

09

## Одновременное управление интенсивностью отраженного и прошедшего света в тонких пленках манганитов

© Ю.П. Сухоруков,<sup>1</sup> А.В. Телегин,<sup>1</sup> Е.А. Ганьшина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,  
620108 Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия  
e-mail: telegin@imp.uran.ru

Поступило в Редакцию 3 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 15 января 2021 г.

Принято к публикации 25 января 2021 г.

Описан способ одновременного управления магнитным полем интенсивностью отраженного и прошедшего неполяризованного света в пленках магнетиков, обладающих гигантскими эффектами магнитоотражения и магнитопротекания. Показаны преимущества предложенного способа перед способами отдельного управления интенсивностью протекания или отражения света. Описаны спектральные, температурные и динамические диапазоны применения способа на примере пленок манганитов лантана.

**Ключевые слова:** магнитоотражение, магнитопротекание, манганиты, ИК-диапазон, неполяризованный свет, магнитооптические эффекты.

DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50873.333-20

### Введение

Хорошо известны различные способы управления интенсивностью оптического излучения, основанные на разных физических явлениях, когда характеристики оптической среды могут меняться под воздействием: электрического поля (эффекты Поккельса и Керра) [1–3], магнитного поля (эффект Фарадея и магнитооптический эффект Керра) [4–6], магнитоупругих и упругих напряжений (фотоупругость) [7–9] и т.д. Эффекты, связанные с отраженным светом (магнитоотражение, эффект Керра), как правило, малы по величине (до 1% по абсолютной величине) и применяются в основном в специализированных задачах анализа электронных и магнитных характеристик непрозрачных сред. Преобладающее распространение получили эффекты, связанные с управлением интенсивностью линейно- или циркулярно-поляризованного прошедшего света. В этом случае недостатком являются большие оптические потери в области фундаментального поглощения, в которой магнитооптические эффекты (МОЭ) в магнетиках достигают максимума. При увеличении длины волны в инфракрасной (ИК) области спектра МОЭ уменьшаются обратно пропорционально квадрату длины волны  $\sim 1/(\lambda - \lambda_0)^2$ , где  $\lambda_0$  — длина волны максимума фундаментального поглощения [10,11]. Увеличение толщины оптического элемента с целью увеличения МОЭ в прошедшем свете одновременно приводит и к увеличению оптических потерь. Дополнительные потери вносят также полосы примесного поглощения и остаточные лучи (интенсивные фонные и многофонные полосы поглощения [12]).

Компенсировать эти недостатки и повысить величину МОЭ позволяет способ, связанный с управлением интенсивностью неполяризованного света. Данный подход был реализован при использовании пленок легированных манганитов с колоссальным магнитосопротивлением [13], обладающих эффектами магнитопротекания или магнитопоглощения света [14]. Физический механизм возникновения магнитопротекания в манганитах связан с подавлением магнитным полем флуктуаций магнитных моментов носителей заряда вблизи магнитного фазового перехода. Это сопровождается уменьшением электросопротивления (переход изолятор–металл) и увеличением поглощения света в области взаимодействия со свободными носителями заряда. Обнаружение большого эффекта магнитоотражения неполяризованного света в манганитах [15] позволило расширить арсенал способов управления интенсивностью оптического излучения, используя эффекты магнитоотражения и магнитопротекания одновременно на одном магнитооптическом элементе.

Кроме того, в тонких пленках и многослойных структурах можно получить дополнительное усиление МОЭ за счет отражения света от границы раздела оптических сред пленка–подложка и особенностей пленочного состояния. Например, в монокристаллах  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  магнитопротекание не наблюдается из-за больших оптических потерь, а магнитоотражение составляет менее 4%, тогда как в пленках  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  магнитоотражение и магнитопротекание достигает  $\sim 10\text{--}20\%$  [16].

В настоящей работе на примере пленок легированных манганитов лантана приводится описание и показано преимущество способа одновременного управления ин-

тенсивностью отраженного и прошедшего неполяризованного света в магнетиках перед способом раздельного управления интенсивностью света.

## 1. Описание способа

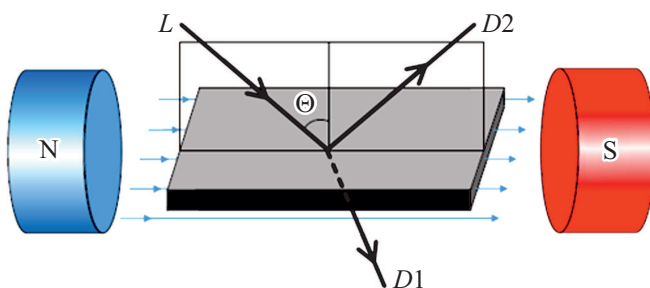
Способ одновременного управления интенсивностью отраженного и прошедшего света основан на использовании больших по величине эффектов магнитоотражения ( $\Delta R/R$ ) и магнитопропускания ( $\Delta t/t$ ) неполяризованного света в пленках манганитов с колоссальным магнитосопротивлением. Эти магнитооптические эффекты связаны с относительным изменением интенсивности отражения ( $R$ ) и пропускания ( $t$ ) оптического излучения при наличии и отсутствии магнитного поля  $H$  (выражения (1) и (2)). В ИК-области спектра, области взаимодействия света с носителями заряда, эти эффекты в манганитах пропорциональны величине магнитосопротивления [17]:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{t_H - t}{t} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{2\rho} t, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_H - R}{R} \approx -(1 - R) \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (2)$$

где  $t_H$ ,  $R_H$  и  $\rho_H$  — коэффициенты пропускания, отражения оптического излучения и удельное электросопротивление в магнитном поле. Выражения (1) и (2) демонстрируют, что  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  позволяют бесконтактно оптическими методами контролировать изменение электросопротивления в электрической цепи за счет изменения магнитного потока.

Принципиальная схема устройства для реализации способа одновременного управления интенсивностью отраженного и прошедшего света в магнитооптическом элементе из пленки манганита (рис. 1) мало отличается от аналогичной для устройства с раздельным управлением этими параметрами. Угол падения света ( $\theta$ ) на оптический элемент может составлять от  $5^\circ$  до  $75^\circ$ . С одной стороны, его величина ограничена углом



**Рис. 1.** Схематическое изображение способа одновременного управления внешним магнитным полем интенсивностью отраженного и прошедшего света в пленке манганита, обладающей эффектами магнитоотражения и магнитопропускания.  $L$  — излучатель,  $D1$  и  $D2$  — приемники прошедшего и отраженного света,  $\theta$  — угол падения излучения к нормали в плоскости падения. Тонкими стрелками показан магнитный поток.

Брюстера (максимум для отраженного и минимум для прошедшего света [12]), с другой стороны — минимальным углом регистрации, обусловленным измерительной схемой и габаритами источника и детектора излучения. Для получения минимальных оптических потерь предлагается использовать угол  $\theta \sim 5^\circ - 7^\circ$ .

Основным магнитооптическим элементом при реализации способа одновременного управления интенсивностью отраженного и прошедшего света являются тонкие пленки легированного манганита лантана, обладающие эффектами магнитоотражения и магнитопропускания неполяризованного света. Максимальные величины эффектов достигаются в высококачественных пленках манганитов, обладающих наибольшим объемом ферромагнитной фазы, выраженным переходом металл—изолятор и наибольшей температурой Кюри ( $T_C$ ). Величину  $T_C$  можно менять как не изовалентным замещением  $\text{La}^{3+}$ , например, ионами  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , так и изовалентным замещением  $\text{La}^{3+}$  ионами редкой земли, например,  $\text{Pr}^{3+}$ . В последнем случае величины эффектов практически не меняются при замещении La до 50% [14]. В таблице приведено несколько примеров легированных составов и  $T_C$  пленок манганитов на монокристаллических подложках (данные взяты из обзора [14]).

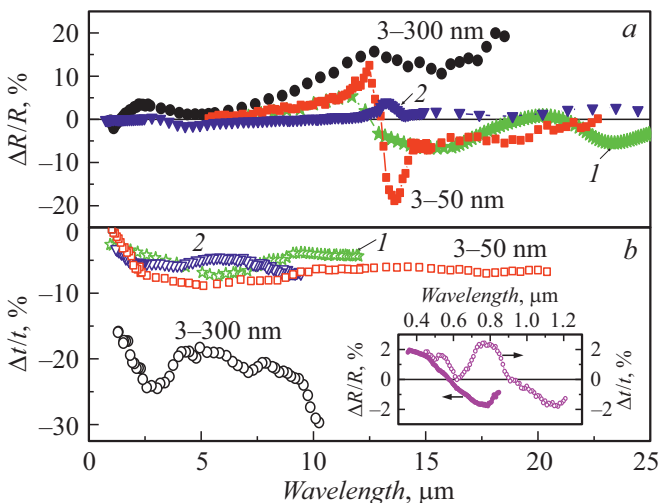
Предложенный способ может быть рекомендован к применению в широкой спектральной области длин волн, включающей в себя видимый и ИК-диапазоны. Формирование спектров  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  в видимой области спектра (область фундаментального поглощения) определяется изменением под действием поля электронной структуры манганита, а в ИК-области — взаимодействия света со свободными носителями заряда. В качестве примера на рис. 2 представлены спектры  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  для пленок № 1–3 из таблицы. Очевидное преимущество пленки состава  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  для практического использования, скорее всего, обусловлено меньшей дефектностью по сравнению с другими пленками. Исследования показали, что в высококачественных пленках  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  эффекты  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  кратно превышают значения МОЭ пленок других составов при прочих близких параметрах [14,16]. Уменьшение толщины пленки до 50 nm, меньшей расчетной толщины псевдоморфного слоя ( $\sim 80$  nm), демонстрирует возможность уменьшения оптических потерь при сохранении большой величины МОЭ. В работе [16] на основании сравнительного анализа спектральных, полевых и температурных зависимостей магнитоотражения в монокристаллах и пленках манганитов одинакового состава  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  было показано, что в пленках имеет место усиление  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  по сравнению с монокристаллами. Такое усиление было связано с дополнительным вкладом света, отраженного от границы раздела пленка—подложка. Отметим, что эффективность применения описываемого способа в различных частях спектра будет разной. Наблюдаемые в спектрах  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  для пленок манганитов резкие особенности сменой знака эффектов обусловлены изменением под

Толщина  $d$ , температура Кюри  $T_C$ , магнитосопротивление  $\Delta\rho/\rho$  (в поле, приложенном в плоскости образца  $H_p = 6.4 \cdot 10^5$  A/m), максимумы магнитоотражения  $\Delta R/R$  ( $H_p = 3.2 \cdot 10^5$  A/m, длине волны  $\lambda \sim 15\text{--}17\ \mu\text{m}$ ) и магнитопротускания  $\Delta t/t$  (в поле, приложенном перпендикулярно плоскости образца  $H_s = 6.4 \cdot 10^5$  A/m и  $\lambda \sim 6\ \mu\text{m}$ ) пленок манганитов

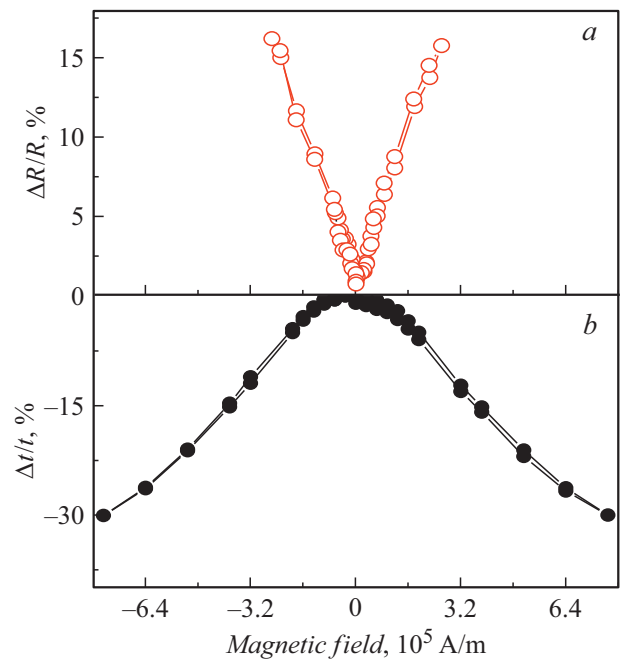
№ пленки	Состав пленки/подложки	$d$ , nm	$T_C$ , К	$\Delta\rho/\rho$ , %	$\Delta t/t$ , %	$\Delta R/R$ , %
1	La <sub>2/3</sub> Ba <sub>1/3</sub> MnO <sub>3</sub> /SrTiO <sub>3</sub>	110	320	-15	-8	+5
2	La <sub>0.82</sub> K <sub>0.18</sub> MnO <sub>3</sub> /SrTiO <sub>3</sub>	100	~ 270	-19	-5.5	+6
3	La <sub>0.7</sub> Ca <sub>0.3</sub> MnO <sub>3</sub> /LaAlO <sub>3</sub>	320	265	-30	-30	+22
4	(La <sub>0.75</sub> Pr <sub>0.25</sub> ) <sub>0.7</sub> Ca <sub>0.3</sub> MnO <sub>3</sub> /SrTiO <sub>3</sub>	300	214	-45	-25	-
5	(La <sub>0.5</sub> Pr <sub>0.5</sub> ) <sub>0.7</sub> Ca <sub>0.3</sub> MnO <sub>3</sub> /LaAlO <sub>3</sub>	300	179	-60	-23	-

действием поля интенсивности и положения полос фундаментального, примесного и фононного поглощения. Отметим, что величины  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  для манганитов в ИК-области спектра существенно превышают изменение интенсивностей линейных магнитооптических эффектов в видимой области [6,8,9,18]. Таким образом, предлагаемый способ преимущественно можно использовать в оптоэлектронных устройствах ближнего и среднего ИК-диапазона.

Рис. 2 также демонстрирует существенное увеличение надежности регистрации оптического сигнала по сравнению со способом раздельного управления интенсивностью света. Например, пленка La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> обладает большими эффектами магнитопротускания и магнитоотражения (порядка 2%) в видимом диапазоне. Однако при этом имеются и большие оптические потери на поглощение света. В ИК-диапазоне прозрачность пленки увеличивается и достигает порядка 30%, а магнитоотражение и магнитопротускание — 15–20%. Вместе с тем в диапазоне длин волн  $0.8 \leq \lambda \leq 1.6\ \mu\text{m}$  магнитоот-



**Рис. 2.** Спектры: *a* — магнитоотражения  $\Delta R/R$  при  $H_s = 2.4 \cdot 10^5$  A/m и *b* — магнитопротускания  $\Delta t/t$  при  $H_p = 6.4 \cdot 10^5$  A/m для пленок 1 — La<sub>2/3</sub>Ba<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub>, 2 — La<sub>0.82</sub>K<sub>0.18</sub>MnO<sub>3</sub> и 3 — La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> разной толщины при  $T \approx T_C$  (на вставке — спектры магнитопротускания и магнитоотражения пленки 3 в видимом диапазоне при  $T \approx T_C$  и  $H_s = 2.8 \cdot 10^5$  A/m).

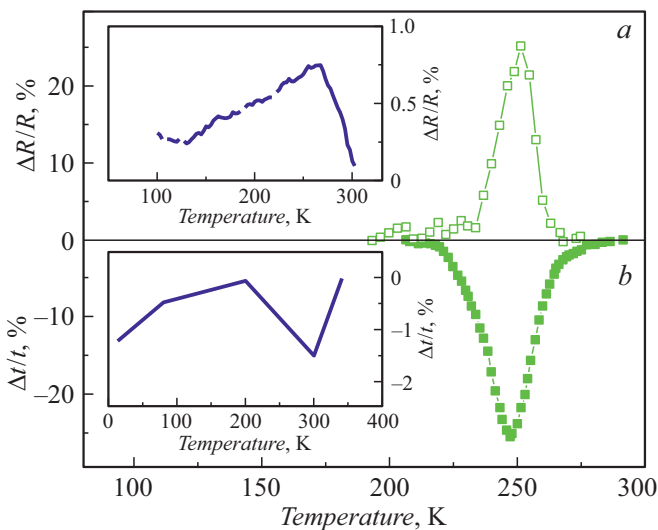


**Рис. 3.** Полевые зависимости: *a* — магнитоотражения  $\Delta R/R$  при длине волны  $\lambda = 12.5\ \mu\text{m}$  и *b* — магнитопротускания  $\Delta t/t$  при  $\lambda = 3\ \mu\text{m}$  и  $T \sim T_C$  — для пленки La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> толщиной  $d = 300$  nm.

ражение менее 1% и является ненадежным параметром из-за малой величины, тогда как магнитопротускание составляет порядка 15% и является более надежным параметром при одновременной их регистрации.

Таким образом, одновременное изменение  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  как расширяет спектральный диапазон реализации предлагаемого способа, так и повышает помехоустойчивость оптической системы.

Следующим элементом предлагаемого способа является источник магнитного поля, в магнитный поток которого помещается пленка манганита. Таким источником может быть не только электромагнит (рис. 1), но и высокотоковые цепи, в том числе импульсные и подобные им устройства. Важной особенностью способа является наличие близкой к линейной зависимости от поля эффектов  $\Delta R/R$  при  $H_s > 8 \cdot 10^3$  A/m и  $\Delta t/t$  при  $H_p > 8 \cdot 10^4$  A/m (рис. 3) в широкой спектральной



**Рис. 4.** Температурные зависимости: *a* — магнитоотражения  $\Delta R/R_0$  при  $\lambda = 12.5 \mu\text{m}$ ,  $H_p = 2.8 \cdot 10^5 \text{ A/m}$  и *b* — магнитопропускания  $\Delta t/t$  при  $\lambda = 3 \mu\text{m}$  и  $H_s = 6.4 \cdot 10^5 \text{ A/m}$  для пленки  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ . На вставках  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  соответственно для пленки с вариантной структурой  $(\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3))$  в поле  $H_p = 2.8 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ .

области от 1 до  $21 \mu\text{m}$ , что упрощает условия реализации способа в различных оптоэлектронных устройствах. Другой важной особенностью является четность полевых зависимостей эффектов (рис. 3). В случае переменных магнитных полей величины  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  будут меняться с частотой, равной удвоенной частоте поля.

Быстродействие предлагаемого в настоящей работе способа определяется процессами перемагничивания пленок манганитов и техническими возможностями коммутации магнитного поля [19]. Проведенные нами исследования показали, что в переменных магнитных полях до  $\omega = 1 \text{ kHz}$  магнитопропускание имеет те же значения, что и в постоянном магнитном поле. Сделаем оценку быстродействия предлагаемого способа. Данные по прохождению электромагнитных волн в манганитах  $\text{La}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{MnO}_3$  и  $\text{La}_{0.60}\text{Y}_{0.07}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  показали, что увеличение частоты электромагнитного поля до  $10 \text{ MHz}$  не приводит к уменьшению величины магнитосопротивления [19]. Скорость перемагничивания пленки манганита в переменном магнитном поле в первом приближении определяется величиной скин-слоя  $\delta = (2\rho/\omega\mu)^{1/2}$ , где  $\rho$  — удельное электросопротивление,  $\omega$  — частота переменного магнитного поля и  $\mu$  — магнитная проницаемость. Таким образом, при условии  $\delta > d = 300 \text{ nm}$  предельная скорость перемагничивания пленки  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  при  $T = 265 \text{ K}$  может достичь  $\omega \sim 10^9 \text{ Hz}$  при  $\mu \leq 5$  и  $\rho = 10^{-4} \Omega\text{m}$  [15].

Мы полагаем, что быстродействие предлагаемого способа можно повысить до  $10^{15} \text{ Hz}$  при условии использования импульсных лазеров в качестве источника излуче-

ния [20]. Такое предположение позволило сделать анализ фотоиндуцированного перехода металл–изолятор (МИ) и динамики проводимости пленок манганитов методом „накачка–зондирование“ [21]. Динамический интервал фотоиндуцированных эффектов от единиц пикосекунд до десятков фемтосекунд в таких пленках определяется вкладом термически разупорядоченных фононов при низких температурах и спиновых флуктуаций электронов вблизи  $T_C$  [22]. Выше температуры магнитного упорядочения в манганитах проявляется влияние фотоиндуцированной оптической анизотропии за счет вклада орбитального упорядочения. Помимо фотоиндуцированных эффектов существует также прямое воздействие импульсов лазера на решеточные моды в окрестности магнитного фазового перехода [23]. Для разработки способа сверхбыстрого управления интенсивностью света необходимым является дальнейшее исследование динамики эффектов магнитопропускания и магнитоотражения в тонкопленочных структурах на основе манганитов.

Температурная область применения предлагаемого способа определяется физическими механизмами, ответственными за возникновение магнитосопротивления и связанных с ним эффектов  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  в манганитах. Основным механизмом связан с подавлением магнитным полем флуктуаций магнитных моментов носителей заряда, максимальных в узком температурном интервале вблизи  $T_C$  [13,14]. Величина  $\Delta\rho/\rho$  в манганитах достигает в максимуме десятков процентов и отлична от нуля в диапазоне температур  $\pm 10\text{--}30^\circ\text{C}$ . В соответствие с выражениями (1) и (2) такое же температурное поведение имеют  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  (рис. 4). Другой механизм связан с влиянием магнитного поля на процессы туннелирования (рассеяния) спин-поляризованных носителей заряда через границы структурных доменов в пленках с вариантной структурой [24]. Туннельное магнитосопротивление и связанные с ним  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  достигают максимума вблизи нуля Кельвина. На вставках рис. 4 приведены температурные зависимости  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  для пленки  $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$  с вариантной структурой. Видно, что помимо максимума вблизи  $T_C$  существует слабый низкотемпературный рост эффектов  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  при  $T < 120 \text{ K}$  (рис. 4), связанный с туннельным магнитосопротивлением [25].

Таким образом, существует возможность значительного увеличения температурной области применения предлагаемого способа за счет привлечения дополнительных механизмов рассеяния. Однако включение второго механизма приводит к уменьшению значений  $\Delta R/R$  и  $\Delta t/t$  вблизи  $T_C$  и росту поглощения света вследствие рассеяния света на границах структурных доменов и высокой дефектности пленок. Для решения этой проблемы необходимо провести исследование влияния послеростовых отжигов и магнитной анизотропии пленок с вариантной структурой.

## Заключение

Предложен способ одновременного управления магнитным полем интенсивностью отраженного (магнитоотражение) и прошедшего (магнитопропускание) неполяризованного света в пленках манганитов, обладающих колоссальным магнитосопротивлением. Физические механизмы, ответственные за появление магнитоотражения и магнитопропускания, определяют рабочие характеристики предлагаемого способа и связаны: с (i) подавлением магнитным полем флуктуаций магнитных моментов носителей заряда вблизи магнитного фазового перехода, (ii) с изменением под действием поля процессов туннелирования (рассеяния) спин-поляризованных носителей заряда. Показано, что способ может быть применен в широком видимом и ИК-спектральном диапазоне длин волн от 0.3 до 21  $\mu\text{m}$ , температурном интервале от температур жидкого гелия до 360 К в магнитных полях  $H \sim (3-6) \cdot 10^5$  А/м.

Реализация способа одновременного управления интенсивностью отраженного и прошедшего света возможна только при применении тонкопленочных структур. Предложенный способ имеет ряд преимуществ перед способом отдельного управления отраженным и прошедшим светом и позволяет: (i) увеличить надежность обработки оптического сигнала, (ii) усилить устойчивость оптической системы к оптическим помехам, (iii) расширить спектральный и температурный диапазоны и оставить неизменными размеры рабочего оптоэлектронного устройства. Быстродействие предложенного способа ограничено техническими характеристиками источника магнитного потока, детектора и излучателя.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема „Спин“ № АААА-А18-118020290104-2).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин. *Методы модуляции и сканирования света* (Наука, М., 1970)
- [2] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. *Прикладная магнитооптика* (Энергоатомиздат, М., 1990)
- [3] А.Н. Георгобиани. Соросовский образовательный журнал, **7** (6) 75 (2001).
- [4] Ф.Ф. Сизов, Ю.И. Уханов. *Магнитооптические эффекты Фарадея и Фохта в применении к полупроводникам* (Наукова Думка, Киев, 1979)
- [5] А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, В.Д. Бессонов, С.В. Наумов. Письма в ЖТФ, **45** (12) 19 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50873.333-20 [A.V. Telegin, Yu.P. Sukhorukov, V.D. Bessonov, S.V. Naumov. Tech. Phys. Lett., **45** (6), 601 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019060300]
- [6] Е.А. Ганьшина, А.В. Зенков, Г.С. Кринчик, А.С. Москвин, А.Ю. Трифонов. ЖЭТФ, **99**, 274 (1991). [E.A. Gan'shina, A.V. Zenkov, G.S. Krinchik, A.S. Moskvina, A.Yu. Trifonov. JETP, **72** (1), 154 (1991)]
- [7] T. Haider. Int. J. Electromagnet. Appl., **7** (1) 17 (2017). DOI:10.5923/j.jiea.20170701.03
- [8] А.К. Звездин, В.А. Котов. *Магнитооптика тонких пленок* (Наука, М., 1988)
- [9] Г.А. Смоленский, Р.В. Писарев, И.Г. Синий. УФН, **116**, 231 (1975). DOI:11.3367/UFNr.01116.197506b.0231 [G.A. Smolenskii, R.V. Pisarev, I.G. Sinii. Sov. Phys. Usp., **18**, 410 (1975). DOI: 10.1070/PU1975v018n06ABEH001964]
- [10] J. Suits. IEEE Tr. Magn., **8** (1), 95 (1972). DOI: 10.1109/TMAG.1972.1067270
- [11] S.D. Smith. *Encyclopedia of physics: Light and matter Ia // Encyclopedia of Physics XXV/2a* ed S. Flugge and L. Genzel (Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, NY., 1967)
- [12] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников* (Наука, М., 1977)
- [13] Н.Г. Бебенин, Р.И. Зайнуллина, В.В. Устинов. УФН, **188**, 801 (2018). DOI:10.3367/UFNr.2017.07.038180 [N.G. Bebenin, R.I. Zainullina, V.V. Ustinov. Phys. Usp., **61**, 719 (2018). DOI: 10.3367/UFNr.2017.07.038180]
- [14] А.В. Грановский, Ю.П. Сухоруков, Е.А. Ганьшина, А.В. Телегин. *In Magnetophotonics: From Theory to Applications Magnetophotonic* (Berlin, Heidelberg, Germany, Springer Series in Materials Science, 2013), 178.
- [15] Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарёва, А.В. Телегин, Е.В. Мостовщикова, В.Л. Кузнецов, А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, Е.А. Ганьшина, А.Н. Виноградов. Письма в ЖТФ, **29** (21), 55 (2003). [Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva, A.V. Telegin, E.V. Mostovshchikova, V.L. Kuznetsov, A.R. Kaul', O.Yu. Gorbenco, E.A. Gan'shina, A.N. Vinogradov. Tech. Phys. Lett., **29** (11), 904 (2003)]
- [16] А.В. Грановский, Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, В.Д. Бессонов, Е.А. Ганьшина, А.Р. Кауль, И.Е. Корсаков, О.Ю. Горбенко, J. Gonzalez. ЖЭТФ, **139** (1), 90 (2011). [A.V. Granovskii, Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, V.D. Bessonov, E.A. Gan'shina, A.R. Kaul', I.E. Korsakov, O.Yu. Gorbenco, J. Gonzalez. JETP, **112** (1), 77 (2011)] DOI: 10.1134/S106377611005105X
- [17] А.Н. Юрасов, А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков. ФТТ, **58** (4), 656 (2016). [A.N. Yurasov, A.V. Telegin, Yu.P. Sukhorukov. Physics Solid State, **58** (4), 674 (2016).] DOI: 10.1134/S1063783416040326
- [18] S. Sugano, N. Kojima (ed). *Magneto-Optics, Springer Series in Solid-State Sciences* (Springer, Berlin, 2000).
- [19] A. Rinkevich, A. Nossov, V. Ustinov, V. Vassiliev, S. Petukhov. J. Appl. Phys., **91** (6), 3693 (2002). DOI: 10.1063/1.1448883
- [20] A.V. Kimel, A.M. Kalashnikova, A. Pogrebnaya, A.K. Zvezdin. Physics Reports, **852**, 1 (2020). DOI: 10.1016/j.physrep.2020.01.004
- [21] P. Munkhbaatar, Z. Marton, B. Tsermaa, W.S. Choi, Sung S. Ambrose Seo, J.S. Kim, N. Nakagawa, H.Y. Hwang, H.N. Lee, K. Myung-Whun. Appl. Phys. Lett., **106**, 092907 (2015). DOI: 10.1063/1.4914094

- [22] R.D. Averitt, A.I. Lobad, C. Kwon, S.A. Trugman, V.K. Thorsmølle, A.J. Taylor. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 017401 (2001).  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.017401
- [23] M. Först, R.I. Tobey, S. Wall, H. Bromberger, V. Khanna, A.L. Cavalieri, Y.-D. Chuang, W.S. Lee, R. Moore, W.F. Schlotter, J.J. Turner, O. Krupin, M. Trigo, H. Zheng, J.F. Mitchell, S.S. Dhesi, J.P. Hill, A. Cavalleri. *Phys. Rev. B*, **84**, 241104(R) (2011). DOI:10.1103/PhysRevB.84.241104
- [24] А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, А.А. Каменев. *Усп. хим.*, **73** (9) 932 (2004). [A.R. Kaul, O.Y. Gorbenko, A.A. Kamenev. *Russ. Chem. Rev.*, **73** (9), 861 (2004)]
- [25] А.В. Телегин, В.А. Бессонова, Ю.П. Сухоруков, А.П. Носов, Е.А. Ганьшина. *Опт. и спектр.*, **128** (1), 43 (2020).  
DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50873.333-20  
[A.V. Telegin, V.A. Bessonova, Y.P. Sukhorukov, A.P. Nosov, E.A. Gan'shina. *Opt. and Spectr.*, **128** (1), 42 (2020).  
DOI: 10.1134/S0030400X20010233]