

# Магниторефрактивный эффект в манганитах

© А.Н. Юрасов, Ю.В. Борискина\*, Е.А. Ганьшина\*, А.Б. Грановский\*, Ю.П. Сухоруков\*\*

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет),  
119454 Москва, Россия

\* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия

\*\* Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук,  
620219 Екатеринбург, Россия

E-mail: granov@magn.ru

(Поступила в Редакцию 12 октября 2006 г.)

Рассчитано магнитопропускание и магнитоотражение пленок манганитов и одномерных магнитофотонных кристаллов, содержащих пленку манганита в качестве дефекта. Выполненные расчеты показали, что магнитопропускание и магнитоотражение манганитов с колоссальным магнитосопротивлением можно рассматривать как проявление магниторефрактивного эффекта, причем величина эффекта на прохождении может достигать 20–40% при низких температурах. Эффект на отражении для пленки толщиной 300 nm составляет 1–2% и может быть значительно усилен за счет многолучевой интерференции в симметричной и антисимметричной схеме магнитофотонных кристаллов со встроенным дефектом.

Работа выполнена при поддержке фонда „Династия“, РФФИ (гранты № 06-02-016604 и 05-02-19886-ЯФ), а также президентского гранта МК-307.2006.2 и гранта научные школы НШ-5008-2006.2.

PACS: 42.70.-a, 78.20.Ls

## 1. Введение

Манганиты являются перспективными материалами с интересными и важными для практических применений магнитными, магнитотранспортными, оптическими и магнитооптическими свойствами. В частности, для целого ряда этих материалов в ближней ИК-области спектра обнаружено значительное изменение как пропускания (см. работу [1] и ссылки в ней), так и отражения [2] света при их намагничивании. Механизм этого явления остается во многом неясным [3]. В данной работе на основе простых расчетов показано, что магнитопропускание и магнитоотражение манганитов с колоссальным магнитосопротивлением (МС) можно рассматривать как проявление магниторефрактивного эффекта (МРЭ) [3–7] и что эти эффекты могут быть значительно усилены за счет многолучевой интерференции в магнитофотонных кристаллах (МФК) [8].

## 2. Магнитопропускание и магнитоотражение манганитов $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$

В магнитных материалах с гигантским, туннельным и колоссальным МС проводимость  $\sigma(\omega)$  значительно изменяется при намагничивании, и поэтому определяющая индексы рефракции диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon(\omega)$

$$\varepsilon(\omega, H) = \varepsilon_r(\omega) - i \frac{4\pi\sigma(\omega, H)}{\omega}, \quad (1)$$

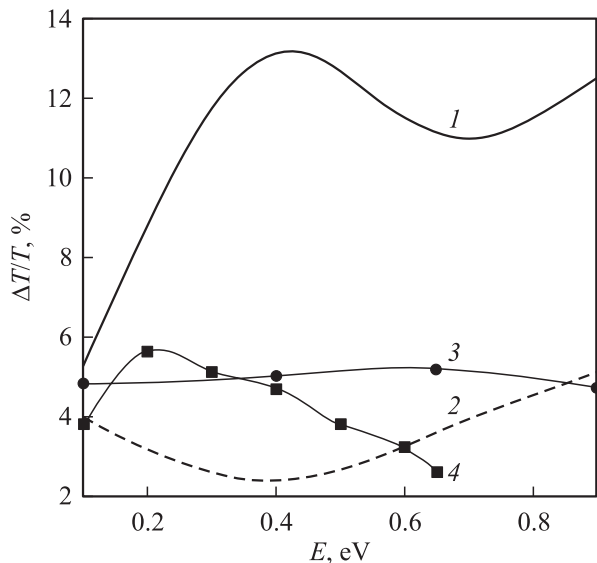
линейно связанная с проводимостью  $\sigma(\omega)$ , также является функцией приложенного магнитного поля  $H$ . Здесь

$\varepsilon_r(\omega)$  — диэлектрическая проницаемость, учитывающая вклад токов смещения. Этот эффект был назван магниторефрактивным [3]. Он проявляется в эксперименте в изменении коэффициентов отражения  $R$ , пропускания  $T$  и поглощения света образцом при его намагничивании. В частности, параметры МРЭ на отражении  $\Delta R/R$  и прохождении  $\Delta T/T$  света определяются как

$$\frac{\Delta R(H)}{R} = \frac{R(0) - R(H)}{R(0)}, \quad \frac{\Delta T(H)}{T} = \frac{T(0) - T(H)}{T(0)}. \quad (2)$$

Следует отметить, что магнитопропускание и магнитоотражение в немагнитных и магнитных полупроводниках наблюдались при низких температурах в сильных полях достаточно давно и эти эффекты, в отличие от МРЭ, обусловлены влиянием магнитного поля на электронный спектр и рассеяние носителей тока. МРЭ непосредственно определяется МС магнитных систем и поэтому может наблюдаться и при температуре выше комнатной, причем в магнитных полях, меньших поля насыщения.

Для металлических систем частотная зависимость  $\sigma(\omega)$  описывается законом Друде–Лоренца, что позволяет дать последовательное описание МРЭ в металлических мультислоях и гранулированных пленках [3]. В работах [4,5] развита простая теория МРЭ нанокompозитов с туннельной проводимостью, основанная на описании переноса электрона между двумя ферромагнитными гранулами на оптических частотах эквивалентной схемой параллельно включенных сопротивления и емкости. Этот подход позволил на количественном уровне описать экспериментальные данные [4–7]. Важно подчеркнуть, что при данном подходе только мнимая



**Рис. 1.** Спектральная зависимость  $\Delta T/T$  для пленок манганитов состава  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  (толщина пленки 300 nm). 1 — результаты расчета при величине магнитосопротивления 7% ( $T = 80\text{ K}$ ), 2 — результаты расчета при величине магнитосопротивления 3% ( $T = 290\text{ K}$ ), 3 — экспериментальные данные для пленок на подложке  $\text{SrTiO}_3$  ( $H = 8\text{ kOe}$ ) [1], 4 — экспериментальные данные для пленок на подложке  $\text{LaAlO}_3$  ( $H = 8\text{ kOe}$ ) [1].

часть  $\varepsilon(\omega)$  зависит от МС, т. е. при расчетах МРЭ можно считать, что  $\sigma(\omega, H) \approx \sigma(\omega = 0, H)$  [4].

В манганитах механизмы проводимости и МС значительно сложнее. Наряду с туннельным МС, имеющим место в слабелегированных манганитах, поликристаллах, системах с вариантной структурой, гетероструктурах [9,10], при достаточно высокой степени легирования значительную роль в формировании магнитотранспортных свойств играет возрастание объемной доли ферромагнитной фазы за счет уменьшения объема более резистивной антиферромагнитной фазы при намагничивании, что и определяет колоссальное МС [9]. В случае туннельного МС для описания МРЭ манганитов возможно использовать тот же подход, что и в случае наноконкомпозитов [4,5], и тогда  $\sigma(\omega, H) \approx \sigma(\omega = 0, H)$ . Если считать, что изменение объемов ферромагнитной и антиферромагнитной фаз при намагничивании манганитов с колоссальным МС не зависит от частоты  $\omega$ , что вполне оправдано в качестве первого приближения, то тогда и в этом случае для действительной части светопроводности  $\sigma(\omega, H) \approx \sigma(\omega = 0, H)$ . Поэтому в данной работе для описания  $\sigma(\omega, H)$  в манганитах независимо от конкретного механизма МС используем соотношение  $\sigma(\omega, H) \approx \sigma(\omega = 0, H)$  и соответствующие ему выражения для МРЭ работ [4,5]. Подчеркнем, что конкретный выбор модели частотной зависимости  $\sigma(\omega, H)$  важен лишь для количественного анализа МРЭ.

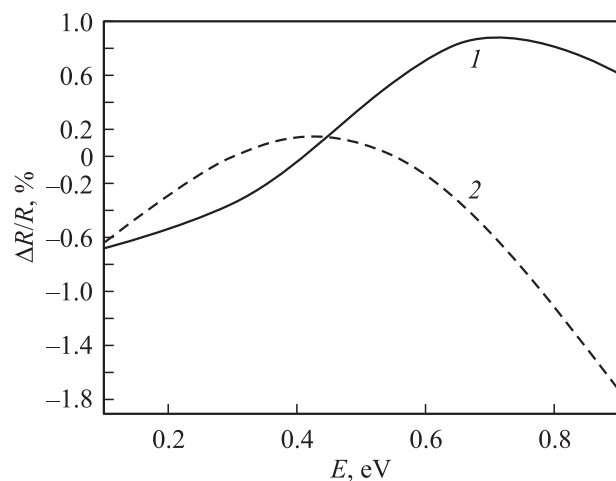
Расчет МРЭ выполнен для пленок манганитов состава  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  по методике, подробно описан-

ной в [4–6]. Оптические данные были рассчитаны по формулам Френеля из экспериментальных данных по коэффициенту отражения и прохождения света при комнатной температуре, полученных в работах [11,12]. Толщина пленки манганита принималась равной 300 nm. Расчет  $\Delta T/T$  и  $\Delta R/R$  выполнен в диапазоне энергий 0.15–0.9 eV в магнитном поле до 10 kOe, причем полевая зависимость МС определялась по литературным данным [1].

Установлено, что в соответствии с экспериментальными данными  $\Delta T/T$  и  $\Delta R/R$  практически линейно зависят от величины МС, что и является основным признаком МРЭ. Вывод о линейной корреляции между  $\Delta T/T$  (или  $\Delta R/R$ ) и МС относится исключительно к полевым зависимостям, а зависимости МРЭ и МС от концентрационного состава манганитов, температуры, условий изготовления могут значительно различаться, так как МРЭ определяется не только МС, но и оптическими параметрами. В исследованном диапазоне длин волн при низких температурах  $\Delta T/T$  при величине МС 20% может достигать 20–40%, что согласуется с данными работы [11]. Результаты расчета спектральной зависимости  $\Delta T/T$  при величине МС 7 и 3%, что имеет место в поле 8 kOe при 80 и 290 K соответственно, приведены на рис. 1 и находятся в количественном согласии с экспериментом [1].

Результаты расчета спектральной зависимости  $\Delta R/R$  при тех же параметрах представлены на рис. 2.

Полученные результаты для  $\Delta R/R$  качественно согласуются с результатами работы [2]. Учитывая, что в работе [2] исследовались пленки манганитов хотя и близкого, но другого состава, для которых оптические параметры могут значительно отличаться, такое по порядку величины согласие можно считать удовлетворительным.



**Рис. 2.** Спектральная зависимость  $\Delta R/R$  для пленок манганитов состава  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  (толщина пленки 300 nm). 1 — результаты расчета при величине магнитосопротивления 7% ( $T = 80\text{ K}$ ), 2 — результаты расчета при величине магнитосопротивления 3% ( $T = 290\text{ K}$ ).

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что наблюдаемые для манганитов значительные эффекты магнитопропускания и магнитоотражения могут рассматриваться как МРЭ.

### 3. Усиление магнитооптического эффекта манганитов в магнитофотонных кристаллах

В работе [13] было показано на примере пленок нанокomпозитов, что если материал, обладающий МРЭ, поместить в МФК в качестве встроенного дефекта, то магнитоотражение может быть усилено. Рассмотрим теперь, в какой степени магнитоотражение и магнитопропускание света могут быть усилены в фотонном кристалле, содержащем пленку манганита в качестве дефекта. Нами теоретически исследовались и оптимизировались две схемы одномерного МФК: симметричная схема  $(\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5) \times 6/\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/(\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2) \times 6$  в случае отражения и прохождения света; антисимметричная схема  $(\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5) \times 6/\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/(\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2) \times 12$  только в случае отражения, так как пропускание этой системы пренебрежимо мало.

В качестве конструкционных материалов МФК использованы диэлектрики, толщины которых подобраны так, чтобы создать запрещенную зону в исследуемом диапазоне длин волн  $\lambda = 2250\text{--}4500\text{ nm}$ . Оптимизация структуры с целью определения условий максимального МРЭ и одновременно максимально возможного отражения или прохождения света выполнялась для двух длин волн:  $\lambda = 2480$  и  $4130\text{ nm}$ , для которых в пленке манганита наблюдается значительный МРЭ, а поглощение существенно отличается. Если центр запрещенной зоны соответствует длине волны  $\lambda = 2480\text{ nm}$ , то  $d(\text{SiO}_2) = 300\text{ nm}$ ,  $d(\text{Ta}_2\text{O}_5) = 420\text{ nm}$ ; а для длины волны  $\lambda = 4130\text{ nm}$   $d(\text{SiO}_2) = 600\text{ nm}$ ,  $d(\text{Ta}_2\text{O}_5) = 580\text{ nm}$ . В качестве дефекта фотонный кристалл содержит тонкую пленку  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ , при этом в процессе вычислений толщина варьируется от 50 до 400 nm. Очевидно, что при помещении дефекта в фотонный кристалл запрещенная зона меняется; это проявляется в смещении пика спектральной зависимости МРЭ относительно центра запрещенной зоны. Оптические параметры манганита рассчитаны из экспериментальных данных [11,12,14], а их изменение при наложении внешнего магнитного поля рассчитано согласно теории МРЭ, изложенной в [4,5]. При магнитном поле  $H = 8\text{ kOe}$  для пленки манганита рассматриваемого состава при комнатной температуре МС составляет 7%, а в результате имеем для длины волны  $\lambda = 2480\text{ nm}$   $n(H=0) = 2.4797$ ,  $n(H) = 2.5271$ ,  $k(H=0) = 1.7744$ ,  $k(H) = 1.83307$ ; для длины волны  $\lambda = 4130\text{ nm}$   $n(H=0) = 2.5927$ ,  $n(H) = 2.63865$ ,  $k(H=0) = 1.9287$ ,  $k(H) = 1.9907$ .

Вычисления проводились методом  $M$ -матриц [13]. С помощью компьютерного моделирования удалось показать, что в построенной антисимметричной структуре

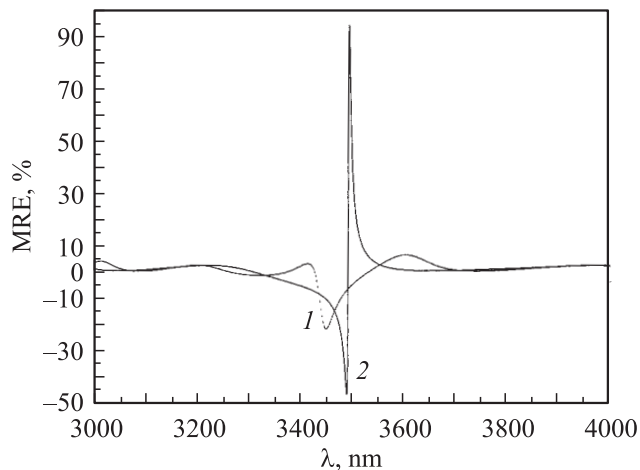


Рис. 3. Магнитооптический эффект магнитофотонного кристалла с толщиной дефекта 300 nm, рассчитанный на отражении на длине волны 4130 nm. 1, 2 — расчет по антисимметричной и симметричной схеме соответственно.

возможно усиление эффекта на отражении до 25% (рис. 3) при коэффициенте отражения  $\sim 0.7\%$ , хотя и в несколько меньшей степени, чем в случае МФК с пленками нанокomпозитов, где эффект усиливался до 60% [13]. Это обстоятельство связано с тем, что в рассматриваемом диапазоне длин волн  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  обладает большим поглощением, играющим определяющую роль при усилении МРЭ и МФК. Указанный результат подтверждается и тем, что при длине волны 4130 nm, которой соответствует большее поглощение, усиление эффекта еще меньше.

В симметричной схеме удалось добиться гораздо более значительного усиления: МРЭ на отражении достигает 95% при коэффициенте отражения 0.1% и  $-47\%$  при коэффициенте отражения 1.5%. Согласно рис. 3, в резонансной области величина эффекта меняет знак, что аналогично результатам работы [13] и связано со сменой знака изменения коэффициента отражения с полем [13].

Несмотря на большое магнитопропускание пленок манганитов, добиться усиления эффекта на прохождении света в МФК в симметричной схеме микрорезонатора не удалось — на прохождении величина эффекта стремится к величине для тонкой пленки манганита. Очевидно, это связано со значительным поглощением света, характерным для рассмотренных составов.

### 4. Заключение

Таким образом, проведенные расчеты показали, что эффекты магнитопропускания и магнитоотражения в манганитах могут быть проявлениями МРЭ. Следует отметить, что расчеты выполнены в простой модели и не учитывают все особенности электронного переноса в манганитах на оптических частотах. Тем не менее, результаты расчетов на качественном уровне

соответствуют полученным экспериментальным данным. Для рассмотренного композиционного состава при комнатной температуре магнитоотражение тонких пленок манганитов того же порядка, что и для нанокompозитов с туннельным МС, но магнитопропускание значительно больше. В МФК, содержащих пленку манганита в качестве дефекта, магнитоотражение возрастает до рекордных значений, превышающих ранее полученные результаты для МФК с пленками нанокompозитов. Но добиться значительного усиления магнитопропускания в МФК с пленками манганитов не удастся в силу значительного поглощения света. Поэтому для разработки магнитооптических модуляторов света в режиме пропускания света необходима дальнейшая работа по уменьшению поглощения, увеличению МС и уменьшению управляющего магнитного поля.

Авторы выражают глубокую признательность А.П. Виноградову и С.Г. Ерохину за помощь в разработке математического аппарата и ценные консультации.

## Список литературы

- [1] Yu.P. Sukhorukov, A.P. Nosov, N.N. Loshkareva, E.V. Mostovshchikova, A.V. Telegin, E. Favre-Nicolin, L. Ranno. *J. Appl. Phys.* **97**, 103 710 (2005).
- [2] R.F.C. Marques, P.R. Abernethy, J.A.D. Mattew, C.O. Paiva-Santos, L. Perazolli, M.J. Jafellicci, S.M. Thompson. *J. Magn. Magn. Mater.* **272–276**, 1740 (2004).
- [3] A. Granovsky, M. Inoue. *J. Magn. Magn. Mater.* **272–276**, E 1601 (2004).
- [4] А. Грановский, И. Быков, Е. Ганьшина, В. Гушин, М. Инуе, Ю. Калинин, А. Козлов, А. Юрасов. *ЖЭТФ* **123**, 1256 (2003).
- [5] А. Грановский, М. Инуе, Ж.П. Клерк, А. Юрасов. *ФТТ* **46**, 484 (2004).
- [6] A.N. Yurasov, A.B. Granovsky, S.P. Tarapov, J.P. Clerc. *J. Magn. Magn. Mater.* **300**, E 52 (2006).
- [7] И.В. Быков, Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, В.С. Гушин, А.А. Козлов, С. Онума, Т. Масумото. *ФТТ* **47**, 268 (2005).
- [8] M. Inoue, R. Fujikawa, A. Baryshev, A. Khanikaev, P.B. Lim, H. Uchida, O. Aktsipetrov, A. Fedyanin, T. Murzina, A. Granovsky. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, R 151 (2006).
- [9] O.V. Melnikov, Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, E.A. Gan'shina, N.N. Loshkareva, A.R. Kaul, O.Yu. Gorbenko, A.N. Vinogradov, I.B. Smoliak. *J. Phys.: Cond. Matter* **18**, 3753 (2006).
- [10] Yu Lu, X.W. Li, G.Q. Gong, Gang Xiao, A. Gupta, P. Lecoeur, J.Z. Sun, Y.Y. Wang, V.P. Dravid. *Phys. Rev. B* **54**, R 8357 (1996).
- [11] Yu.P. Sukhorukov, E.A. Gan'shina, B.I. Belevtsev, N.N. Loshkareva, A.N. Vinogradov, K.D.D. Rathnayaka, A. Parasiris, D.G. Naugle. *J. Appl. Phys.* **91**, 4403 (2002).
- [12] Y. Okimoto, T. Katsufuji, T. Ishikawa, T. Arima, Y. Tokura. *Phys. Rev. B* **55**, 4206 (1997).
- [13] Ю.В. Борискина, С.Г. Ерохин, А.Б. Грановский, А.П. Виноградов, М. Инуе. *ФТТ* **48**, 674 (2006).
- [14] Л.В. Номерованная, А.А. Махнев, А.Ю. Румянцев. *ФТТ* **41**, 1445 (1999).