным отношением длительность фронта сигнала фотоотклика не зависит от H_{in} (рис. 4,б), поскольку планарное магнитное поле не влияет на предельную скорость ДС в них. Для пленок с РМА наблюдается небольшое снижение $\tau_{f.s}$ с ростом H_{in} (рис. 4,в). Это, по-видимому, связано не столько с ростом



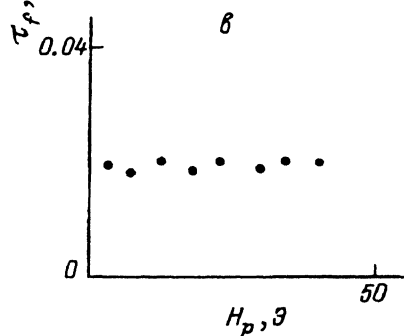
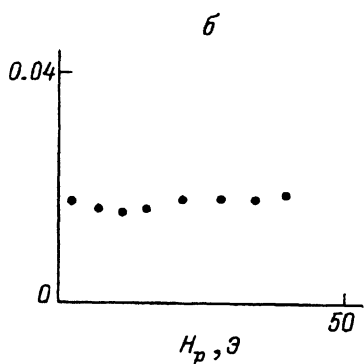
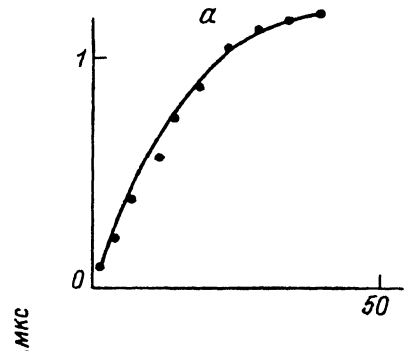


Рис. 3. Динамические характеристики $\tau_{f.s}(H_p)$ для ВcМПФГ составов $(\text{Bi, Y, Gd})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ (а), $(\text{Bi, Tm, Gd})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ (б) и $(\text{Bi, Y, Lu, Pr})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ (в).

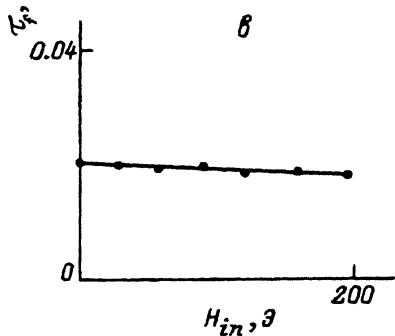
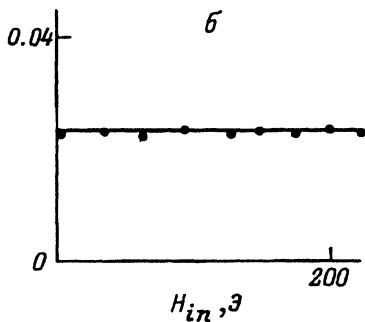
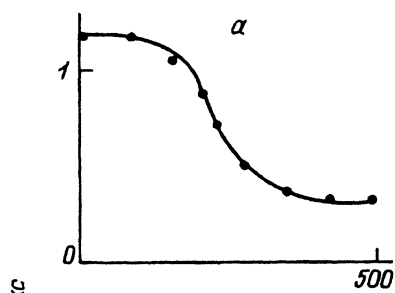


Рис. 4. Зависимости длительности фронта $\tau_{f.s}$ от напряженности планарного магнитного поля H_{in} для ВcМПФГ составов $(\text{Bi, Y, Gd})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ (а), $(\text{Bi, Tm, Gd})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ (б) и $(\text{Bi, Y, Lu, Pr})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ (в).

предельной скорости ДС, сколько ДС, сколько с повышением интенсивности процесса локального вращения намагниченности перед движущейся ДС, вызываемого излучаемыми ДС спиновыми волнами [21–24].

Таким образом, высокое быстродействие (длительность фронта сигнала фотоотклика менее 20 нс) магнитооптических датчиков магнитного поля обеспечивают как ВсМПФГ с повышенным гиромагнитным отношением, так и пленки с РМА. Недостатком первых является низкая термостабильность динамических параметров [14,15]. От этого во многом свободны ВсМПФГ с повышенным гиромагнитным отношением, содержащие в качестве быстрорелаксирующих ионы Eu^{3+} [25–27]. Недостатком ВсМПФГ с РМА по сравнению с двумя другими типами пленок является более высокая коэрцитивная сила, достигающая в некоторых случаях 10 Э и более, что, как следствие, снижает чувствительность датчиков магнитного поля.

Для магнитооптических датчиков магнитного поля желательно, чтобы ВсМПФГ удовлетворяли следующим требованиям [1]: высокая магнитооптическая добротность, высокая подвижность ДС, высокая предельная скорость ДС, низкая коэрцитивная сила, низкое поле насыщения (для датчиков слабых магнитных полей) и малый размер доменов. Последние два требования противоречивы, поскольку уменьшение размера доменов достигается прежде всего за счет повышения намагниченности насыщения, однако при этом возрастает и поле насыщения.

В ВсМПФГ с повышенным гиромагнитным отношением повышения намагниченности насыщения, которая в точке компенсации момента импульса равна суммарному магнитному моменту быстрорелаксирующих редкоземельных магнитных ионов, можно достичь лишь при введении в их состав быстрорелаксирующих редкоземельных магнитных ионов с высоким магнитным моментом, таких как Tb^{3+} , Dy^{3+} и Ho^{3+} . Однако ВсМПФГ с повышенным гиромагнитным отношением, содержащие тербий [28], диспрозий [29] и гольмий [30], обладают высоким затуханием, поэтому из-за низкой подвижности ДС в них нельзя достичь высокой скорости ДС. В ВсМПФГ с РМА существует возможность повышения намагниченности насыщения за счет снижения уровня замещения ионов Fe^{3+} ионами Ga^{3+} , однако при этом возможность получения достаточно высокой РМА и за счет этого высокой скорости ДС становится проблематичной.

Фарадеевское вращение в ВсМПФГ с РМА почти на порядок выше, чем в пленках с повышенным гиромагнитным отношением, что обусловлено повышенным содержанием висмута и меньшим уровнем замещения железа в первых. Повышение содержания висмута в ВсМПФГ с повышенным γ приводит к снижению $4\pi M_s$.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность М.В. Логунову и Ю.Н. Сажину за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Рандошкин В.В., Червоуенкис А.А. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- [2] Алейников А.Ф., Рандошкин В.В., Рудашевский Е.Г. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1209–1211.
- [3] Логинов Н.А., Мизайленко А.Н., Рандошкин В.В. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 5. С. 112–116.

- [4] *Randoshkin V.V.* // Proc. SPIE. 1990. Vol. 1307. P. 10-19.
- [5] *Рандошкин В.В., Старостин Ю.В.* // Радиоэлектроника за рубежом. М., 1982. № 18. С. 1-7.
- [6] Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / Под ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.
- [7] *Дикштейн И.Е., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Тарасенко В.В.* // Микроэлектроника. 1984. Т. 18. № 4. С. 337-347.
- [8] *Дикштейн И.Е., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Чижик Е.С.* Препринт ИРЭ АН СССР. № 17 (492). М., 1988. 28 с.
- [9] *Балбашов А.М., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г.* Препринт ИРЭ АН СССР. № 25 (500). М., 1988. 26 с.
- [10] *Рандошкин В.В., Сигачев В.Б.* // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. Вып. 1. С. 34-37.
- [11] *Randoshkin V.V.* // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1126. P. 103-110.
- [12] *Логунов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В.* // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 10. С. 58-63.
- [13] *Рандошкин В.В., Сигачев В.Б.* // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 1. С. 246-253.
- [14] *Рандошкин В.В.* Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. Тр. ИОФАН. Т. 35. М.: Наука, 1992. С. 49-107.
- [15] *Логунов Н.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 10. С. 180-183.
- [16] *Рандошкин В.В., Чани В.И., Логунов М.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 14. Вып. 14. С. 42-44.
- [17] *Клин В.П., Логунов М.В., Нам Б.П.* и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 14. Вып. 14. С. 79-84.
- [18] *Randoshkin V.V.* // Thin Film and Beam-Solid Interactions / Ed. L. Huang. Elsevier Science Publishers B.V., 1991. Vol. 4. P. 267-272.
- [19] *Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сигачев В.Б.* // ПТЭ. 1985. № 5. С. 246-247.
- [20] *Батмезузов В.Е., Ким Т.А., Рандошкин В.В.* и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1227-1230.
- [21] *Логунов М.В., Рандошкин В.В.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1237-1238.
- [22] *Randoshkin V.V., Logunov M.V.* // Thin Film and Beam-Solid Interactions / Ed. L. Huang. Elsevier Science Publishers B.V., 1991. Vol. 4. P. 273-278.
- [23] *Логунов М.В., Рандошкин В.В.* Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. Труды ИОФАН. Т. 35. М.: Наука, 1992. С. 107-122.
- [24] *Рандошкин В.В., Сигачев В.Б.* // ФТТ. 1986. Т. 28. Вып. 5. С. 1522-1525.
- [25] *Рандошкин В.В., Логунов М.В., Сажин Ю.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 4. С. 71-74.
- [26] *Chani V.I., Randoshkin V.V.* // Advances in Magneto-Optics II. Proc. 2nd Intern. Symp. Magneto-Optics. Fiz. Nizk. Temp., 1992. Vol. 18. Suppl. N 1. P. 221-224.
- [27] *Рандошкин В.В., Ефремов В.В., Шушеров Е.Э.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 2. С. 43-46.
- [28] *Рандошкин В.В., Ефремов В.В., Логунов М.В., Сажин Ю.Н.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 2. С. 28-32.
- [29] *Айрапетов А.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 4. С. 79-82.
- [30] *Айрапетов А.А., Логунов М.В., Рандошкин В.В.* и др. // ФТТ. 1992. Т. 34. Вып. 5. С. 1649-1651.