

- [1] Larsson A., Salzman J., Mittelstein M., Yariu A. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. N 1. P. 66–68.
- [2] Chang-Hasnain C.J., Eli Karon, Colas E. // IEEE J. Quant. Electron. 1990. Vol. 26. N 10. P. 1713–1716.
- [3] Гаприлов Г.А., Помизуев Ю.Г., Сотникова Г.Ю., Тер-Мартirosян А.Л. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 17. Вып. 23. С. 1–5.
- [4] Сойер Р. Экспериментальная спектроскопия. М.: ИЛ, 1953. 366 с.
- [5] Проспект НПО “Электрон”. 1994.

05;09

Журнал технической физики, т. 66, в. 4, 1996

## ВЛИЯНИЕ ПРАЗЕОДИМА НА ДИНАМИКУ ДОМЕННЫХ СТЕНОК В ПЛЕНКАХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ С РОМБИЧЕСКОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© В.В.Рандошкин, М.В.Логунов, Ю.Н.Сажин

Совместная хозрасчетная лаборатория “Магнитооптоэлектроника”  
Института общей физики РАН при Мордовском государственном  
университете им. Н.П.Огарева,  
430000 Саранск, Россия  
(Поступило в Редакцию 18 апреля 1994 г.  
В окончательной редакции 16 декабря 1994 г.)

Висмутсодержащие монокристаллические пленки феррит-гранатов ( $\text{VсМПФГ}$ ) с ромбической магнитной анизотропией (РМА) являются перспективными материалами для устройств типа магнитооптических управляемых транспарантов (МОУТ) [1–5]. Переключение светоклапанных ячеек в МОУТ может обеспечиваться полностью за счет движения доменных стенок (ДС) [1,6–9]. В альтернативном варианте на начальной стадии переключения происходит зарождение домена с обратной намагниченностью (ДОН) путем вращения намагниченности [10–14]. Высокое быстродействие МОУТ может быть реализовано при использовании в них иттрийсодержащих  $\text{VсМПФГ}$  с ориентацией (210) [3,15].

В настоящей работе проведено сравнение динамических свойств таких пленок, содержащих празеодим и без него.  $\text{VсМПФГ}$  составов  $(\text{Y,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  и  $(\text{Pr,Y,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  выращивали на подложках  $(\text{Gd,Ca})_3(\text{Mg,Zr,Ga})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (210) методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на основе  $\text{PbO-V}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$ . О величине РМА судили по максимальному  $H_{\text{max}}$  и минимальному  $H_{\text{min}}$  значениям постоянного магнитного поля, приложенного в плоскости пленки, при котором исчезает доменная структура. В работе обсуждаются результаты исследования образцов, параметры которых приведены в таблице, где  $h$  — толщина пленки,  $W$  — равновесная ширина полосовых доменов,  $H_0$  — поле коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД),  $l$  — характеристическая длина,  $4\pi M_s$  — намагниченность насыщения,  $\alpha$  — безразмерный параметр затухания Гильберта. Заметим, что для оценки значений  $l$  и  $4\pi M_s$  использовали

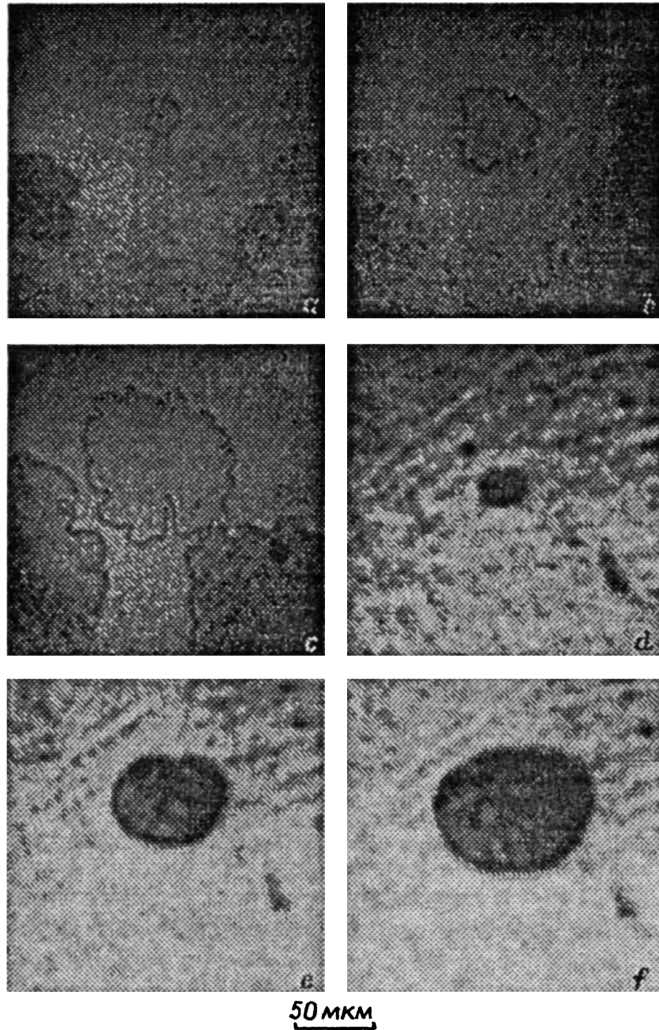
| R  | Y, Pr          | Y              |
|--|----------------|----------------|
| $h$ , мкм                                  | 7.3            | 13.1           |
| $W$ , мкм                                  | 16.3           | 18.6           |
| $H_0$ , Э                                  | 20.8           | 32.6           |
| $l$ , мкм                                  | 2.2            | 2.4            |
| $4\pi M_s$ , Гс                            | 59             | 72             |
| $\alpha$                                   | $\geq 10^{-1}$ | $\leq 10^{-2}$ |
| $H_{min}$ , Э                              | 2000           | 8400           |
| $H_{max}$ , Э                              | 4800           | > 9000         |
| $2(H_{max} - H_{min})/(H_{max} + H_{min})$ | 0.79           | > 0.17         |

теории полосовых доменов и ЦМД, разработанные для чисто одноосных пленок (без РМА). Из таблицы видно, что Rг-содержащая пленка обладает немного меньшей намагниченностью насыщения, чем пленка без празеодима.

Динамику ДС исследовали по методу [16] на установке высокоскоростной фотографии с временем однократной экспозиции  $\sim 5$  нс. В исходном состоянии ВсМПФГ намагничивали до насыщения постоянным магнитным полем  $H_b$ , приложенным вдоль нормали к плоскости пленки. Импульсное магнитное поле  $H_p$  прикладывали в противоположном направлении. Домен, скорость перемещения ДС которого измеряли, зарождался на точечном дефекте.

Введение в состав ВсМПФГ празеодима привело к многократному снижению одноосной магнитной анизотропии, поскольку в ВсМПФГ (Rг,Y,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> даже при меньшей намагниченности насыщения поле одноосной магнитной анизотропии оказалось примерно втрое ниже, чем в пленках (Y,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (ср. значения  $H_{min}$  в таблице). Для ВсМПФГ без празеодима  $H_{max}$  выходило за пределы возможностей магнитооптического анизометра, поэтому полностью обоснованный о влиянии Rг на РМА примерно в 5 раз. Отрицательный вклад в одноосную магнитную анизотропию, обусловленный введением в состав ВсМПФГ празеодима, подтверждается результатами измерений с помощью метода ферромагнитного резонанса [17]. Однако заметим, что такое снижение имеет место только при вхождении ионов Rг<sup>3+</sup> в эпитаксиальную пленку вместе со сферически симметричными ионами (Y<sup>3+</sup>, Bi<sup>3+</sup>, Ga<sup>3+</sup>), поскольку в пленках Rг<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>O<sub>12</sub> одноосная магнитная анизотропия практически отсутствует [18].

Характерные формы расширяющихся ДОН для обоих образцов приведены на рис. 1. Видно, что для обоих случаев форма ДОН отличается от цилиндрической, поэтому скорость ДС измеряли вдоль направления, где она максимальна. Для ВсМПФГ (Rг,Y,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (рис. 1, а-с) искажение формы динамической ДС ярко выражено, причем амплитуда искажений увеличивается со временем. В эксперименте не удалось обеспечить условия, при которых плотность центров зародышеобразования была бы малой, поэтому со временем с периферии освещенной области прорастают другие ДОН. Для ВсМПФГ (Y,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> динамическая ДС искажается слабее (рис. 1, d-f).



50 мкм

Рис. 1. Динамические ДОН в ВсмПФГ  $(Pr, Y, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$  при  $H = 60$  Э (a-c) и  $(Y, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$  при  $H = 196$  Э (d-f) в различные моменты времени после приложения импульса магнитного поля.

a — 0.05, b — 0.07, c — 0.09, d — 0.18, e — 0.43, f — 0.63 мкс.

На рис. 2 для обоих образцов приведены зависимости скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H = H_p - H_b$ . Для ВсмПФГ  $(Pr, Y, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$  (рис. 2, кривая 1) кривая  $V(H)$  на первый взгляд имеет классический вид, т. е. после начального линейного участка наблюдается пик, за которым следует участок “насыщения”, характеризующийся дифференциальной подвижностью ДС, много меньшей начальной [19]. Однако первый участок, наблюдающийся в эксперименте (рис. 2, кривая 1), не является начальным [20], поскольку в середине этого “линейного” участка ДС расширяющегося ДОН испытывает нерегулярные искажения, не повторяющиеся от импульса к импульсу (рис. 1, a-c). Участок кривой 1 на рис. 2, где наблюдаются такие

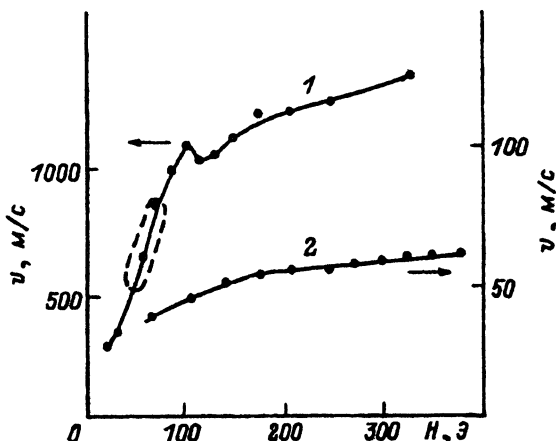


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для ВcМПФГ  $(\text{Pr}, \text{Y}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  (1) и  $(\text{Y}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  (2).

искажения, обведен штриховой линией. Заметим, что аналогичным искажениям, наблюдающимся в ВcМПФГ с повышенным гиромангнитным отношением, соответствовал не начальный линейный, а следующий участок кривой  $V(H)$  [21]. Используемый метод [16] не позволяет проводить исследования в слабых полях  $H$ , однако в этом неисследованном диапазоне следует ожидать обнаружения истинного начального участка, соответствующего стационарному движению ДС.

Для ВcМПФГ  $(\text{Y}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  начальный линейный участок кривой  $V(H)$  тем более не должен наблюдаться, поскольку из-за отсутствия в составе пленки быстрорелаксирующих ионов пороговое поле срыва стационарного движения ДС должно быть сравнимо с коэрцитивной силой ( $\sim 1$  Э). В связи с этим кривая 2 на рис. 2 также представляет собой такой же участок, как следующий за пиком на кривой 1 (рис. 2). Неожиданной является высокая дифференциальная подвижность в диапазоне полей  $H = 100-200$  Э. В соответствии с теорией [19] при отсутствии в составе ВcМПФГ быстрорелаксирующих ионов безразмерный параметр затухания Гильберта должен быть предельно малым и, как следствие, мала дифференциальная подвижность ДС, что экспериментально наблюдалось в ВcМПФГ аналогичного состава без РМА [22-24].

Основным различием кривых 1 и 2 на рис. 2 является большая разница максимальных значений  $V$  (примерно в 20 раз), которая значительно превосходит возможное различие в параметрах РМА. Причина такого повышения быстродействия в ВcМПФГ  $(\text{Pr}, \text{Y}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  в настоящее время не понятна. К этому могло бы приводить повышенное эффективное значение гиромангнитного отношения [1, 15, 24], которое можно ожидать для празеодимсодержащих пленок, так как ион  $\text{Pr}^{3+}$  является быстрорелаксирующим. Однако в исследованных образцах уровень замещения железа галлием был недостаточен для компенсации магнитных моментов тетра- и октаэдрической подрешеток в структуре граната и, как следствие, компенсации момента импульса.

Увеличение параметра затухания при введении в состав ВcМПФГ быстрорелаксирующих ионов  $\text{Pr}^{3+}$  (см. таблицу) не должно приводить

к повышению максимальной скорости ДС, поскольку параметр затухания влияет только на подвижность ДС [1,15], тогда как предельная скорость срыва стационарного движения ДС пропорциональна  $4\pi M_s$ . Пониженное значение намагниченности насыщения в празеодимсодержащих пленках не может объяснить наблюдающееся в эксперименте соотношение скоростей (рис. 2).

По-видимому, повышение скорости ДС обусловлено локальным вращением намагниченности вблизи движущейся ДС, вызываемым излучением ею спиновых волн [1,15,26]. В одноосных пленках этот эффект имеет место в диапазоне действующих магнитных полей, ограниченных как снизу, так и сверху [22,27]. Поскольку приложение постоянного планарного магнитного поля  $H_{in}$  приводит к смещению границ этого диапазона [22,28], то можно предположить, что в пленках с РМА должен иметь место аналогичный эффект. В  $VсМПФГ (Y,Vi)_3(Fe,Ga)_5O_{12}$ , где РМА относительно мала, а одноосная магнитная анизотропия, наоборот, велика (см. таблицу), в исследованном диапазоне полей локальное вращение намагниченности вблизи ДС не должно иметь место, поскольку пороговое поле для такого вращения близко к  $H_{min}/3$ . В то же время введение в состав  $VсМПФГ$  празеодима, вызывающее как снижение одноосной магнитной анизотропии, так и значительное возрастание РМА, приводит к тому, что локальное вращение намагниченности вблизи движущейся ДС вследствие излучения ею спиновых волн становится весьма вероятным. Постепенное видоизменение формы кривой  $V(H)$  в  $VсМПФГ$  с малым затуханием по мере увеличения планарного магнитного поля [22,28] от характерной для пленок с  $\alpha \sim 10^{-3}$  [23] до той, которая похожа на кривую  $V(H)$  для пленок с  $\alpha \geq 1$  [15,24], вынуждает нас сделать вывод, что по мере роста  $H_{in}$  параметр затухания  $VсМПФГ$  изменяется. В исследованном диапазоне действующих магнитных полей (для слабых полей наблюдается обратный эффект [29]) приложение постоянного магнитного поля в плоскости пленки приводит к повышению параметра затухания [22,28]. Такое же повышение параметра затухания следует ожидать и для пленок с РМА. Как следствие, из-за малой глубины затухания спиновых волн в пленках с РМА, даже не содержащих быстрорелаксирующих ионов, эффект генерации микродоменов вблизи движущейся ДС не наблюдается [30], как он не наблюдается и для исследованных  $VсМПФГ (Pr,Y,Vi)_3(Fe,Ga)_5O_{12}$  (рис. 1). Тем не менее в последних вызываемый локальным вращением намагниченности перед движущейся ДС эффект резкого повышения скорости ДС с ростом действующего магнитного поля [25] имеет место.

Таким образом, в настоящей работе показано, что введение празеодима в состав иттрийсодержащих  $VсМПФГ$  с РМА приводит к повышению скорости ДС более, чем на порядок. При этом возрастают искажения формы движущейся ДС.

#### Список литературы

- [1] Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- [2] Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. М.: Наука, 1992. Тр. ИОФАН. Т. 35. С. 123-135.
- [3] Рандошкин В.В., Чани В.И., Логунов М.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 14. С. 42-44.

- [4] *Клиш В.П., Логунов М.В., Нам Б.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 14. С. 79–84.*
- [5] *Chervonenkis A.Ya., Kirukhin N.N., Randoshkin V.V., Airapetov A.A. // Advances in Magneto-Optics II. Proc. II Intern. Symp. Magneto-Optics. Fiz. Nizk. Temp. 1992. Vol. 18. Suppl. N S1. P. 217–220.*
- [6] *Клиш В.П., Нам Б.П., Павлов В.Т. и др. // Электронная техника. Сер. Материалы. 1981. № 12. С. 20–22.*
- [7] *Губарев А.П., Рандошкин В.В., Сизгачев В.Б., Червоненкис А.Я. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1393–1399.*
- [8] *Рандошкин В.В., Рыбак В.И., Сизгачев В.Б. и др. // Микроэлектроника. 1986. Т. 15. № 1. С. 16–24.*
- [9] *Логунов М.В., Рандошкин В.В., Сажин Ю.Н. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 4. С. 205–207.*
- [10] *Hill B. // J. Non-Cryst. Sol. 1982. Vol. 47. N 2. P. 227–228.*
- [11] *Ross W. // Proc. SPIE. 1983. Vol. 338. P. 162–168.*
- [12] *Hansen P., Hill B., Toksodorf W. // Phill. Techn. Rev. 1983/1984. Vol. 41. N 2. P. 33–45.*
- [13] *Ross W.E., Cox D.L., Shapp K.M. // Proc. SPIE. 1983. Vol. 386. P. 99–105.*
- [14] *Fedely J.M., Delaye M.T., Jouve H., Risela C. // IEEE Trans. Magn. Vol. MAG-20. N 5. P. 1019–1021.*
- [15] *Рандошкин В.В. // Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. М.: Наука, 1992. Труды ИОФАН. Т. 35. С. 49–107.*
- [16] *Рандошкин В.В. Патент РФ. № 1788523. МКИ. № G11C 11/14.*
- [17] *Рандошкин В.В., Зюзин А.М., Радайкин В.В. Новые магнитные материалы микроэлектроники. Тез. докл. XIV Школы-семинара. 1994. Ч. 1. С. 85–86.*
- [18] *Рандошкин В.В., Чани В.И., Козлов В.И., Васильева Н.В. // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Тез. докл. XII Всесоюз. школы-семинара. 1990. Ч. 1. С. 33–34.*
- [19] *Малозёмов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982. 382 с.*
- [20] *Рандошкин В.В., Сизгачев В.Б. // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 1. С. 246–253.*
- [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 Sci. Publ. B.V., 1991. Vol. 4. P. 273–278.*
- [23] *Логунов М.В., Рандошкин В.В. Магнитооптические пленки феррит-гранатов и их применение. М.: Наука, 1992. Труды ИОФАН. Т. 35. С. 107–122.*
- [24] *Randoshkin V.V. // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1126. P. 103–110.*
- [25] *Мартынов А.Ф., Рандошкин В.В., Телеснин Р.В. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 3. С. 803–806.*
- [26] *Рандошкин В.В., Сизгачев В.Б. // ФТТ. 1986. Т. 28. Вып. 5. С. 1522–1525.*
- [27] *Логунов М.В., Рандошкин В.В. // Доменные и магнитооптические запоминающие устройства. Тез. докл. Всесоюзн. школы-семинара. Тбилиси: Мецниераба, 1987. С. 147–148.*
- [28] *Рандошкин В.В., Логунов М.В. // ФТТ. 1994. Т. 36. В печати.*
- [29] *Боков В.А., Волков В.В., Петриченко Н.Л., Марышко М. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 22. С. 89–93.*
- [30] *Рандошкин В.В., Сизгачев В.Б., Чани В.И., Червоненкис А.Я. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 7. С. 70–76.*