

02

Особенности поглощения тонких пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$, полученных методом импульсного лазерного осаждения

© В.А. Бессонова, А.В. Телегин, А.П. Носов, Ю.П. Сухоруков

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,
620108 Екатеринбург, Россия
e-mail: vbessonova@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г.

В окончательной редакции 04.07.2022 г.

Принята к публикации 11.07.2022 г.

Исследованы электрические, оптические и магнитооптические свойства тонких пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ с температурой Кюри вблизи комнатной. Показано, что в области фазового перехода наблюдается резкое изменение поведения температуры зависимости электросопротивления и оптической прозрачности пленок, связанное с переходом изолятор-металл. В узкой температурной области вблизи перехода изменение внешнего магнитного поля приводит к появлению эффектов отрицательного магнитосопротивления и магнитопротекания неполяризованного света в спектральном диапазоне от 1 до $12\ \mu\text{m}$. Показано, что эффект магнитопротекания (магнитопоглощения) в пленках в основном обусловлен вкладом свободных носителей заряда. Спектры магнитопротекания являются чувствительными к магнитной и электронной неоднородностям пленок.

Ключевые слова: тонкие пленки, манганиты, магнитопоглощение, колоссальное магнитосопротивление, ИК спектроскопия, переход металл-изолятор, магнитные неоднородности.

DOI: 10.21883/OS.2022.09.53296.3223-22

Введение

Исследования магнитооптических (МО) эффектов в сильнокоррелированных соединениях на основе допированных манганитов лантана обычно ограничиваются эффектами Фарадея и Керра, магнитного кругового или линейного дихроизма в области фундаментального поглощения и диапазоном температур вблизи магнитного фазового перехода ферромагнетик/парамагнетик, который, как правило, находится ниже комнатной температуры [1–3]. Внешнее магнитное поле влияет на процессы взаимодействия света с примесными состояниями, локализованными и делокализованными носителями заряда в инфракрасном (ИК) диапазоне, что дает основной вклад в магнитотранспортные и МО свойства допированных манганитов. В ИК диапазоне спектра в манганитах в узкой области вблизи температуры Кюри (T_C) наблюдаются гигантские по величине МО эффекты (магнитопротекание и магнитоотражение света) в неполяризованном свете [4].

Магнитопротекание и магнитоотражение света в манганитах превышает в несколько раз по интенсивности традиционные линейные по намагниченности МО эффекты, и поэтому они перспективны для практических применений, например для контроля интенсивности (модуляции) светового потока в ИК области или бесконтактного детектирования наличия магнитных полей и изменения температуры. С этой точки зрения наибольший интерес представляют манганиты, обладающие высокой T_C . Например, для монокристаллов $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ она составляет $\sim 340\ \text{K}$ [5]. Несмотря на большое ко-

личество работ по оптическим свойствам допированных манганитов лантана (например, [6–9] и ссылки в них), работы по магнитопротеканию и магнитоотражению неполяризованного света в пленках $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ единичны.

В настоящей работе получены экспериментальные данные по магнитосопротивлению и магнитопротеканию света в ИК диапазоне спектра в пленках $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ разной толщины. Изучено влияние особенностей пленочного состояния и термообработки на поведение МО эффектов в пленках. С помощью теории магниторефрактивного эффекта удалось только качественно описать поведение магнитопротекания света в пленках $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$, что указывает на необходимость усовершенствования теории для допированных манганитов. Высокая чувствительность к внешнему магнитному полю и большие величины МО эффектов в пленках $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ могут быть использованы для создания бесконтактных сенсоров электромагнитных полей и модуляторов ИК диапазона, работающих при комнатной температуре.

Образцы и методика эксперимента

Тонкие пленки состава $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ толщиной $d = 80\ \text{nm}$ (далее — пленка 1) и $110\ \text{nm}$ (далее пленка 2) были получены при облучении керамической мишени стехиометрического состава $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ ($a_0 = 3.909\ \text{\AA}$) импульсным КгF-лазером ($\lambda = 248\ \text{nm}$) по методике импульсного лазерного осаждения (PLD),

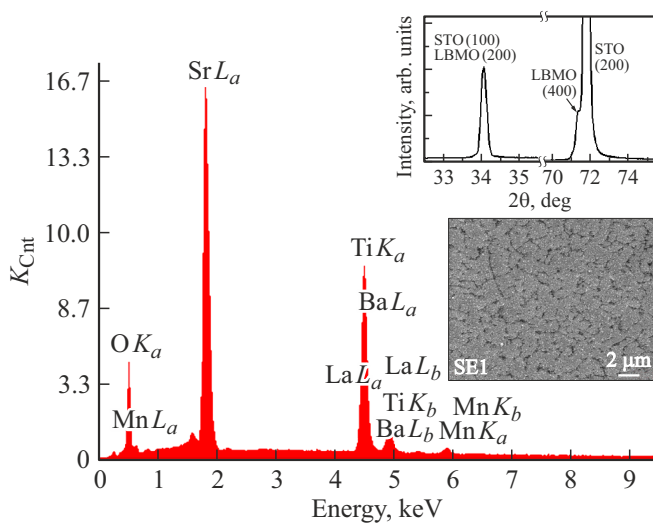


Рис. 1. Энергодисперсионный спектр пленки $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ ($d = 110 \text{ nm}$) на подложке SrTiO_3 . На вставках: сверху — данные рентгеновской дифракции; внизу — данные АСМ поверхности пленки (размер области сканирования $20 \times 20 \mu\text{m}$).

описанной в [10]. Пленки осаждались на монокристаллических подложках SrTiO_3 (001) ($a_0 = 3.905 \text{ \AA}$) при температуре 730°C и давлении кислорода в камере $P = 0.4 \text{ mBar}$. После осаждения пленки отжигались в ростовой камере в течение 30 min при давлении кислорода 500 mBar и температуре 630°C . Толщина пленок определялась по времени напыления эталонного образца и контролировалась оптическим профилометром ZYGO. Состав мишени и полученных пленок контролировался с помощью рентгеноспектрального микроанализа на электронном микроскопе JEOL JXA-733 с абсолютной погрешностью определения концентрации химических элементов ± 0.01 . Данный метод не позволил оценить содержание кислорода, по этой причине величина δ не приводится. Морфология пленок анализировалась с помощью автоматизированного атомно-силового (АСМ) зондового микроскопа „Солвер Некст“ (НТ-МДТ). На вставке к рис. 1 показано изображение рельефа поверхности пленок без явно выраженных особенностей. Такой рельеф наблюдается, как правило, при режимах роста, подобных послойному. Это характерно для методики PLD и использованных высоких температурах подложки. Отметим, что средняя степень шероховатости пленки составила $\sim 25 \text{ nm}$, что несколько превышает обычные значения для пленок, полученных магнетронным распылением [11]. Тем не менее по данным рентгеноструктурных исследований, выполненных с использованием дифрактометра ДРОН-4М, однофазность пленок подтверждается наличием четко выраженных и близко расположенных рефлексов от пленки и подложки и небольшим числом слабых дополнительных линий. Рентгеноструктурные исследования были выполнены как непосредственно после роста

пленок, так и после дополнительной термообработки образцов при $T = 700^\circ\text{C}$ в потоке кислорода в муфельной печи в течение 6 h. После термообработки на рентгенограммах остались только линии, принадлежащие псевдокубической структуре манганита (рис. 1). Согласно рентгеноструктурным данным, постоянная кристаллической решетки пленок в кубическом приближении составила $a_0 = 3.97 \text{ \AA}$, что близко к значениям $a_0 = 3.91 \text{ \AA}$ для мишени и $a_0 = 3.92 \text{ \AA}$ для монокристаллических пленок $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$, полученных магнетронным распылением [11]. Наблюдаемое различие a_0 можно объяснить различной степенью шероховатости, механическими напряжениями и возможными небольшими структурными искажениями решетки в исследуемых пленках [11,12]. Небольшое изменение толщины не влияет на структурные параметры полученных пленок. Температура T_C образцов, определенная по данным экваториального эффекта Керра, согласуется с данными измерений намагниченности [8,13] и составила 301 и 310 K для пленок 1 и 2 соответственно.

Оптические и МО свойства пленок исследовались в ИК диапазоне длин волн $0.8 \leq \lambda \leq 30 \mu\text{m}$ и температурном интервале $200 \leq T \leq 360 \text{ K}$ с помощью оригинальной криомагнитооптической установки на базе призмного спектрометра ИКС-21М при нормальном прохождении через образец неполяризованного (естественного) света от излучателя (глобар с рабочей температурой $T = 1350^\circ\text{C}$) [14]. При измерениях образец крепился на медном держателе заливного азотного криостата, оснащенного оптическими окнами из KRS-5. В установке одновременно с оптическими параметрами измерялись электро- (ρ) и магнитосопротивление ($\Delta\rho/\rho_0 = (\rho_H - \rho_0)/\rho_0$) пленок на постоянном токе (где ρ_H и ρ_0 — электросопротивление образца в магнитном поле и без поля соответственно). Контакты на образцах были получены с помощью ультразвуковой пайки беспримесным индиевым припоем. Полевые и спектральные зависимости магнитопропускания ($\Delta t/t_0 = (t_H - t_0)/t_0$, где t_H и t_0 — интенсивность прошедшего через образец света в магнитном поле и без поля соответственно) и магнитосопротивления измерялись в магнитных полях $H \leq 8 \text{ kOe}$, направленных вдоль оси распространения луча света и перпендикулярно плоскости пленки. Относительная погрешность определения $\Delta t/t_0$ составила $\sim 0.5\%$. Возможное влияние анизотропии пленок и связанных с ней изменений МО свойств, а также различных поляризационных эффектов в работе не рассматривалось в виду их малости в данных условиях эксперимента.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Оптические свойства пленок допированных манганитов с эффектом колоссального магнитосопротивления (КМС) были рассмотрены, например, в рабо-

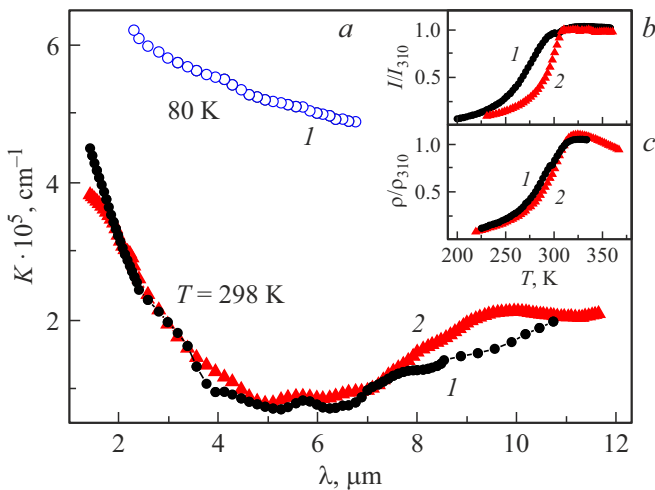


Рис. 2. (a) Спектры поглощения K пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ (1 — 80 nm, 2 — 110 nm) при разных температурах; (b) температурные зависимости относительного изменения прозрачности I/I_{310} и (c) относительного изменения электропроводности пленок ρ/ρ_{310} .

тах [2,5,15–20]. Спектры поглощения (K) полученных пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ при $\lambda < 2 \mu\text{m}$ формируются краем поглощения, связанным с фундаментальными переходами ${}^5E_g - {}^5T_{2g}$ и переходами внутри электронного ян-теллеровского кластера $[\text{MnO}_6]_{\text{JT}}^{10-}$. При $\lambda \geq 5 \mu\text{m}$ проявляется вклад делокализованных носителей заряда, а при $\lambda \geq 8 \mu\text{m}$ — переходы внутри дырочного кластера $[\text{MnO}_6]_{\text{JT}}^{8-}$ и фоновое поглощение подложки и пленки (рис. 2, a). С уменьшением температуры ниже T_C поглощение резко возрастает во всем рассматриваемом спектральном диапазоне в основном за счет сильного вклада делокализованных носителей заряда, который маскирует остальные особенности. Аналогичное поведение поглощения света в легированных манганитах наблюдалось в работах [8,9,21–24]. Наиболее наглядно взаимодействие света со свободными носителями заряда проявляется в резком изменении интенсивности света, прошедшего через пленку, при температуре ниже T_C (рис. 2, b), которое является оптическим аналогом наблюдаемого перехода металл-изолятор в электропроводности (рис. 2, c) [4].

В узком температурном интервале вблизи T_C в допированных манганитах максимально проявляется влияние внешнего магнитного поля, которое приводит к появлению эффекта отрицательного магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ и его оптической (высокочастотной) составляющей в виде эффекта гигантского отрицательного магнитопропускания света $\Delta t/t_0$, что обусловлено подавлением магнитным полем флуктуаций магнитных моментов вблизи магнитного фазового перехода (рис. 3). Отметим, что температуры максимумов эффектов $\Delta t/t_0$ и $\Delta\rho/\rho_0$ близки к T_C пленок, полученной из данных эффекта Керра и намагниченности. При отклонении

температуры пленок от T_C величины эффектов магнитопропускания и магнитосопротивления быстро спадают до нуля. Такое поведение $\Delta t/t_0(T)$ и $\Delta\rho/\rho_0(T)$ является характерным для манганитов с КМС, как наблюдалось в работах [2,4,6,9,25–27]. Однако в нашем случае в $\Delta t/t_0(T)$ и $\Delta\rho/\rho_0(T)$ пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ наблюдается затянутый низкотемпературный спад (рис. 3), который можно связать с магнитной неоднородностью наших образцов, как это было установлено для других систем манганитов, например, в [6,21].

Из работ [28–32] известно, что послеростовая термообработка пленок в кислороде стимулирует улучшение кристаллической структуры, магнитных и электрических характеристик манганитов, приближая их к параметрам, соответствующим таковым для монокристаллов. Изменение стехиометрии по кислороду влияет на соотношение концентраций ионов $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$, ответственных за появление ферромагнитного обменного взаимодействия в манганитах, и соответственно изменяет намагниченность и T_C пленок. В нашем случае было получено, что дополнительная термообработка образцов при температурах ниже температуры синтеза слабо влияет на нестехиометрию по кислороду, но снижает общую дефектность (повышает оптическую прозрачность) пленок. Это подтверждается и температурными зависимостями относительного изменения пропускания $I/I_{310}(T)$ (рис. 2, b) и $\Delta t/t_0(T)$ (рис. 3, a), измеренными вне области примесных полос. Как известно, магнитопропускание является очень чувствительным к изменению объема ферромагнитной фазы в манганитах (обзор [4]

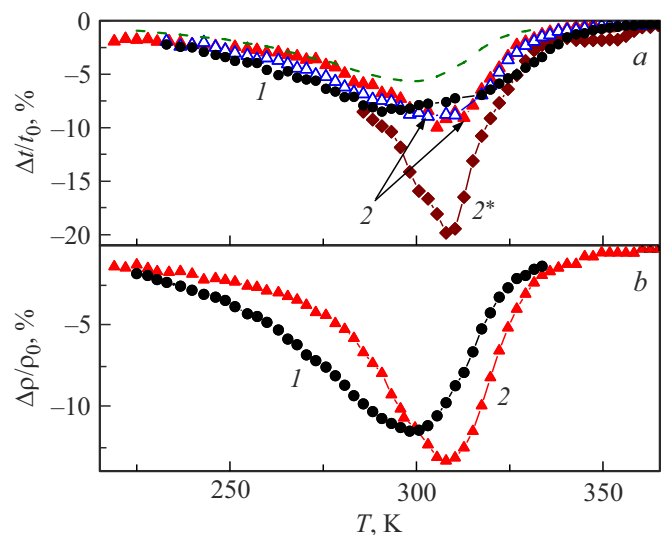


Рис. 3. (a) Температурные зависимости магнитопропускания $\Delta t/t_0$ пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ (1 — 80 nm, 2 — 110 nm) на длине волны $\lambda = 6 \mu\text{m}$ ($\lambda = 2 \mu\text{m}$ для пленки 110 nm — 2*) в магнитном поле $H = 7.5 \text{ kOe}$. Открытые символы — магнитопропускание $\Delta t/t_0$ пленки 2 до термообработки. Штриховая линия — результат расчета $\Delta t/t_0$ по выражению (2) для пленки 1. (b) Температурные зависимости магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ пленок 1 и 2 в поле $H = 7.5 \text{ kOe}$.

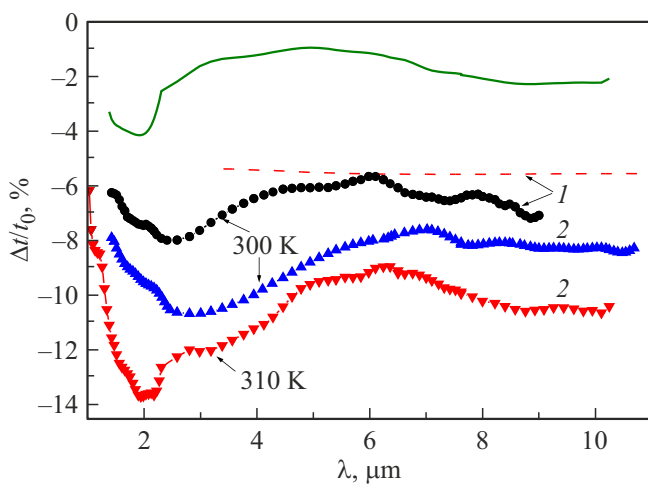


Рис. 4. Спектры магнитопротекания $\Delta t/t_0$ пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ (1 — 80 nm и 2 — 110 nm) при разных температурах в поле $H = 7.5$ kOe. Штриховая линия — расчет для пленки 1 по выражению (2). Сплошная линия — спектр, полученный после вычитания спектра магнитопротекания $\Delta t/t_0$ (при $T = 310$ K) из спектра $\Delta t/t_0$ (при $T = 300$ K) для пленки 2.

и ссылки в нем). Однако для пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ дополнительная термообработка практически не оказывала влияние на величину и положение максимума $\Delta t/t_0$, т.е. стехиометрия и объем ферромагнитной фазы в пленках являются стабильными. Отметим, что такое поведение $\Delta t/t_0$ хорошо согласуется с известным утверждением об оптимальном уровне замещения ($x \sim 1/3$) трехвалентных ионов La двухвалентными ионами 3d-металлов в манганитах согласно фазовой диаграмме [5]. В нашем случае пленки $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ обладают максимальным объемом ферромагнитной фазы, и максимум в зависимости $\Delta t/t_0(T)$ хорошо согласуется с T_C для монокристаллов соответствующего состава.

Как было установлено ранее в [7,8,21,33], оптические данные (по сравнению с транспортными и рентгеноструктурными) являются более чувствительными к наноразмерным электронным и магнитным неоднородностям различной природы и могут использоваться для аттестации магнитных пленок. В сравнении со спектрами поглощения спектры магнитопротекания ИК излучения в полученных пленках имели более сложный вид (рис. 4), обусловленный главным образом конкуренцией положительного по знаку вклада от межзонных переходов в видимом и ближнем ИК диапазонах и отрицательного вклада в ИК области спектра, связанного с взаимодействием света с делокализованными носителями.

Кроме того, в спектрах $\Delta t/t_0$ проявлялись особенности в виде пиков вблизи $\lambda = 3 \mu\text{m}$ (~ 0.4 eV) и $9 \mu\text{m}$ (~ 0.14 eV), соответствующие положению примесных полос в спектре поглощения и соответственно связанных с переходами в электронных $[\text{MnO}_6]_{\text{JT}}^{10-}$ и в ды-

рочных $[\text{MnO}_6]_{\text{JT}}^{8-}$ кластерах в манганитах. Аналогичные особенности в магнитопротекании манганитов наблюдались также в работах [2,34] и в наноструктурированных пленках близкого состава $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ [35,36].

Таким образом, данные полосы в спектрах $\Delta t/t_0$ связаны с центрами зарядовой и магнитной неоднородности и фазовым расслоением типа „ферромагнитный металл–парамагнитный изолятор“ в пленках. Отметим, что интенсивность и положение этих полос в спектрах не зависят от температуры и уровня допирования, но могут варьировать в зависимости от содержания вакансий в кислородной подрешетке и степени дефектности пленок [34]. Как видно из рис. 4, в спектре $\Delta t/t_0$ пленки 110 nm при $T = T_C$ помимо полосы в области $3 \mu\text{m}$ присутствовала более интенсивная полоса с максимумом на $\lambda = 2 \mu\text{m}$. Ниже T_C спектр существенно перестраивался: пик при $2 \mu\text{m}$ пропадал, но сохранялась полоса при $3 \mu\text{m}$. Кроме того, происходил небольшой сдвиг всего спектра в область больших длин волн. Для того чтобы выделить вклад носителей заряда и примесных полос для пленки 2, был построен разностный спектр эффектов магнитопротекания, измеренных при $T = 300$ K и $T = T_C = 310$ K. Полученный спектр наглядно демонстрирует наличие максимумов на длинах волн 2 и $9 \mu\text{m}$ (рис. 4). Полоса при $2 \mu\text{m}$ наблюдалась нами ранее в спектрах $\Delta t/t_0$ других пленок манганитов, однако детально ее природа не обсуждалась. Можно предположить, что в данном случае имеет место наложение двух полос: полосы, связанной с переходами в электронных кластерах, и полосы, связанной с возбуждением поверхностных или объемных плазмонов, как в [37], или различных геометрических резонансов (резонансов Ми) на границе неоднородностей в области фазового расслоения, как в работе [38]. Важно заметить,

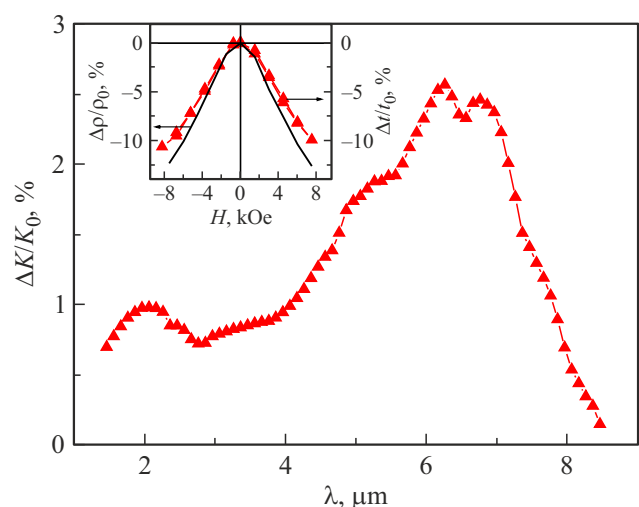


Рис. 5. Спектр магнитопоглощения $\Delta K/K_0$ пленки $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ толщиной 110 nm при $T = 310$ K. На вставке: полевые зависимости магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ и магнитопротекания $\Delta t/t_0$ пленки на длине волны $\lambda = 6 \mu\text{m}$ при $T = 310$ K.

что температурные зависимости $\Delta t/t_0$ на длинах волн 2 и $6\ \mu\text{m}$ совпадают (рис. 3, а), что свидетельствует о том, что полоса при $2\ \mu\text{m}$ также связана с образованием ферромагнитной фазы в пленке.

Расчет спектров магнитопоглощения света ($\Delta K/K_0 = (K_H - K_0)/K_0$) в пленках с учетом данных по отражению и магнитоотражению света, взятых из работы [13], обнаружил широкий максимум в области $4\text{--}8\ \mu\text{m}$ между примесными полосами и лишь небольшой пик в области $2\ \mu\text{m}$ (рис. 5). Таким образом, можно сделать вывод о том, что в поглощении ИК излучения в магнитном поле основную роль играет вклад, связанный с появлением свободных носителей заряда в допированных манганитах вблизи и ниже T_C .

Рассмотрим влияние толщины пленок на эффект магнитопротекания. Согласно фазовой диаграмме [5], в исследуемых пленках $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ объем ферромагнитной фазы практически максимальный. Следовательно, разная величина $\Delta t/t_0$ для пленок (рис. 3 и 4) может быть связана как с толщиной, так и с магнитоотражением $\Delta R/R_0$ пленки согласно выражению

$$\frac{\Delta t}{t} = A \exp[(K_0 - K_H)d] - 1, \quad (1)$$

где $A = [(1 - R_H)/(1 - R_0)]^2$, K_0 и K_H , R_0 и R_H — коэффициенты поглощения и отражения света при отсутствии и наличии магнитного поля соответственно.

Согласно теории магниторефрактивного эффекта в оптимально допированных манганитах [4], магнитопротекание прямо пропорционально магнитосопротивлению:

$$\frac{\Delta t}{t} = 0.5 \frac{\Delta \rho}{\rho} t_0 k^2 \frac{2n^2 + n}{n^2 + k^2}, \quad (2)$$

где n , k — индексы рефракции.

Оценки величины $\Delta t/t_0$ для пленок по формуле (2) дают примерно в 2–4 раза меньшие значения (штриховая линия на рис. 3, а) по сравнению с экспериментальными данными. Отметим, что расчет спектров магнитопротекания пленок по формуле (2) при фиксированном значении температуры в приближении линейной дисперсии n и k также имел только качественное согласие с экспериментальной кривой (например, пленка 1 толщиной $80\ \text{nm}$ на рис. 4). Логично предположить, что различие теоретической и экспериментальной кривых обусловлено как допущенными приближениями в дисперсии n и k , так и неучтенным вкладом, связанным с отражением света на границе пленка-подложка для тонких пленок с толщиной, близкой глубине скин-слоя [6]. Вклад света, отраженного от подложки, может дать увеличение эффективной толщины пленки и усиление наблюдаемого эффекта $\Delta t/t_0$ согласно выражению (1). Также в теории магниторефрактивного эффекта не учитывается вклад примесных переходов и различных резонансных состояний в манганитах, которые, как видно из рис. 4 и 5, также определяют поведение и спектральную зависимость $\Delta t/t_0$ в ИК области.

В отличие от намагниченности и эффекта Керра полевые зависимости $\Delta \rho/\rho_0(H)$ и $\Delta t/t_0(H)$ пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ в области T_C имели линейный ход без насыщения в магнитных полях до $8\ \text{kOe}$ (вставка на рис. 5).

Знак эффекта магнитопротекания в пленках не зависит от направления внешнего магнитного поля, т. е. эффект является четным. Это свидетельствует о том, что эффект $\Delta t/t_0$ в неполяризованном свете связан в основном с изменением под действием магнитного поля диагональных компонентов комплексной диэлектрической проницаемости, а также об отсутствии заметного вклада в условиях эксперимента линейных МО явлений в отличие от того, что наблюдалось, например, в шпинелях в работе [39]. Смена геометрии приложения магнитного поля (поле в плоскости пленки и перпендикулярно ходу луча света) практически не повлияла на общий вид полевых и спектральных зависимостей магнитопротекания (данные не представлены). Такое поведение, мы считаем, обусловлено нахождением максимума эффекта вблизи T_C пленки. В этом диапазоне температур флуктуации магнитных моментов максимальны, и система становится малочувствительной к ориентации внешнего магнитного поля. Возможно только изменение абсолютной величины эффектов магнитопротекания и магнитосопротивления в пленках в результате влияния размагничивающего фактора.

Заключение

Методом импульсного лазерного осаждения получены пленки $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ толщиной 80 и $110\ \text{nm}$ на подложках из SrTiO_3 . Показано, что вблизи комнатной температуры помимо колоссального магнитосопротивления в пленках имеет место гигантский эффект отрицательного магнитопротекания (магнитопоглощения) неполяризованного света, который достигает 20% в поле $7.5\ \text{kOe}$ в широкой спектральной области от 1 до $12\ \mu\text{m}$. Сложная форма спектров поглощения и магнитопротекания с особенностями вблизи примесных полос отражает магнитную и электронную неоднородность полученных пленок. Показано, что основную роль в магнитопоглощении света в пленках в ИК области спектра играет влияние внешнего магнитного поля на флуктуации магнитных моментов вблизи температуры T_C и соотношение локализованных и делокализованных носителей заряда. Дополнительная термообработка пленок за счет процессов рекристаллизации уменьшает общую дефектность и повышает их оптическую прозрачность, но не влияет на магнитопротекание вследствие фиксированного объема ферромагнитной проводящей фазы в оптимально-допированных пленках. Для описания магнитопротекания в тонких пленках манганитов в теории магниторефрактивного эффекта необходимо учитывать дополнительные механизмы поглощения света в манганитах, а также вклад света, отраженного от подложки.

ки. Высокая чувствительность электросопротивления и пропускания света в пленках $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-\delta}$ к внешнему магнитному полю может быть использована для создания бесконтактных сенсоров электромагнитных полей и МО модуляторов света, работающих при комнатной температуре.

Благодарности

Авторы признательны за помощь в измерениях С.В. Наумову (рентгеновские измерения и отжиги) и Е.И. Патракову (электронная микроскопия).

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема „Спин“ № 122021000036-3).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Yu.E. Samoshkina, I.S. Edelman, M.V. Rautskii, M.S. Molokeev. *J. Alloys and Compounds*, **782**, 334–342 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.158
- [2] E. Gan'shina, N. Loshkareva, Yu. Sukhorukov, E. Mostovshchikova, A. Vinogradov, L. Nomerovannaya. *J. Magn. Magn. Mater.*, **300** (1), 62 (2006). DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.10.033
- [3] M. Jungbauer, S. Hühn, J.-O. Krisponeit, V. Moshnyaga. *New J. Physics*, **16**, 063034 (2014). DOI: 10.1088/1367-2630/16/6/063034
- [4] A. Granovsky, Yu. Sukhorukov, E. Gan'shina, A. Telegin. *Magnetorefractive effect in magnetoresistive materials*, in: M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev (Eds.), *Magnetophotonics: From Theory to Applications, Magnetophotonics* (Springer Series in Materials Science 178, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013), p. 107–133. DOI: 10.1007/978-3-642-35509-7_5
- [5] N.G. Bebenin, N.N. Loshkareva, A.A. Makhnev, E.V. Mostovshchikova, L.V. Nimerovannaya, E.A. Gan'shina, A.N. Vinogradov, Ya.M. Mukovskii. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **22** (9), 096003 (2010). DOI: 10.1088/0953-8984/22/9/096003
- [6] Yu.P. Sukhorukov, A.P. Nosov, N.N. Loshkareva, E.V. Mostovshchikova, A.V. Telegin, E. Favre-Nicolin, L. Ranno. *J. Appl. Phys.*, **97**, 103710 (2005). DOI: 10.1063/1.1897484
- [7] Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, Е.А. Ганьшина, Н.Н. Лошкарёва, А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, Е.В. Мостовщикова, О.В. Мельников, А.Н. Виноградов. Письма в ЖЭТФ, **31** (11), 78 (2005). [Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, E.A. Gan'shina, N.N. Loshkareva, A.R. Kaul', O.Yu. Gorbenko, E.V. Mostovshchikova, O.V. Mel'nikov, A.N. Vinogradov. *Tech. Phys. Lett.*, **31** (6), 484 (2005). DOI: 10.1134/1.1969772].
- [8] А.Б. Грановский, Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, В.Д. Бессонов, Е.А. Ганьшина, А.Р. Кауль, И.Е. Корсаков, О.Ю. Горбенко, Х. Гонзалес. *ЖЭТФ*, **139** (1), 90 (2011). [A.B. Granovskii, Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, V.D. Bessonov, E.A. Gan'shina, A.R. Kaul', I.E. Korsakov, O.Yu. Gorbenko, J. Gonzalez. *J. Exp. Theor. Phys.*, **112** (1), 77 (2011). DOI: 10.1134/S106377611005105X].
- [9] 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. *JMMM*, **367**, 53 (2014). DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.04.055
- [10] А.П. Носов, С.С. Дубинин, Д. В. Стариченко, Д.В. Иванов, А.В. Кобелев, Е.А. Кравцов, М.В. Рябухина, Н.О. Антропов, В.Д. Бессонов, С.В. Наумов, В.В. Устинов. *ФММ*, **119** (11), 1121 (2018). DOI: 10.1134/S0015323018110153 [A.P. Nosov, S.S. Dubinin, D.V. Starichenko, D.V. Ivanov, A.V. Koblelev, E.A. Kravtsov, M.V. Ryabukhina, N.O. Antropov, V.D. Bessonov, S.V. Naumov, V.V. Ustinov. *Phys. Metals Metallogr.*, **119** (11), 1062 (2018). DOI: 10.1134/S0031918X18110157].
- [11] Y.-Ch. Liang, H.-Y. Lee, Y.-Ch. Liang, H.-J. Liu, K.-F. Wu, T.-B. Wu. *Thin Solid Films*, **494** (1–2), 196 (2006). DOI: 10.1016/j.tsf.2005.07.187
- [12] J. Zhang, H. Tanaka, T. Kanki, J.-H. Choi, T. Kawai. *Phys. Rev. B*, **64** (18), 184404 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevB.64.184404
- [13] А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, А.П. Носов, В.А. Бессонова, Е.А. Ганьшина. *ФТТ*, **59** (2), 284 (2017). [A.V. Telegin, Yu.P. Sukhorukov, A.P. Nosov, V.A. Bessonova, E.A. Gan'shina. *Phys. Solid State*, **59** (2), 292 (2017). DOI: 10.1134/S1063783417020305].
- [14] Г.В. Показаньев, Н.Н. Лошкарёва, Ю.П. Сухоруков, А.И. Трофимов. *ПТЭ*, **29** (5) 205 (1986).
- [15] C. Roy, R.C. Budhani. *J. Appl. Phys.*, **85** (6), 3124 (1999). DOI: 10.1063/1.369651
- [16] Y. Okimoto, Y. Tokura. *J. Superconductivity*, **13** (2), 271 (2000). DOI: 10.1023/A:1007708218202
- [17] R. Rauer, M. Rübhausen, K. Dörr. *Phys. Rev. B*, **73** (9), 092402 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevB.73.092402
- [18] Ю.П. Сухоруков, А.М. Москвин, Н.Н. Лошкарёва, И.Б. Смоляк, В.Е. Архипов, Я.М. Муковский, А.В. Шматок. *ЖТФ*, **71** (6) 139 (2001). [Yu.P. Sukhorukov, A.M. Moskvina, N.N. Loshkareva, I.B. Smolyak, V.E. Arkhipov, Ya.M. Mukovskii, A.V. Shmatok. *Tech. Phys.* **46** (6), 778 (2001). DOI: 10.1134/1.1379652].
- [19] A.V. Boris, N.N. Kovaleva, A.V. Bazhenov, A.V. Samoilov, N.-C. Yeh, R.P. Vasquez. *J. Appl. Phys.*, **81** (8), 5756 (1997). DOI: 10.1063/1.364716
- [20] Ю.Э. Гребенькова, А.Э. Соколов, И.С. Эдельман, Н.В. Андреев, В.И. Чичков, Я.М. Муковский. Письма в ЖЭТФ, **98** (8), 518 (2013). [Yu.E. Greben'kova, A.E. Sokolov, I.S. Edelman, N.V. Andreev, V.I. Chichkov, Ya.M. Mukovskii. *Jetp. Lett.*, **98** (8), 460 (2013). DOI: 10.1134/S0021364013210078].
- [21] Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарёва, Е.А. Ганьшина, А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, Е.В. Мостовщикова, А.В. Телегин, А.Н. Виноградов, И.К. Родин. *ФТТ*, **46** (7), 1203 (2004). [Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva, E.A. Gan'shina, A.R. Kaul', O.Yu. Gorbenko, E.V. Mostovshchikova, A.V. Telegin, A.N. Vinogradov, I.K. Rodin. *Phys. Solid State*, **46** (7), 1241 (2004). DOI: 10.1134/1.1778448].
- [22] Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, А.Б. Грановский, Е.А. Ганьшина, А. Жуков, Х. Гонзалес, Г. Херранз, Х.М. Кайседо, А.Н. Юрасов, В.Д. Бессонов, А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, И.Е. Корсаков. *ЖЭТФ*, **141** (1), 160 (2012).

- [Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, A.B. Granovsky, E.A. Gan'shina, A. Zhukov, J. Gonzalez, G. Herranz, J.M. Caicedo, A.N. Yurasov, V.D. Bessonov, A.R. Kaul', O.Yu. Gorbenko, I.E. Korsakov. *J. Exp. Theor. Phys.*, **114** (1), 141 (2012). DOI: 10.1134/S1063776111160151].
- [23] Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.А. Ганьшина, А.Р. Кауль, А.А. Каменев, О.Ю. Горбенко, А.В. Телегин. *ФММ*, **107** (6), 622 (2009). [Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva, E.A. Gan'shina, A.R. Kaul', A.A. Kamenev, O.Yu. Gorbenko, A.V. Telegin. *Phys. Metals Metallogr.*, **107** (6), 579 (2009). DOI: 10.1134/S0031918X09060076].
- [24] Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, В.Д. Бессонов, Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, А.Р. Кауль, А.Н. Юрасов. *Известия РАН. Сер. физ.*, **77** (10), 1482 (2013). [Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, V.D. Bessonov, E.A. Ganshina, A.B. Granovsky, A.R. Kaul, A.N. Yurasov. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **77** (10), 1275 (2013). DOI: 10.3103/S1062873813100286].
- [25] Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, 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. Gorbenko, E.A. Gan'shina, A.N. Vinogradov. *Tech. Phys Lett.*, **29** (11) 904 (2003). DOI: 10.1134/1.1631359].
- [26] Ю.П. Сухоруков, Е.А. Ганьшина, Н.Н. Лошкарева, А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, А.В. Телегин, С.Н. Тугушев, О.В. Мельников, А.Н. Виноградов. *ЖЭТФ*, **131** (4), 642 (2007). [Yu.P. Sukhorukov, E.A. Gan'shina, N.N. Loshkareva, A.R. Kaul', O.Yu. Gorbenko, A.V. Telegin, S.N. Tugushev, O.V. Mel'nikov, A.N. Vinogradov. *J. Exp. Theor. Phys.*, **104** (4) 569 (2007). DOI: 10.1134/S1063776107040073].
- [27] A.V. Telegin, Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva, E.V. Mostovshchikova, N.G. Bebenin, E.A. Gan'shina, A.B. Granovsky. *JMMM*, **383**, 104 (2015). DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.080.
- [28] W.S. Choi, Z. Marton, S.Y. Jang, S.J. Moon, B.C. Jeon, J.H. Shin, S.S.A. Seo, T.W. Noh, K. Myung-Whun, H.N. Lee, Y.S. Lee. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42** (16) 165401 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/16/165401.
- [29] T.R. Gopalarao, S. Ravi, D. Pamu. *J. Supercond. Nov. Magn.*, **28** (5), 1571 (2015). DOI: 10.1007/s10948-014-2879-3.
- [30] S.V. Trukhanov, N.V. Kasper, I.O. Troyanchuk, H. Szymczak, K. Bärrner. *Phys. Stat. Sol. (b)*, **233** (2), 321 (2002). DOI: 10.1002/1521-3951(200209)233:2<321::AID-PSSB321>3.0.CO;2-5.
- [31] K. Li, R. Cheng, Sh. Wang, Y. Zhang. *J. Phys.: Condens. Matter*, **10** (19), 4315 (1998). DOI: 10.1088/0953-8984/10/19/019.
- [32] O. Ripeka, Mercier, R.G. Buckley, A. Bittar, H.J. Trodahl, E.M. Haines, J.B. Metson, Y. Tomioka. *Phys. Rev. B*, **64** (3), 035106 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevB.64.035106.
- [33] Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, Е.А. Ганьшина, Е.В. Мостовщикова, И.К. Родин, А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, А.А. Босак, А.С. Москвин, Е.В. Зенков. *ЖЭТФ*, **123** (2), 293 (2003). [Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva, E.A. Gan'shina, E.V. Mostovshchikova, I.K. Rodin, A.R. Kaul, O.Yu. Gorbenko, A.A. Bosak, A.S. Moskvina, E.V. Zenkov. *J. Exp. Theor. Phys.*, **96**, 257 (2003). DOI: 10.1134/1.1560398].
- [34] Н.Н. Лошкарева, Ю.П. Сухоруков, Е.В. Мостовщикова, Е.А. Ганьшина. *Известия РАН. Серия физ.*, **71** (11), 1617 (2007). [N.N. Loshkareva, Yu.P. Sukhorukov, E.V. Mostovshchikova, E.A. Gan'shina. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **71** (11), 1574 (2007). DOI: 10.3103/S1062873807110317].
- [35] A.V. Telegin, S. Barsaume, V.A. Bessonova, Yu.P. Sukhorukov, A.P. Nosov, A.V. Kimel', E.A. Gan'shina, A.N. Yurasov, E.A. Lysina. *J. Magn. Magn. Mater.*, **459**, 317 (2018). DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.006.
- [36] A.V. Telegin, V.A. Bessonova, Yu.P. Sukhorukov. *Physica B: Condens. Matter*, **536**, 672 (2018). DOI: 10.1016/j.physb.2017.09.100.
- [37] A.K. Sarychev, S.O. Boyarintsev, A.L. Rakhmanov, K.I. Kugel, Yu.P. Sukhorukov. *Phys. Rev. Lett.*, **107** (26), 267401 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.267401.
- [38] A.S. Moskvina, E.V. Zenkov, Yu.P. Sukhorukov, E.V. Mostovshchikova, N.N. Loshkareva, A.R. Kaul, O.Yu. Gorbenko. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, 2635 (2003). DOI: 10.1088/0953-8984/15/17/317.
- [39] Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, Н.Г. Бебенин, Р.И. Зайнуллина, Е.В. Мостовщикова, Н.А. Виглин, Е.А. Ганьшина, Г.С. Зыков, В.А. Федоров, Т.К. Менщикова, А.А. Бучкевич. *ЖЭТФ*, **148** (3), 503 (2015). [Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, N.G. Bebenin, R.I. Zainullina, E.V. Mostovshchikova, N.A. Viglin, E.A. Gan'shina, G.S. Zykov, V.A. Fedorov, T.K. Menshchikova, A.A. Buchkevich. *J. Exp. Theor. Phys.*, **121** (3), 437 (2015). DOI: 10.1134/S1063776115090137].