

05,09

## Модель магниторефрактивного эффекта в манганитах в рамках теории эффективной среды

© А.Н. Юрасов<sup>1</sup>, А.В. Телегин<sup>2</sup>, Ю.П. Сухоруков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА), Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: alexey\_yurasov@mail.ru

(Поступила в Редакцию 18 августа 2015 г.)

Исследован магниторефрактивный эффект (MRE) в манганитах в рамках теории эффективной среды. Проведены расчеты MRE в манганитах  $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.1$  и  $0.15$ ) при прохождении и отражении света. Хорошее согласие с экспериментальными результатами демонстрирует прямую связь MRE с магнитосопротивлением и оптическими свойствами манганитов с разным уровнем замещения. Показано, что MRE может превышать 10% в ближней и средней ИК-области вблизи магнитного фазового перехода и менять знак, как при прохождении, так и при отражении света в области фоновых мод. Результаты позволяют рекомендовать MRE как бесконтактный метод исследования магниторезистивных материалов, а также для создания сенсоров и элементов микроэлектроники.

Работа была выполнена в рамках программы УрО РАН № 15-9-2-4 и в рамках темы „Ядро“ МИРЭА при поддержке МИНОБРНАУКИ РФ Госзадание № 2014/112 НИР 1066.

### 1. Введение

С момента открытия магниторефрактивного эффекта (MRE) в металлических структурах с гигантским магнитосопротивлением (MR), где он связывался с изменением коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн для магниторезистивных металлов в магнитном поле [1], была разработана теория MRE для гранулярных и нанокompозитных металлических структур, которая хорошо согласовывалась с имеющимися экспериментальными результатами [2].

В общем случае MRE наблюдается в широком спектре нано- и микроструктур, обладающих колоссальным магнитосопротивлением, что объясняет интерес к изучению природы данного эффекта. Теоретические оценки и экспериментальные данные дают величину MRE в ближней и средней ИК-области в несколько десятков процентов, что превышает традиционные линейные магнитооптические эффекты в поляризованном свете и делает перспективным прикладное использование MRE [3].

Одним из перспективных материалов для наблюдения и изучения MRE являются манганиты с эффектом колоссального MR в широком интервале температур, в том числе выше комнатной [4]. Данные материалы также обладают гигантскими высокочастотными откликами (эффекты магнитопротекания и магнитоотражения) на колоссальное MR в широкой ИК-области в прошедшем и отраженном свете. Однако, как было показано в [5], в манганитах отсутствует прямая связь между эффектами магнитопротекания и магнитоотражения и колоссальным MR в случае изменения уровня замещения лантана (концентрационная зависимость). Теоретические исследования MRE в манганитах проводились в ряде

работ [4], однако только для оптимально замещенных (с максимальной величиной  $T_C$ ) составов с  $x = 0.3$  для двухвалентного иона и  $x = 0.15$  для одновалентного замещения без учета изменения формы, объема и соотношения фаз и т.д. в магнитном поле [4].

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию в рамках теории эффективной среды с использованием двухфазной модели спектральных зависимостей MRE в манганитах с уровнем замещения вблизи и меньше оптимального. Анализируется связь MRE с проводимостью в магнитном поле и без поля, а также условия получения максимального MRE в широкой спектральной области.

### 2. Результаты

При моделировании рассматривались тонкие пленки  $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ . Для сравнения с расчетными данными привлекались экспериментальные данные для тонких пленок ( $d \sim 100$  nm)  $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.1$  и  $0.15$ , выращенных на подложке  $\text{SrTiO}_3$  методом MOCVD [5]. Изучались температурные и спектральные изменения эффектов магнитоотражения и магнитопротекания (см. экспериментальные детали в [5]). Расчеты проводились в рамках теории эффективной среды [3], так как манганиты могут рассматриваться как эффективная среда, состоящая из низко- и высокорезистивной фазы [6]. При этом объемные доли фаз зависят от величины внешнего магнитного поля.

Двухфазная модель является наиболее простой схемой, описывающей манганиты как сложные системы с фазовым расслоением — „ФМ-металл–ПМ-изолятор“.

Формулы эффективной среды для такой двухфазной системы имеют следующий вид:

$$X \frac{\sigma_1 - \sigma(\omega, 0)}{\sigma_1 + 2\sigma(\omega, 0)} + (1 - X) \frac{\sigma_2 - \sigma(\omega, 0)}{\sigma_2 + 2\sigma(\omega, 0)} = 0,$$

$$Y \frac{\sigma_1 - \sigma(\omega, H)}{\sigma_1 + 2\sigma(\omega, H)} + (1 - Y) \frac{\sigma_2 - \sigma(\omega, H)}{\sigma_2 + 2\sigma(\omega, H)} = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$  — проводимости низко- и высокорезистивной фазы соответственно,  $Y$  — объемная доля высокопроводящей фазы в намагниченных образцах,  $X$  — объемная концентрация высокопроводящей фазы в отсутствие магнитного поля. Используя формулы (1) частиц среды, можно записать частотно-зависимую проводимость двухфазных образцов манганитов в магнитном поле

$$\sigma(\omega, H) = [0.5\sigma_2 - 0.25\sigma_1 + 0.75y(\sigma_1 - \sigma_2)] \times \left[ 1 + \left( 1 + \frac{8\sigma_1\sigma_2}{2\sigma_2 - \sigma_1 + 3y(\sigma_1 - \sigma_2)} \right)^{1/2} \right],$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma(\omega, H=0)[\sigma_1[1 - 3x] + 2\sigma(\omega, H=0)]}{\sigma_1 + \sigma(\omega, H=0)[1 - 3x]}. \quad (2)$$

Данные формулы позволяют рассчитать проводимость манганитов в рамках теории эффективной среды для сферических (форм-фактор  $L = 0.33$ ) частиц среды. Аналогично можно рассчитать проводимость с учетом разных значений форм-фактора частиц среды, т.е. для эллипсоидальных частиц. Тогда формулы (2) примут вид

$$\sigma(\omega, H) = \left[ \frac{(1 - y)\sigma_2 + y\sigma_1 - L(\sigma_1 + \sigma_2)}{2(1 - L)} \right] \times \left[ 1 + \left( 1 + \frac{4\sigma_1\sigma_2(1 - L)}{(1 - y)\sigma_2 + y\sigma_1 - L(\sigma_1 + \sigma_2)} \right)^{1/2} \right],$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma(\omega, 0)[L(\sigma_1 - \sigma(\omega, 0)) - \sigma_1x + \sigma(\omega, 0)]}{L(\sigma_1 - \sigma(\omega, 0)) + \sigma(\omega, 0)[1 - x]}, \quad (3)$$

где  $L$  — форм-фактор.

Далее, учитывая связь проводимости и диэлектрической проницаемости

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

где  $\varepsilon_r(\omega)$  — диэлектрическая проницаемость, учитывающая вклад токов смещения и используя формулы Френеля

$$g_j = \sqrt{n_j^2 - n_1^2 \sin^2 \phi}; \quad F_k = \exp(-2\pi i \lambda^{-1} g_k d_k), \quad (5)$$

$$r_{jk}^p = \frac{g_j n_k^2 - g_k n_j^2}{g_j n_k^2 + g_k n_j^2}; \quad r_{jkl}^p = \frac{r_{jk}^p + F_k^2 r_{kl}^p}{1 + F_k^2 r_{jk}^p r_{kl}^p}; \quad R = |r_{jkl}^p|^2,$$

где  $n_1$  — комплексный показатель преломления среды, из которой на систему падает свет;  $\phi$  — угол падения света из первой среды;  $j, k, l$  — номера сред;  $d_k$  — толщина соответствующей среды;  $\lambda$  — длина световой

волны в вакууме;  $R$  — коэффициент отражения света [7]. Окончательно магнитоорефрактивный эффект рассчитывается по формулам

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}, \quad \frac{\Delta T}{T} = \left| \frac{T(H) - T(0)}{T(0)} \right| \quad (6)$$

для отражения и прохождения соответственно.

Экспериментальные и расчетные спектры магнитоорефрактивного эффекта на отражении и прохождении для  $\text{La}_{0.9}\text{K}_{0.1}\text{MnO}_3$  при  $T = 251$  К представлены на рис. 1. График демонстрирует хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных для данного состава с уровнем замещения ниже оптимального. Смоделируем в дальнейшем изменение объема высоко(низко)резистивной фаз в манганите в результате

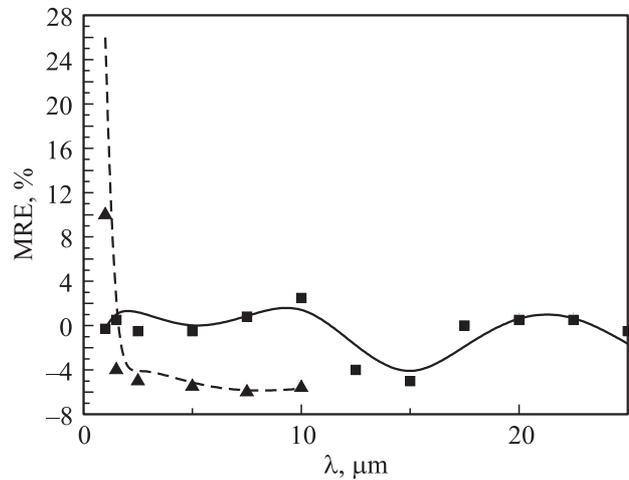


Рис. 1. Рассчитанные спектры магнитоорефрактивного эффекта на отражении (сплошная линия) и прохождении (пунктирная линия) света и экспериментальные спектры [5] на отражении (квадраты) и прохождении (треугольники) света для  $\text{La}_{0.9}\text{K}_{0.1}\text{MnO}_3$  при  $T = 251$  К.

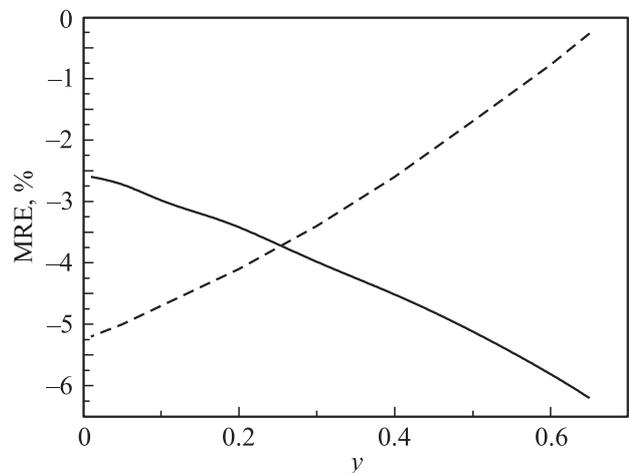
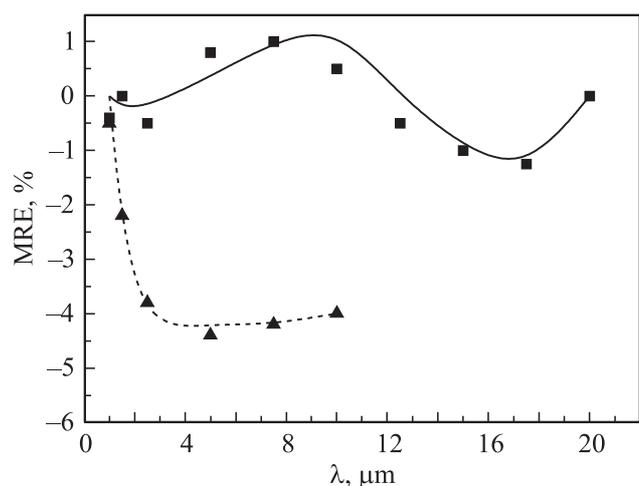
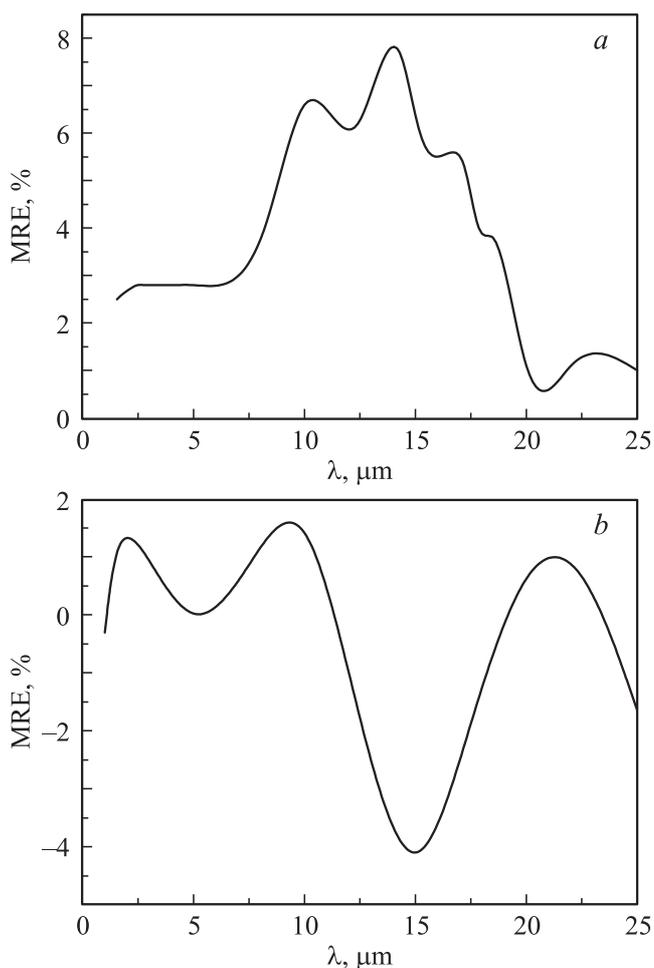


Рис. 2. Рассчитанные спектры магнитоорефрактивного эффекта на отражении (пунктир) и прохождении (сплошная линия) света в зависимости от высокопроводящей фазы в магнитном поле для  $\text{La}_{0.9}\text{K}_{0.1}\text{MnO}_3$ .



**Рис. 3.** Рассчитанные спектры магниторефрактивного эффекта на отражении (сплошная линия) и прохождении (пунктирная линия) и экспериментальные спектры [5] на отражении (квадраты) и прохождении (треугольники) для  $\text{La}_{0.85}\text{K}_{0.15}\text{MnO}_3$ .



**Рис. 4.** Рассчитанные спектры магниторефрактивного эффекта на отражении для тонких пленок: *a*)  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  при  $T = 250$  К и *b*)  $\text{La}_{0.9}\text{K}_{0.1}\text{MnO}_3$  при  $T = 251$  К.

повышения замещения и/или приложения магнитного поля.

На рис. 2 представлены рассчитанные спектры магниторефрактивного эффекта на отражении и прохождении в зависимости от объемной фазы высокорезистивной фазы в магнитном поле для  $\text{La}_{0.9}\text{K}_{0.1}\text{MnO}_3$  для длины волны  $6\ \mu\text{m}$ . Различные значения  $y$  соответствуют различным температурам. Из графика видно, что при увеличении концентрации высокопроводящей фазы  $y$  растет абсолютная величина магнитопротекания и уменьшается — магнитоотражения. Таким образом, теоретически показано, что изменение объемной концентрации высокопроводящей фазы  $y$  в магнитном поле существенно влияет на величину MRE.

Были также проведены расчеты для манганита  $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$  оптимального состава с  $x = 0.15$ . Экспериментальные и расчетные данные, приведены на рис. 3. График демонстрирует хорошее согласие расчетных и экспериментальных спектров. Из сравнения рис. 1–3 видно, что даже небольшое изменение объемной концентрации фаз в результате замещения лантана или действия магнитного поля в тонких пленках манганитов приводит к достаточно заметному изменению формы и амплитуды спектров. Например, для магнитоотражения при длине волны  $15\ \mu\text{m}$  MRE по модулю отличается в 4 раза ( $-4\%$  (рис. 1) и  $-1\%$  (рис. 3) соответственно), а для магнитопротекания при длине волны  $1\ \mu\text{m}$  эффект положителен и достигает нескольких процентов (рис. 1) и при той же длине волны он отрицателен и составляет  $1\%$  (рис. 3). Такие изменения наблюдаются при изменении объемной концентрации  $x$  всего на  $5\%$ .

Для сравнения был рассчитан MRE на отражении света пленок оптимально замещенного манганита  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ . На рис. 4 представлены рассчитанные спектры магниторефрактивного эффекта на отражении для  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  (*a*) и  $\text{La}_{0.9}\text{K}_{0.1}\text{MnO}_3$  (*b*). Из рис. 4 видно, что MRE на отражении может менять знак и сильно отличаться для различных составов манганитов, достигая значения вплоть до десяти процентов, что во многом связано с интерференционными явлениями в тонких пленках манганитов, которые необходимо принимать во внимание при проведении обработки экспериментальных результатов.

### 3. Выводы

Таким образом, можно отметить, что развитая для манганитов теория магниторефрактивного эффекта, основанная на двухфазной модели проводимости, позволяет не только качественно, но и количественно, объяснить спектры манганитов при прохождении и отражении света. Показано, что спектры MRE сильно зависят от магнитопроводимости и оптических свойств тонких пленок и кристаллов манганитов, в том числе, типа и уровня замещения манганита и величины приложенного магнитного поля.

Большая величина MRE в манганитах в относительно слабых полях позволяет предложить его в качестве удобного инструмента контроля магнитосопротивления и других оптических и магнитооптических характеристик манганитов, а также других перспективных магниторезистивных материалов.

## Список литературы

- [1] J.C. Jacquet, T. Valet. MRS Symposium Proceeding **384**, 477 (1995).
- [2] А. Грановский, И. Быков, Е. Ганьшина, В. Гушин, А. Козлов, А. Юрасов, Ю. Калинин, М. Инус. ЖЭТФ **123**, 1256 (2003).
- [3] А.Н. Юрасов. Материаловедение **6**, 32 (2014).
- [4] A. Granovsky, Yu. Sukhorukov, E. Gan'shina, A. Telegin. In: Magnetophotonics: From Theory to Applications, Springer, Berlin, N. Y. (2013) 580 p.
- [5] Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, V.D. Bessonov, E.A. Gan'shina, A.R. Kaul', I.E. Korsakov, N.S. Perov, L.Yu. Fetisov, A.N. Yurasov. J. Magn. Magn. Mater. **367**, 53 (2014).
- [6] E. Gan'shina, N. Loshkareva, Yu. Sukhorukov, E. Mostovshchikova, A. Vinogradov, L. Nomerovannaya. J. Magn. Magn. Mater. **300**, 62 (2006).
- [7] В.М. Маевский. ФММ **59**, 213 (1985).