

$$\delta Q = dE + PdV = q_P dN + \left[N_0 \left(c_{\text{ж}} + P \frac{dv_{\text{ж}}}{dT} \right) + \right. \\ \left. + N \left(c_P - c_{\text{ж}} - \frac{q_P}{T - v_{\text{ж}} P} - P \frac{dv_{\text{ж}}}{dT} \right) \right] dT, \quad (9)$$

где δQ — количество поглощенного тепла, причем с помощью (1), (2) осуществлен переход к независимым переменным (T , N).

Можно показать, что обратная температура $1/T$ есть интегрирующий множитель пфаффово́й формы (9), как и для идеального газа. Благодаря этому рассматривавшиеся в [1-3] пфаффовы́ формы также имеют газовую температуру T интегрирующим делителем. Тем же свойством обладают и любые многопараметрические системы, состоящие из разделенных изотермическими перегородками однопараметрических подсистем, каждая из которых имеет температуру интегрирующим делителем.

Список литературы

- [1] Зильбергейт А. С., Скорняков Г. В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 16. С. 87—90.
- [2] Зильбергейт А. С., Скорняков Г. В. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 3. С. 92—93.
- [3] Зильбергейт А. С., Скорняков Г. В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 12. С. 1—8.
- [4] Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
- [5] Киттель Ч. Статистическая термодинамика. М.: Наука, 1977. 336 с.
- [6] Шредингер Э. Статистическая термодинамика. М.: ИЛ, 1948. 88 с.
- [7] Базаров И. П. Термодинамика. М.: Высшая школа. 1983. 344 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
12 марта 1991 г.

05; 09

Журнал технической физики, т. 61, в. 10, 1991

© 1991 г.

О ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ С ВЫСОКИМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

Н. А. Логинов, М. В. Логунов, В. В. Рандошкин, Ю. Н. Сажин

Одной из важных задач прикладной магнитооптики является повышение быстродействия таких устройств, как магнитооптические управляемые транспаранты (МОУТ) [1]. Эту задачу можно решить путем использования в МОУТ висмутсодержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов (ВсМПФГ) с высокой скоростью доменных стенок (ДС). К числу таких материалов относятся ВсМПФГ с компенсацией момента импульса (КМИ) [2-6], а также ВсМПФГ с орторомбической анизотропией [7-11].

Параметры Вс—МПФГ при комнатной температуре

Номер образца	Состав	Подложка	Ориентация	μ , МКМ	μ_0 , МКМ	$H_{\text{с}}$, Э	γ , МКМ	$4\pi M_s$, Гс	H_k , кЭ	T_N , К	g
1	(Tm, Bi) ₃ (Fe, Ga) ₅ O ₁₂	ГГГ	(111)	3.62	9.7	34	1.51	140	2.86	369	5.0
2	(Gd, Tm, Bi) ₃ (Fe, Ga) ₅ O ₁₂	ГГГ	(111)	15.6	12.6	86	1.25	152	2.32	424	4.7
3	(Y, Lu, Pr, Bi) ₃ (Fe, Ga) ₅ O ₁₂	ГКМЦГГ	(210)	9.2	13.9	26	1.79	70	2.68	404	1.8
4	»	ГКМЦГГ	(210)	13.1	22.0	33	2.92	94	5.0	428	1.8

В настоящей работе изучено влияние температуры T на параметры этих двух классов пленок. В качестве образцов с КМИ были выбраны ВсМПФГ состава $(Tm, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ и $(Gd, Tm, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$, выращенные методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на подложках $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ) с ориентацией (111). Выбор этих пленок обусловлен тем, что ионы Tm^{3+} среди быстрорелаксирующих ионов обладают наименьшим затуханием, что позволяет получить в этих пленках достаточно высокую (~ 10 м/с·Э) подвижность ДС [3, 5, 6]. В качестве образцов с ромбической анизотропией были выбраны ВсМПФГ состава $(Y, Lu, Pr, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с разным содержанием празеодима и галлия. Эти пленки выращивали на подложках $(Gd, Ca)_3(Mg, Zr, Ga)_5O_{12}$ (ГКМЦГГ) с ориентацией (210). При такой ориентации подложки эпитаксиальные пленки обладают более высоким структурным совершенством, чем при чаще используемой ориентации (110) [7, 8].

Параметры некоторых исследованных образцов приведены в таблице, где h — толщина пленки, w — равновесная ширина полосовых доменов, H_0 — поле

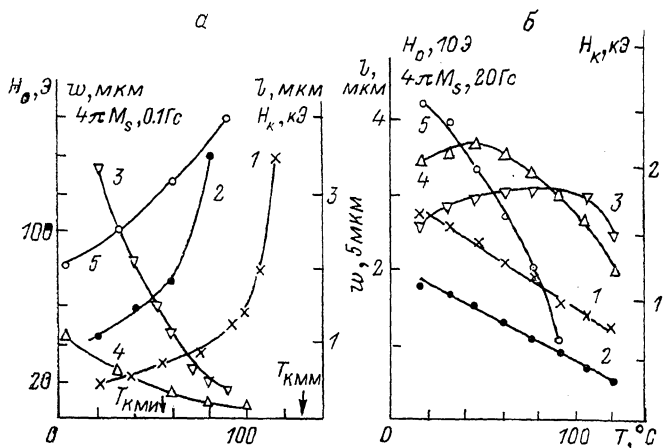


Рис. 1. Температурные зависимости равновесной ширины полосовых доменов w (1), характеристической длины l (2), поля коллапса ЦМД H_0 (3), намагниченности насыщения $4\pi M_s$ (4) и поля одноосной анизотропии H_k (5) для образцов 2 (а), 3 (б).

коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД), l — характеристическая длина материала, $4\pi M_s$ — намагниченность насыщения, H_k — поле одноосной анизотропии, T_N — температура Нееля, g — фактор Ланде. Значение g для ВсМПФГ с ромбической анизотропией определяли по данным ферромагнитного резонанса, а для ВсМПФГ с КМИ также и по зависимости скорости ДС v от продвигающего поля H [3]. Поле одноосной анизотропии находили с помощью метода фазовых переходов [12]. Остальные параметры измеряли стандартными методами; толщину h — интерференционным методом, w и H_0 — с помощью поляризационного микроскопа, значение T_N принимали равным температуре, при которой исчезает контраст доменной структуры, характеристическую длину l рассчитывали по данным w и h , намагниченность насыщения $4\pi M_s$ — по данным H_0 , l и h .

Температурные зависимости w , l , H_0 , $4\pi M_s$ и H_k приведены на рис. 1. Для ВсМПФГ с КМИ характерно увеличение w с ростом T (рис. 1, а). Это является положительным свойством с точки зрения использования ВсМПФГ в МОУТ, поскольку при нагревании пленки отсутствует нежелательный эффект [13] — потеря монодоменного состояния ячеек МОУТ. Для ВсМПФГ с орторомбической анизотропией этот нежелательный эффект имеет место (рис. 1, б).

Значения температурных коэффициентов параметров рассчитывали как

$$A_T = A^{-1}(\Delta A/\Delta T) \times 100\%,$$

где A — значение параметра при температуре T , $\Delta A/\Delta T$ — температурная производная параметра при этой температуре ($\Delta T = 20$ К).

Для образца 2 в диапазоне температур 20—80 °С температурные коэффициенты параметров составляют 0.6...2.5 (w), -1.5...-2.9 (H_0), -1.3...-1.6 (M_0), 0.74...0.83 (H_k), для образца 3 соответственно 0.53...0.78, 0.6...0.9, 0.47...-0.62, -1.1...-2.6. В целом ВсМПФГ с ромбической анизотропией

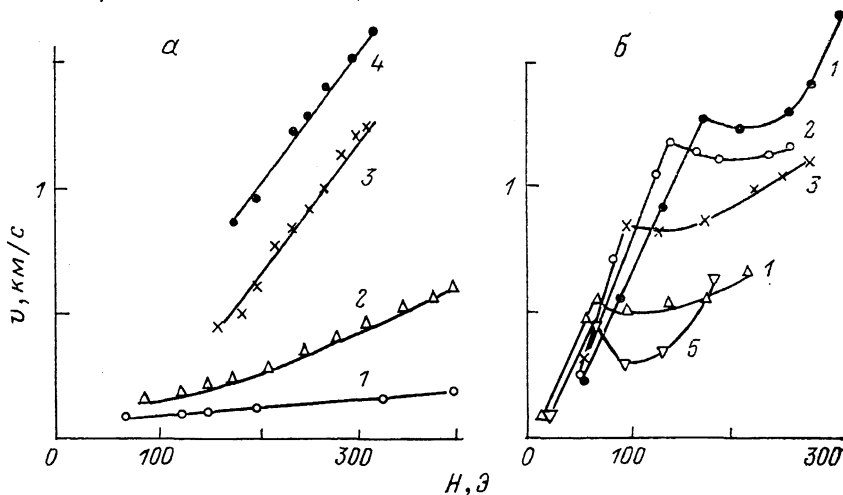


Рис. 2. Зависимости скорости ДС v от действующего магнитного поля H при нескольких фиксированных значениях T для образцов 2 (а) и 3 (б).

а: 1 — 20.3, 2 — 36.7, 3 — 67, 4 — 56 °С; б: 1 — 15, 2 — 40, 3 — 60, 4 — 80, 5 — 100 °С.

характеризуются лучшей термостабильностью статических магнитных параметров, чем пленки с КМИ.

Динамику доменных стенок (ДС) в ВсМПФГ исследовали с помощью метода выскоростной фотографии на универсальной магнитооптической установке [14]. В малых действующих магнитных полях ($H \leq 100$ Э) изучали расширение

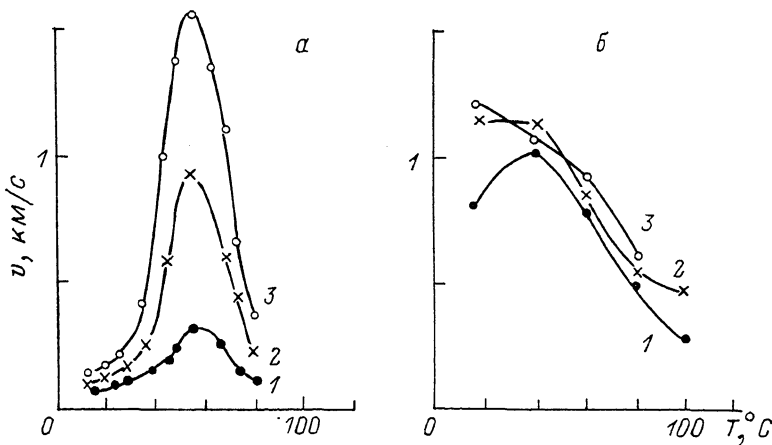


Рис. 3. Зависимости скорости ДС v от температуры T при различных значениях действующего магнитного поля H для образцов 2 (а), 3 (б).

а: 1 — 80, 2 — 200, 3 — 300 Э; б: 1 — 100, 2 — 140, 3 — 190 Э.

ЦМД под действием импульса магнитного поля. В полях $H \geq 100$ Э наблюдали движение ДС домена с обратной намагниченностью (ДОН), зарождающегося при импульсном перемагничивании ВсМПФГ из насыщенного состояния. В последнем случае точность измерения скорости ДС повышается до 2—3 %.

На рис. 2 приведены зависимости скорости ДС от действующего магнитного поля при нескольких значениях температуры. Для ВсМПФГ с КМИ кривые $v(H)$ при $T \sim T_{\text{КМИ}}$ для пленок без (образец 1) и с гадолинием (образец 2) от-

личаются слабо. Однако по мере увеличения отклонения температуры от точки КМИ для VсМПФГ состава $(\text{Gd}, \text{Tm}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ (рис. 2, б) наблюдается более резкое уменьшение скорости ДС, чем для пленок, не содержащих Gd^{3+} . Это объясняется более сильной температурной зависимостью магнитного момента ионов Gd^{3+} по сравнению с ионами Fe^{3+} .

Сравнение двух образцов VсМПФГ с ромбической анизотропией (образцы 3, 4) показывает, что кривые $v(H)$ для них сильно отличаются. В частности, максимальные значения v для них различаются более, чем на порядок. Для образца 4 наблюдается насыщение скорости ДС на уровне 40—60 м/с, причем при фиксированном H скорость ДС монотонно уменьшается с температурой. Для образца 3 (рис. 2, б) на кривой $v(H)$ наблюдается пик. С ростом T этот пик смещается в сторону меньших действующих полей, а пиковое значение скорости ДС снижается. Подвижность ДС в Pr-содержащих пленках достаточно слабо изменяется с температурой (рис. 2, б).

На рис. 3 приведены зависимости $v(T)$ при нескольких фиксированных значениях H . Для VсМПФГ с КМИ эти зависимости имеют максимум при $T = T_{\text{КМИ}}$, причем максимальное значение скорости ДС тем выше, чем больше H (рис. 3, а). «Резонансный» вид кривых $v(H)$ для этих пленок обуславливает меньшую термостабильность скорости ДС по сравнению с VсМПФГ с ромбической анизотропией (рис. 3, б). Немонотонность кривых $v(T)$ для образца 3 обусловлена наличием пика на кривых $v(H)$ и его смещением при изменении температуры (рис. 2, б).

В целом результаты, приведенные в настоящей работе, свидетельствуют о лучшей термостабильности как статических, так и динамических параметров VсМПФГ с ромбической анизотропией по сравнению с пленками, обладающими точкой КМИ.

Список литературы

- [1] Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [2] Заболотная Н. В., Осико В. В., Рандошкин В. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 13. С. 788—792.
- [3] Рандошкин В. В., Сигачев В. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. Вып. 1. С. 34—37.
- [4] Логинов Н. А., Рандошкин В. В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 4. С. 773—777.
- [5] Логинов Н. А., Логунов М. В., Рандошкин В. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 10. С. 58—63.
- [6] Рандошкин В. В., Сигачев В. Б. // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 1. С. 246—253.
- [7] Hibiya T., Makino H., Konishi S. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 12. P. 7347—7352.
- [8] Рандошкин В. В., Сигачев В. Б., Чани В. И., Червоненкис А. Я. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 7. С. 70—76.
- [9] Клиш В. П., Логунов М. В., Нам Б. П. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 14. С. 79—84.
- [10] Боков В. А., Волков В. В., Петриченко Н. Л. и др. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 11. С. 310—311.
- [11] Логунов М. В., Рандошкин В. В., Сажин Ю. Н. // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 5. С. 1456—1460.
- [12] Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г., Чижик Е. С. // Препринт ИРЭ АН СССР. № 17 (492). М., 1988. 28 с.
- [13] Ануфриев А. Н., Бондарь С. А., Кожухарь С. А. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 3. С. 621—623.
- [14] Логунов М. В., Рандошкин В. В., Сигачев В. Б. // ПТЭ. 1985. № 5. С. 247—248.

Институт общей физики АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
12 июня 1990 г.
В окончательной редакции
4 февраля 1991 г.