

05; 06; 12

© 1990 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ВИСМУТСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ

*Н. А. Логинов, М. В. Михайленко, В. В. Рандошкин,  
В. Д. Тронько, Н. В. Шиманская, В. И. Чани*

Проведены исследования динамических свойств магнитооптических модуляторов, изготовленных из  $\text{Vi}$ -содержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов. Определено время перехода доменной структуры в новое состояние равновесия для нескольких конкретных образцов в присутствии постоянного магнитного поля в плоскости пленки, что позволяет значительно расширить динамический диапазон магнитооптических модуляторов.

Основные требования к магнитным материалам, используемым в фарадеевских модуляторах, сводятся к следующему: материал должен обладать как можно более высокими значениями магнитооптической (МО) добротности  $\psi$ , подвижности доменных стенок (ДС)  $\mu$  и предельной скорости движения ДС  $v_p$ , а также малыми значениями поля насыщения  $H_{\text{нас}}$  и равновесной ширины доменов  $W_0$  в отсутствие внешнего магнитного поля [1]. Последние два требования противоречивы, поскольку снижение  $W_0$ , как правило, достигается увеличением намагниченности насыщения  $4\pi M$  и, следовательно, ростом  $H_{\text{нас}}$ . Высокую МО добротность в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах можно получить в висмутсодержащих монокристаллических пленках феррит-гранатов (МПФГ), выращиваемых методом жидкофазной эпитаксии на подложках из немагнитных гранатов [2, 3], что обуславливает перспективность использования этих материалов в фарадеевских модуляторах.

Настоящая работа посвящена исследованию динамических свойств МО модуляторов, изготовленных на основе  $\text{Vi}$ -содержащих МПФГ. Принцип действия модуляторов основан на движении ДС под действием импульсного магнитного поля  $H_n$ , приложенного перпендикулярно плоскости пленки. В эксперименте измеряли время перехода ДС в новое состояние равновесия  $\tau_\phi$  после приложения импульса магнитного поля. Изучалось также влияние на  $\tau_\phi$  постоянных магнитных полей:  $H_{\text{см}}$ , приложенного перпендикулярно плоскости пленки, и  $H_{\text{пл}}$ , приложенного в плоскости пленки. Если поля  $H_{\text{см}}$  и  $H_n$  приложены в одном направлении, то увеличение  $H_{\text{см}}$  приводит к уменьшению ширины «невыгодно» намагниченных доменов, а также снижению за счет этого  $\tau_\phi$  и одновременному уменьшению величины глубины модуляции. При уменьшении  $H_{\text{см}}$  глубина модуляции растет, но увеличивается  $\tau_\phi$ . Приложение  $H_{\text{пл}}$ , вообще говоря, приводит к росту  $v_p$  [4], что должно способствовать уменьшению  $\tau_\phi$ .

В процессе исследований регистрировали интегральные характеристики импульсного перемagnetизирования [5, 6] на установке, позволяющей создать с помощью катушек Гельмгольца диаметром 2 мм импульсы магнитного поля амплитудой до 40 кА/м и длительностью 200 нс, при длительности фронта импульса  $\sim 5$  нс. Результаты измерений усреднялись по площади образца, так как в поле зрения попадало несколько доменов (с учетом дефектности из расчета не менее 1 дефекта на  $5 \text{ м}^2$ ). Для регистрации фотоотклика МО системы на импульс

Состав	$h$ , мкм	$W_0$ , мкм	$4\pi M$ , Гс	$H_k$ , кА/м	$H_{нас}$ , кА/м	$T_N$ , °С	$Q_F \cdot 10^3$ , град/см	$\nu$ , см/с · Э	$\gamma \cdot 10^{-7}$ , Э · с	$K$ , мкм/Э
A	9.64	7.76	278.6	310.4	12.7	185	16.8	10000	1.79	0.078
B	6.54	8.41	160.7	184.7	5.3	136	6.96	300	1.09	0.120
B	7.58	8.51	105.4	120.2	3.9	161	2.70	900	4.03	0.107

магнитного поля использовали ФЭУ-79 с усилителем, обеспечивающим полосу рабочих частот 40 МГц.

В модуляторе использовали МПФГ составов  $(BiY)_3(FeGa)_5O_{12}$  (A) [7],  $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$  (B) [8] и  $(BiGdTm)_3(FeGa)_5O_{12}$  (B) [9] с ориентацией (111). При выборе МПФГ руководствовались следующими соображениями. Пленки состава A не содержали в своем составе быстрорелаксирующих ионов и обла-

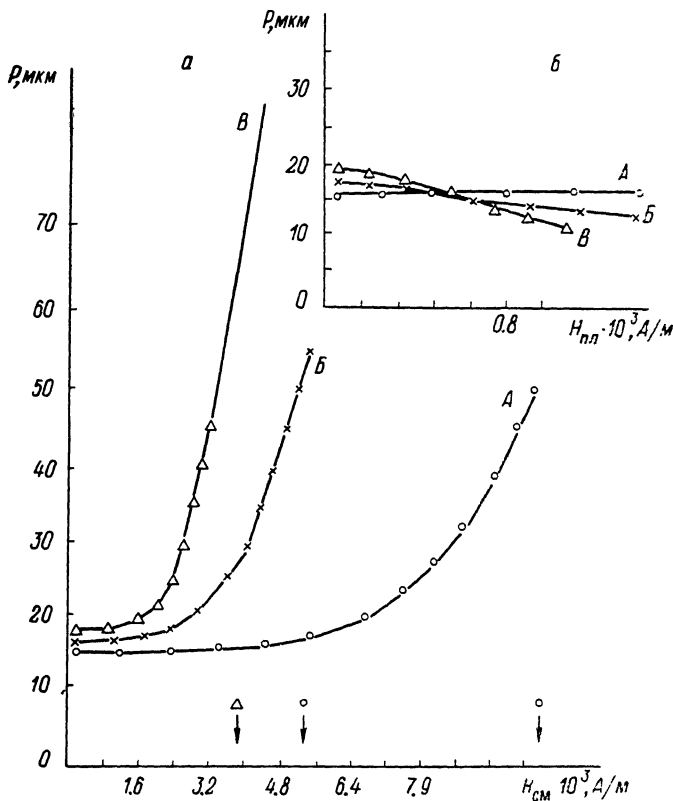


Рис. 1. Зависимости периода доменной структуры  $P$  для МПФГ составов A, B, B от величины постоянного магнитного поля  $H_{см}$  (a) и постоянного магнитного поля  $H_{нх}$  (б).

дали вследствие этого большим значением  $\mu$ . МПФГ составов A и B имели низкие значения  $4\pi M$  и, следовательно, малые значения  $H_{нас}$ . Пленки состава B обладали высокой скоростью  $\nu_p$  из-за anomalно высокого эффективного значения гиромангнитного отношения  $\gamma$ , а пленки состава B, наоборот, пониженным значением  $\gamma$ .

Некоторые параметры исследованных МПФГ приведены в таблице, где  $h$  — толщина пленки,  $4\pi M$  — намагниченность насыщения,  $H_k$  — поле одноосной анизотропии,  $T_N$  — температура Нееля,  $Q_F$  — удельное фарадеевское вращение на длине волны  $\lambda=0.633$  мкм,  $K$  — коэффициент жесткости ДС.

На рис. 1, a показаны зависимости периода доменной структуры от  $H_{см}$ . Стрелками показаны значения  $H_{нас}$ . При достаточно большой длительности

импульса модулирующего поля  $\tau_n$  его амплитуда должна выбираться из условия  $H_n + H_{см} < H_{нас}$ , поскольку в противном случае будет наблюдаться задержка спада импульса из-за намагничивания образца до насыщения [4]. Если же важным является повышение быстродействия за счет увеличения скорости ДС при увеличении  $H_n$ , то длительность модулирующего импульса должна удовлетворять условию  $\tau_n < W/2v$ , где  $W$  — ширина домена,  $v$  — скорость движения ДС. Скорость движения ДС в исследованных МПФГ измеряли методом высокоскоростной фотографии. При достаточно больших  $H_n$  значение  $v$  определяли так же, как в [9], т. е. путем регистрации временной зависимости смещения ДС домена с обратной намагниченностью при перемагничивании МПФГ из насыщенного состояния. При этом продвигающее поле равно  $H = H_n - H_{см}$ . При значениях поля  $H_n$ , не достаточных для зарождения доменов с обратной намагниченностью при импульсном перемагничивании МПФГ из насыщенного состояния, для определения  $v$  регистрировали зависимость смещения ДС ЦМД от времени, по начальному наклону которой находили  $v$ . При этом действующее поле равно  $H_n$ .

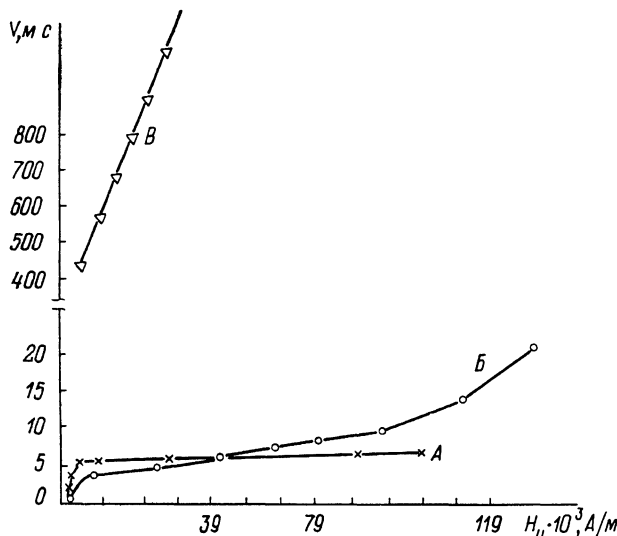


Рис. 2. Зависимость скорости движения ДС  $v$  от амплитуды импульсного магнитного поля  $H_n$  для МПФГ составов А, Б, В.

В процессе работы модулятора действующее поле  $H$  в начальный момент времени после приложения импульса поля равно  $H_n$ , а по мере продвижения ДС оно уменьшается. Типичные зависимости  $v(H)$  приведены на рис. 2 для пленок трех исследуемых составов. Обнаружено, что для МПФГ составов А и Б наблюдается насыщение скорости движения ДС, тогда как для МПФГ состава В зависимость  $v(H)$  линейная, т. е.  $v$  не достигает уокеровского предела. Из этих зависимостей видно, что при постоянной глубине модуляции зависимость  $\tau_\phi(H_n)$  должна быть ярче выражена в МПФГ состава В.

На рис. 1, б приведены зависимости периода полосовых доменов  $P$  от величины магнитного поля  $H_{пл}$ , приложенного в плоскости пленки. Видно, что  $H_{пл}$  оказывает слабое влияние на  $P$ , что обусловлено высоким значением поля одноосной анизотропии  $H_k$  (см. таблицу); самая сильная зависимость  $P(H_{пл})$  наблюдается в образце В, обладающем минимальным значением  $H_k$ . Тем не менее уменьшение  $P$  с ростом  $H_{пл}$  при прочих равных условиях должно приводить к некоторому уменьшению  $\tau_\phi$ .

Известно, что при малых значениях  $H_n$  в первом приближении соблюдается прямопропорциональная зависимость между величиной смещения ДС  $X$  и величиной  $H_n$  [10]

$$X = kH_n, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент жесткости ДС.

Поскольку действующее на ДС поле меняется в процессе ее движения, то меняется, вообще говоря, и скорость движения ДС. В образце В, где зависимость  $v(H_n)$  линейна, средняя скорость ДС равна

$$v_{\text{cp}} = \mu H_n / 2 = v_0 / 2, \quad (2)$$

где  $v_0$  — начальная скорость движения ДС после приложения импульса поля  $H_n$ , причем  $v_0$  не зависит от  $H_n$ . В этом случае время перехода ДС в новое состояние равновесия после приложения импульса поля или, другими словами, длительность фронта импульса фотоотклика будет иметь следующий вид:

$$\tau_{\phi} \approx X / v_{\text{cp}} \approx 2k / \mu, \quad (3)$$

где  $\tau_{\phi}$  не зависит от  $H_n$ , что и подтверждается экспериментальными зависимостями  $\tau_{\phi}(H_n)$  (рис. 3, в). При относительно больших значениях  $H_n$  зависимость  $x(H_n)$  перестает быть линейной, причем ее наклон с ростом  $H_n$  уменьшается, что и

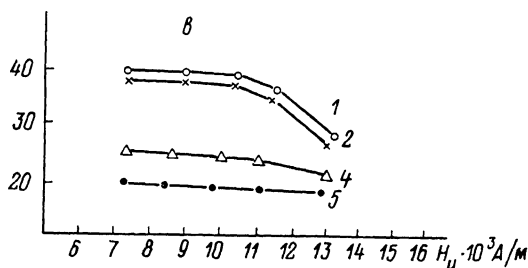
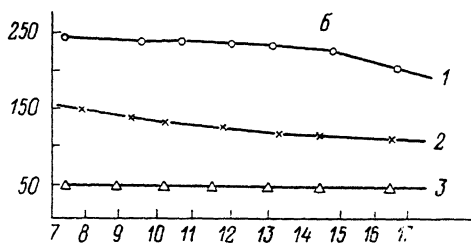
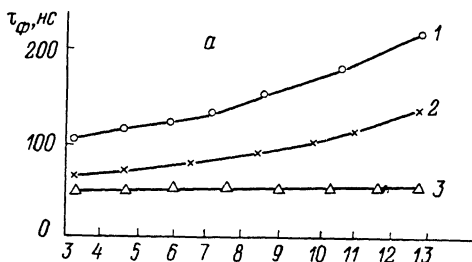


Рис. 3. Зависимость времени перехода ДС в новое состояние равновесия  $\tau_{\phi}$  от амплитуды импульсного магнитного поля  $H_n$  для МПФГ составов А (а), В (б), В (в) при наличии постоянного магнитного поля.

$H_{\text{пл}}$ , кА/м: 1 — 0, 2 — 12.5, 3 — 35, 4 — 50, 5 — 100.

приводит к снижению  $\tau_{\phi}$  при превышении значения 10 кА/м (рис. 3, в, зависимости 1, 2, 3). Как следует из формулы (3), для дальнейшего снижения  $\tau_{\phi}$ , определяющего быстродействие при модуляции, в таких материалах целесообразны снижение параметра затухания  $\alpha$  и увеличение подвижности  $\mu$ .

В образце системы А, где  $v_0$  практически не зависит от  $H_n$  (за исключением значений начального участка для значений поля  $H_n < v_0 / \mu < 10^2$  А/м), средняя скорость ДС практически не зависит от  $H_n$ . В связи с этим  $\tau_{\phi}$  должно увеличиваться с ростом  $H_n$  по закону, близкому к линейному, что и подтверждается экспериментом (рис. 3, а, зависимость 1). Значение параметра затухания  $\alpha$  и подвижности ДС  $\mu$  при этом не оказывает влияния на  $\tau_{\phi}$ , что связано с ранним насыщением скорости ДС. Присутствие  $H_{\text{пл}}$  повышает предельную скорость движения ДС [7], препятствуя динамическому преобразованию доменной структуры, которое приводит к расширению ДС и росту за счет этого ее инерционных свойств; поэтому  $\tau_{\phi}$  уменьшается с ростом  $H_{\text{пл}}$  (рис. 3, а, зависимости 2—3; рис. 4, а). Например, уменьшение значения  $\tau_{\phi}$  почти на порядок при  $H_n = 12.9$  кА/м достигнуто при приложении поля  $H_{\text{пл}} \sim 40$  кА/м (рис. 4, а).

Образец В по своим свойствам (параметры  $\alpha$ ,  $\mu$ ) занимает промежуточное положение между образцами А и В. Отличие его состоит в том, что начальная подвижность его ниже, чем в образце А и близка к значению  $\mu$  для образца В (см. таблицу). Кроме того, в полях  $H_n \geq 10$  кА/м значение  $v_0$  в этом образце сильнее зависит от  $H_n$ , чем в образце А. Исходя из этого, зависимость  $\tau_{\phi}(H_n)$  для образца В выражена слабее (рис. 3, б) по сравнению с образцом А, хотя

качественно эти зависимости, так же как зависимости  $\tau_{\phi}(H_{пл})$  (рис. 4, а, б), совпадают.

В работе экспериментально показано, что в МПФГ состава В время перехода ДС в новое состояние равновесия в отсутствие  $H_{пл}$  составляет около 20 нс, что обеспечивает предельную частоту модуляции  $F_{пр} \approx 10-20$  МГц при использовании этих пленок в модуляторе при достаточно высокой глубине модуляции. Для МПФГ составов А и Б  $F_{пр}$  в аналогичных условиях на порядок ниже, однако ее

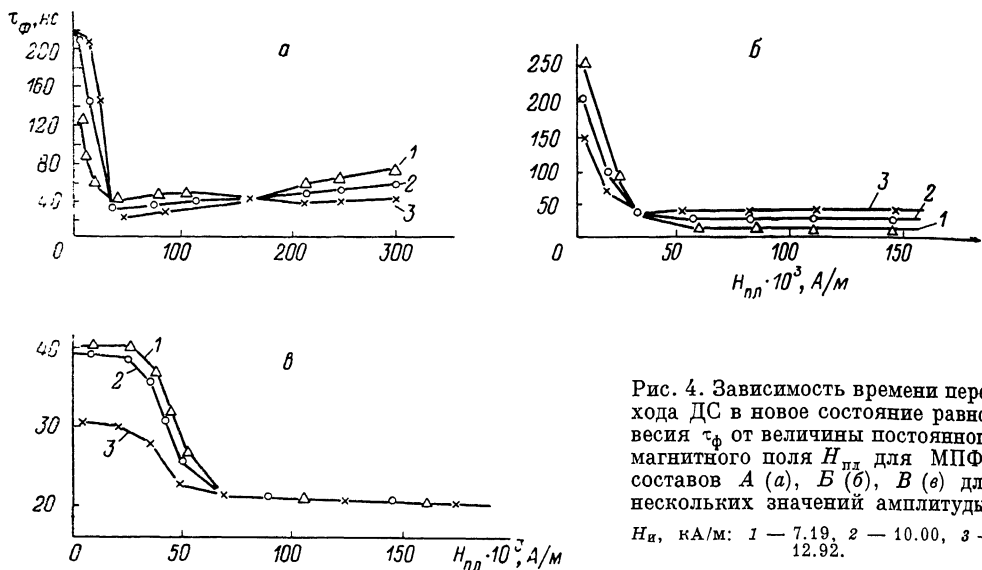


Рис. 4. Зависимость времени перехода ДС в новое состояние равновесия  $\tau_{\phi}$  от величины постоянного магнитного поля  $H_{пл}$  для МПФГ составов А (а), Б (б), В (в) для нескольких значений амплитуды.  $H_{и}$ , кА/м: 1 — 7.19, 2 — 10.00, 3 — 12.92.

можно значительно увеличить, прикладывая постоянное поле в плоскости пленки. Таким образом, учитывая параметры МПФГ и подбирая конкретные значения  $H_{пл}$  для каждой конкретной пленки, можно оптимальным образом использовать возможности ее с точки зрения сочетания максимальной чувствительности и высоких динамических и МО параметров, что необходимо при создании конкретных МО модуляционных устройств.

В заключение авторы благодарят М. В. Логунова, В. Б. Сигачева за помощь при проведении настоящей работы.

#### Список литературы

- [1] Балбашов А. М., Червоненкис А. Я. Магнитные материалы для микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 216 с.
- [2] Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. // Радиоэлектроника (состояние и тенденции развития). НИИЭИР. 1985. Ч. II. С. 78—90.
- [3] Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. // Радиотехника (состояние и тенденции развития). 1985. Ч. II. С. 80—70.
- [4] Рандошкин В. В., Иванов Л. П., Телесная П. В. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. Вып. 3. С. 960—975.
- [5] Логунов М. В., Рандошкин В. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1199—1201.
- [6] Логунов В. В., Рандошкин В. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1987—1991.
- [7] Бахтеузов В. Е., Ким Т. А., Рандошкин В. В., Сигачев В. Ф., Червоненкис А. Л. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1227—1230.
- [8] Губарев А. П., Рандошкин В. В. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1393—1399.
- [9] Рандошкин В. В., Сигачев В. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. Вып. 1. С. 34—37.
- [10] Schlötmann E. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 369.

Киевский  
политехнический институт

Поступило в Редакцию  
2 июня 1988 г.

В окончательной редакции  
28 декабря 1989 г.