

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-55-63>

EDN FDCWGD



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности температурных зависимостей колоссального и туннельного магнитосопротивления в пленках манганитов

Т.Н. Бахвалова¹, А.Н. Юрасов¹, М.М. Яшин^{1,®}, В.А. Бессонова²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108 Россия

® Автор для переписки, e-mail: ihkamax@mail.ru

• Поступила: 03.04.2025 • Доработана: 15.04.2025 • Принята к опубликованию: 20.11.2025

Резюме

Цели. Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование особенностей температурных зависимостей магнитосопротивления в наноструктурированных пленках легированных манганитов. В широком температурном диапазоне изучено поведение электросопротивления пленок манганитов состава $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$, выращенных методом лазерной абляции на различных диэлектрических подложках.

Методы. Для достижения поставленной цели методом лазерной абляции с использованием импульсного эксимерного были выращены эпитаксиальные пленки $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ толщиной 80 нм на монокристаллических подложках SrTiO_3 и $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$. Магнитосопротивление измерялось двухконтактным методом на постоянном токе в полях до 8 кЭ в плоскости образца и температурном интервале 80–350 К. Для достижения поставленной цели применялась эмпирическая модель магнитосопротивления в двух температурных областях: вблизи температуры магнитного фазового перехода и в области основного состояния.

Результаты. Построены эмпирические температурные зависимости магнитосопротивления для наноструктурированной пленки $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$, охватывающие как область температуры Кюри, так и область основного состояния. Показано, что в эпитаксиальной монокристаллической пленке $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ магнитосопротивление имеет выраженный максимум вблизи температуры Кюри и пренебрежимо мало в других областях. В пленке $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ с вариантной структурой имеется сильный низкотемпературный вклад в магнитосопротивление, связанный с изменением высокочастотной проводимости пленки во внешнем магнитном поле из-за процессов туннелирования спин-поляризованных электронов через границы структурных доменов. Предложена единая эмпирическая модель для описания различных механизмов магнитосопротивления в легированных манганитах.

Выводы. Впервые в рамках одной эмпирической модели проведено описание колоссального и туннельного магнитосопротивления для пленок легированных манганитов. Показано, что такая модель дает хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных в пленке $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ с вариантной структурой. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Полученные данные могут способствовать пониманию механизмов магнитосопротивления и развитию теории магниторефрактивного эффекта для тонкопленочных манганитов, а также разработке новых подходов к управлению динамикой носителей заряда в сильно-коррелированных магнитных оксидах.

Ключевые слова: пленки манганитов, вариантная структура, колоссальное магнитосопротивление, туннелирование, магниторефрактивный эффект, структурные домены

Для цитирования: Баквалова Т.Н., Юрасов А.Н., Яшин М.М., Бессонова В.А. Особенности температурных зависимостей колоссального и туннельного магнитосопротивления в пленках манганитов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(1):55–63. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-55-63>, <https://www.elibrary.ru/FDCWGD>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Specific features of temperature dependence of colossal and tunneling magnetoresistance in manganite films

Tatiana N. Bakhvalova¹, Alexey N. Yurasov¹, Maxim M. Yashin^{1, @},
Valentina A. Bessonova²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ihkamax@mail.ru

• Submitted: 03.04.2025 • Revised: 15.04.2025 • Accepted: 20.11.2025

Abstract

Objectives. This work aims to theoretically and experimentally investigate the specific features of magnetoresistance temperature dependence in nanostructured films of doped manganites. The temperature dependence of electrical resistance for $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ manganite films, grown by laser ablation on various dielectric substrates, is investigated over a wide temperature range.

Methods. Epitaxial $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ films with a thickness of 80 nm were grown by pulsed laser ablation using an ArF excimer laser (a laser wavelength of 247 nm) on single-crystalline SrTiO_3 and $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ substrates. The magnetoresistance properties were measured using a two-probe DC method. The measurements were conducted in magnetic fields up to 8 kOe applied in the film plane, across a temperature range of 80–350 K. To accomplish the research objectives, an empirical magnetoresistance model was applied in two distinct temperature regions: near the magnetic phase transition temperature and in the ground-state region.

Results. Empirical relations for temperature dependence of magnetoresistance for nanostructured $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ films were established, encompassing both the Curie temperature region and the ground-state regime. Our studies revealed that the magnetoresistance of epitaxial single-crystalline $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ films exhibits a sharp peak exclusively near the Curie temperature while remaining negligible in other temperature ranges. Conversely, $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ films with a variant structure demonstrate significant low-temperature magnetoresistance. This effect arises from magnetic-field-induced modifications of the high-frequency conductivity, which results from spin-polarized electron tunneling across structural domain boundaries. A unified empirical model to describe various mechanisms of magnetoresistance in doped manganites is proposed.

Conclusions. For the first time, an empirical model to describe both the colossal and tunneling magnetoresistance in thin films of doped manganites has been developed. This model demonstrates excellent agreement between experimental and calculated data for $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ films with and without a variant structure. The simulation results agree well with experimental data. The findings elucidate the understanding of magnetoresistance mechanisms, contribute to the development of the magnetorefractive effect theory for thin-film manganites, and inform new approaches for controlling charge carrier dynamics in strongly correlated magnetic oxides.

Keywords: manganites films, variant structure, colossal magnetoresistance, spin-dependent tunneling, magnetorefractive effect, structural domains

For citation: Bakhvalova T.N., Yurasov A.N., Yashin M.M., Bessonova V.A. Specific features of temperature dependence of colossal and tunneling magnetoresistance in manganite films. *Russian Technological Journal*. 2026;14(1):55–63. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-55-63>, <https://www.elibrary.ru/FDCWGD>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В современной физике особое внимание уделяется изучению фундаментальных магнитных и транспортных свойств композитных или наноструктурированных функциональных тонкопленочных наноматериалов, поскольку они лежат в основе многих актуальных технологических приложений от информационных носителей до сенсорных устройств [1]. Одним из перспективных классов материалов, демонстрирующих необычные свойства, являются легированные манганиты лантана [2–5]. Эти материалы обладают рядом уникальных характеристик, таких как высокая спиновая поляризация носителей заряда и намагниченность, высокая чувствительность статической и оптической проводимости к структурным и магнитным фазовым переходам и внешним полям [2–5] (например, переход металл-диэлектрик, эффект колоссального магнитосопротивления (МС), гигантское магнитопротекание света, магниторефрактивный эффект (МРЭ) и т.д. [6–8]), что делает их потенциальными кандидатами для применения в спинтронике и магнитооптических устройствах инфракрасного (ИК) диапазона, работающих при комнатных температурах.

Магниторефрактивный эффект заключается в изменении оптических параметров (индексов рефракции, а вернее коэффициентов отражения и прохождения) в магнитном поле и в сильнолегированных манганитах является высокочастотным аналогом колоссального МС в ИК-диапазоне спектра [2]. В пленках манганитов МРЭ достигает гигантских значений (10–20%), однако его спектральные и температурные зависимости имеют достаточно сложный характер, т.к., помимо вклада делокализованных носителей заряда, значительную роль играют магнитная и зарядовая однородность пленок, их толщина, величина МС, а также размерные эффекты, резонансные явления и дефекты (источник [2] и ссылки в нем).

Физические свойства пленки манганитов определяются не только составом и условиями роста, но и типом подложки. Например, в [9] было показано, что в пленках $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ на подложках $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ при эпитаксиальном росте пленки на монокристаллической подложке с сильно

отличающимися параметрами кристаллической решетки образуется вариантная (эквивалентная) структура. Такая структура формируется структурными доменами (вариантами) с наноразмерными кристаллитами в объеме пленки, разделенными когерентными высокоугловыми границами толщиной ~ 0.4 нм. Отметим, что фиксированная ориентация кристаллитов с ограниченным набором углов является принципиальным отличием пленок с вариантной структурой от поликристаллических образцов с разориентированными кристаллитами разного размера в объеме пленки. Природа и особенности реализации вариантной структуры подробно рассмотрены в [10].

В результате доменная структура пленок приводит к появлению дополнительного механизма в МС, вызванного процессами туннелирования спин-поляризованных носителей заряда на границах доменов, наиболее интенсивных при стремлении температуры к абсолютному нулю. Сравнительный анализ оптических, электрических и магнитооптических свойств пленок $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$, обладающих и не обладающих вариантной структурой, позволил изучить основные особенности физических механизмов, ответственных за температурные и полевые зависимости МС и МРЭ в этих пленках [2, 7–9]. Для описания МРЭ как отклика на колоссальное МС в манганитах было успешно применено приближение эффективной среды [11], ранее предложенное для анализа процессов туннелирования на оптических частотах в различных металлических наноконструкциях и гранулярных сплавах [12]. Однако высокая восприимчивость электрических свойств манганитов к действию внутренних и внешних факторов приводит к трудностям теоретического описания механизмов МС и МРЭ, поскольку развитая теория применима для чисто металлической и туннельной проводимости, а также может учитывать перераспределение высоко- и низкопроводящей фазы, но не учитывает эффекты, связанные, например, с изменением в магнитном поле концентрации носителей заряда, края поглощения, эффективной массы поляронов [2] и т.д. Кроме того, на данный момент отсутствует какая-либо единая модель, описывающая сосуществование двух механизмов МС в пленках легированных манганитов с сильно отличающимися температурными областями существования.

В настоящей работе приведены результаты моделирования температурных зависимостей МС в пленке манганита $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LBM), обладающей вариантной структурой, в сравнении с пленкой, не обладающей вариантной структурой. Показано, что предложенный эмпирический подход позволяет учесть основные особенности и может быть использован в дальнейшем для разработки общей теории МС в сильно-коррелированных магниторезистивных магнетиках.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эпитаксиальные пленки LBM толщиной $d = 80$ нм были выращены методом лазерной абляции с использованием эксимерного импульсного аргон-фторидного лазера (ArF-лазера), длина волны лазера – 247 нм, частота порядка – 9 Гц, на монокристаллических подложках SrTiO_3 (далее – STO) и $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ (далее – YSZ), при температуре подложки 730 К и давлении кислорода 0.4 мбар. Толщина пленок определялась по времени экспозиции. По данным сканирующей электронной микроскопии поверхность пленки LBM/YSZ имеет многозеренную структуру со средним размером кристаллитов 40–70 нм. Такая структура формируется прорастающими по толщине пленки колоннообразными ориентированными кристаллитами, что кардинально отличается от островкового характера роста тонких эпитаксиальных пленок LBM/STO. Более детально методика синтеза и результаты аттестации образцов пленок приведены в работах [9, 13].

Магнитосопротивление пленок

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = [\rho_H - \rho_0] / \rho_0,$$

где ρ_H и ρ_0 – значения удельного сопротивления при наличии и отсутствии магнитного поля, измерялось двухконтактным методом на постоянном токе в полях до 8 кЭ в плоскости образца и температурном интервале 80–50 К. Экспериментальные температурные и полевые зависимости МС пленок приведены на рис. 1. Магнитосопротивление в эпитаксиальных пленках манганитов LBM (без вариантной структуры) демонстрирует полевую и температурную зависимость, аналогичную объемным монокристаллам того же состава. В пленке LBM/STO имеется выраженный максимум в температурной зависимости отрицательного эффекта МС в области температуры Кюри пленки $T_C = 305$ К. Наличие максимума связано с подавлением полем флуктуаций магнитных моментов, максимальных в области магнитного фазового перехода, и является характерным для манганитов с колоссальным МС [2, 14]. Полевая зависимость МС в этой области демонстрирует линейную

зависимость без гистерезиса и насыщения в полях до 8 кЭ (рис. 1в). В то же время для пленки LBM/YSZ в зависимости МС от T имеется только плечо вблизи T_C на фоне непрерывного роста МС при понижении температуры (рис. 1а). Непрерывный рост МС связан с туннелированием спин-поляризованных электронов через границы структурных доменов.

Максимальная полученная величина туннельного МС составила примерно 27% при $T = 13$ К (на рисунке не показано). Оценка степени спин-поляризации электронов P при $T \sim 0$ К по выражению $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 2P^2 / (1 - P^2)$ дает величину $P \approx 0.36$, близкую значению P для пленок $\text{La}_{0.8}\text{Ag}_{0.1}\text{MnO}_{3+\delta}/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ с вариантной структурой [15]. Полевая зависимость низкотемпературного МС заметно отличается (рис. 1б): отрицательное МС резко выходит на насыщение и достигает почти 25% в магнитных полях больше 2 кЭ, появляется характерный для материалов с туннельным МС гистерезис типа «крылья бабочки» со слабыми положительными максимумами в полях ~ 0.5 кЭ. Стрелкой на рисунке отмечена особенность, связанная с колоссальным МС в пленке LBM/YSZ. Штриховые зоны схематично отражают области преимущественного вклада механизмов туннельного (I) и колоссального (II) МС, соответственно. Более детально с результатами анализа температурных и полевых зависимостей МС и МРЭ в пленках LBM можно ознакомиться в работах [9, 13, 16].

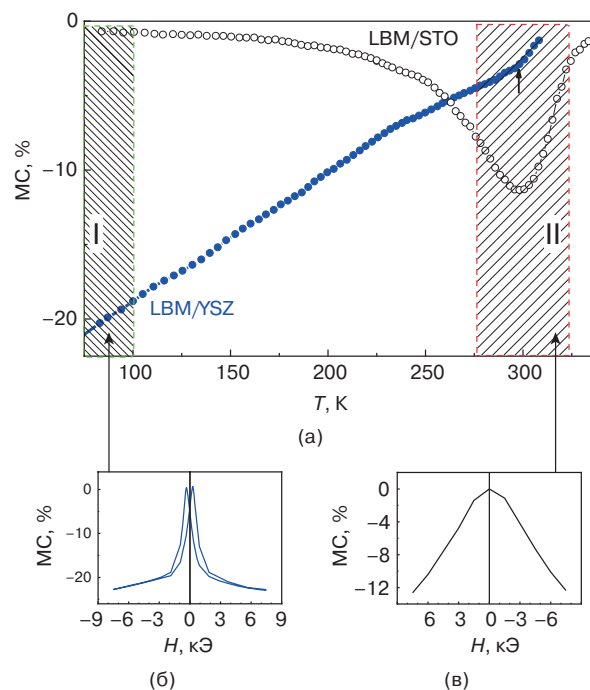


Рис. 1. Экспериментальные характеристики: (а) температурные зависимости МС пленок LBM/STO и LBM/YSZ при $H = 7.5$ кЭ; (б) и (в) – полевые зависимости МС для пленок LBM/YSZ при $T = 80$ К и LBM/STO при $T = T_C$, соответственно

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Таким образом, в наноструктурированной пленке LBM/YSZ (с вариантной структурой) существуют проводящие ферромагнитные структурные домены, которые разделены слабопроводящими границами. При приложении постоянного внешнего магнитного поля в области T_C в МС наблюдается особенность, связанная с колоссальным МС в объеме доменов, а в области низких температур проявляется туннельное МС, связанное с туннелированием носителей заряда на границах доменов. В связи с этим особенности температурного поведения МС в LBM/YSZ рассматривались в двух основных областях: вблизи и сильно ниже температуры ферромагнитного упорядочения (температура Кюри). При низких температурах зависимость МС(T) имеет вид квазилинейной функции (до температуры $T_{кр} \sim 250$ К). При увеличении температуры она принимает вид как для пленки без вариантной структуры (LBM/STO) и описывается полиномиальной функцией 2-го порядка (или, в первом приближении, линейной функцией). Для учета этих двух вкладов в предлагаемой математической модели введены коэффициенты α и β . По своему физическому смыслу коэффициент α учитывает вклад низкотемпературного (туннельного) МС: $\alpha = 1$ при $T < T_{кр}$ и $\alpha = 0$ при $T > T_{кр}$. Выполнению данного условия удовлетворяет выражение вида:

$$\alpha = \frac{1}{1 + e^{\frac{T - T_{кр}}{T_{кр}}}}, \quad (1)$$

где $T_{кр}$ – критическое значение температуры, при которой наблюдается смена механизма МС. Аналогично можно получить формулу для коэффициента β высокотемпературного (колоссального) МС:

$$\beta = \frac{1}{1 + e^{\frac{T_{кр} - T}{T_{кр}}}}. \quad (2)$$

Аналогичный подход использован для описания МС в пленке LBM/STO (без вариантной структуры). Низкотемпературная область МС имеет слаболинейный участок с выходом на ноль вблизи $T = 0$ К, а выше 250 К зависимость МС(T) описывается функцией Гаусса. Подобную картину наблюдали для пленок $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ в [17].

Низкотемпературная область МС пленок аппроксимировалась как квазилинейный участок. Лучшее совпадение экспериментальных и расчетных кривых достигается аппроксимацией функцией

полинома 2-го порядка (рис. 2). Однако использование полинома существенно усложняет расчеты, поэтому было взято линейное приближение. В результате общая формула для описания температурной зависимости МС ($\Delta\rho/\rho$) может быть представлена в виде:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \alpha A_1 T + \beta \left(A_1 T_{кр} + B_1 e^{-\frac{(T - T_C)^2}{2\sigma^2}} \right), \quad (3)$$

где A_1 – коэффициент, описывающий угол наклона кривой температурной зависимости и определяемый условиями роста и составом образца (величина по модулю мала и составляет ≈ 0.01 , что связано со слабым изменением МС в низкотемпературной области); B_1 – величина МС для данной пленки; σ – среднеквадратическое отклонение.

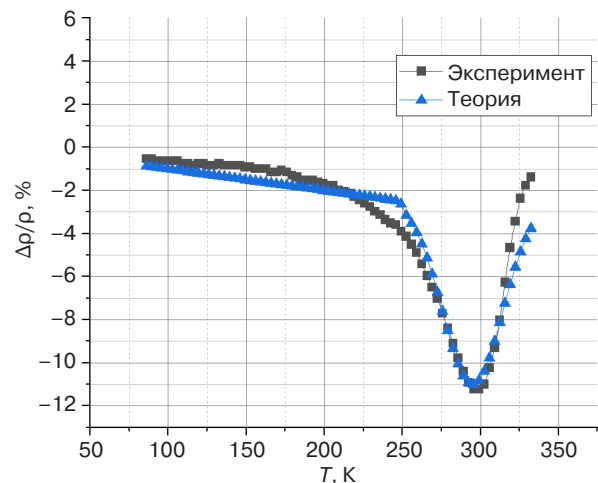


Рис. 2. Температурная зависимость МС ($\Delta\rho/\rho$) для пленки LBM/STO: эксперимент и расчет

В пленках LBM с вариантной структурой различия между низкотемпературной и высокотемпературной областями не столь существенны (рис. 3). Наличие структурных доменов в пленке приводит к заметному изменению хода кривой МС(T) и отсутствию выраженных особенностей вблизи T_C . При этом величина МС растет при понижении температуры в отличие от пленки без вариантной структуры. Подобную зависимость МС также наблюдали для пленок $(\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35})_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_{3\pm\delta}$ с вариантной структурой [18]. В низкотемпературной области зависимость $\Delta\rho/\rho(T)$ – линейная, а выше критической температуры она становится близкой к квадратичной (рис. 3). В первом приближении эту особенность вблизи T_C можно считать незначительной. Тогда зависимость $\Delta\rho/\rho(T)$ будет квазилинейной. В результате аналогично ранее рассмотренному случаю получаем упрощенное выражение для $\Delta\rho/\rho(T)$ для пленки LBM/YSZ:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = (\alpha + \beta)(A_0 + A_2T), \quad (4)$$

где коэффициент A_0 – это МС образца по модулю (при $T = 0$ К), A_2 – коэффициент, описывающий угол наклона кривой (~ 0.086).

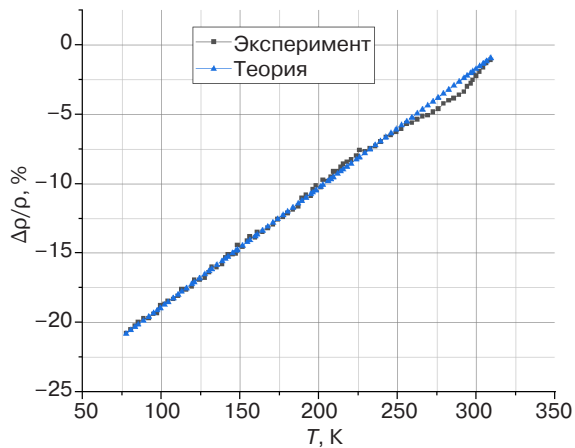


Рис. 3. Температурная зависимость МС ($\Delta\rho/\rho$) для пленки LBM/YSZ: эксперимент и расчет

Таким образом, в легированных манганитах LBM в рамках единой эмпирической модели удалось учесть высокотемпературную и низкотемпературную части МС. Простая линейная модель, учитывающая критическую температуру и характерные величины колоссального и туннельного МС, позволяет хорошо описать экспериментальные данные как для пленок с вариантной структурой, так и без нее. Данная модель может быть применена к объяснению температурных особенностей МС широкого класса манганитов других составов. Следующим шагом планируется построение теории МРЭ в поликристаллических и композитных образцах манганитов с учетом развития оптических расчетов магнитоотражения [19, 20] и результатов данной работы. Важно отметить, что МРЭ является четным по намагниченности магнитооптическим эффектом, в отличие от линейного экваториального эффекта Керра и в ИК-области спектра с учетом интерференционных эффектов [21, 22] может значительно превосходить последний, что делает МРЭ наиболее перспективным интенсивностным эффектом с точки зрения фундаментальных и прикладных задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что в пленке LBM/STO МС имеет выраженный максимум вблизи температуры Кюри и пренебрежимо мало в других областях. В пленке LBM/YSZ имеется сильный низкотемпературный вклад в МС, связанный с изменением высокочастотной проводимости пленки во внешнем магнитном поле из-за процесса туннелирования спин-поляризованных электронов через границы когерентных структурных доменов. Впервые в рамках единой эмпирической модели предложен учет разных механизмов МС в одном образце. Продемонстрировано, что такой учет дает хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных данных для легированных манганитов. Предложенный эмпирический подход может быть использован для моделирования процессов спинового транспорта, в т.ч. на оптических частотах в виде МРЭ, в сильно-коррелированных магниторезистивных магнетиках.

В заключение можно также отметить, что широкое температурное окно существования МС в пленке с вариантной структурой является важным с точки зрения возможных практических приложений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке программы «Акселератор РТУ МИРЭА».

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the “RTU MIREA Accelerator” program.

Вклад авторов

Т.Н. Бахвалова – обработка литературных источников, компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание статьи.

А.Н. Юрасов – разработка модели, обсуждение результатов, написание статьи, редактирование статьи.

М.М. Яшин – компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание статьи.

В.А. Бессонова – проведение эксперимента.

Authors' contributions

T.N. Bakhvalova – literature review, computer modeling, discussion of results, writing the text of the article.

A.N. Yurasov – model development, discussion of results, writing the text of the article, editing the article.

M.M. Yashin – computer modeling, discussion of results, writing the text of the article.

V.A. Bessonova – conducting the experiments.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ramirez A.P. Colossal magnetoresistance. *J. Phys.: Condens. Matter*. 1997;9(39):8171–8199. <http://doi.org/10.1088/0953-8984/9/39/005>
- Granovsky A., Sukhorukov Yu., Gan'shina E., Telegin A. Magnetorefractive effect in magnetoresistive materials. In: *Magnetophotonics: From Theory to Applications*. Berlin Heidelberg: Springer; 2013. P. 107–133. http://doi.org/10.1007/978-3-642-35509-7_5
- Gan'shina E., Loshkareva N., Sukhorukov Yu., et al. Optical and magneto-optical spectroscopy of manganites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2006;300(1):62–66. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.10.033>
- Горбенко О.Ю., Демин Р.В., Кауль А.Р., Королева Л.И. Магнитные, электрические и кристаллографические свойства тонких пленок $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. *Физика твердого тела (ФТТ)*. 1998;40(2):290–294.
- Bebenin N.G. Lanthanum manganites near the Curie temperature. *Phys. Metals Metallography*. 2004;98(1):78–85.
- Bebenin N.G., Loshkareva N.N., Makhnev A.A., et al. Optical and magneto-optical properties of ferromagnetic $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ single crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2010;22(9):096003. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/9/096003>
- Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., et al. Magnetorefractive effect in the $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ thin films grown by MOCVD. *J. Magn. Magn. Mater.* 2014;367:53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.055>
- Telegin A., Sukhorukov Yu., Bessonov V. Optical response on the colossal magnetoresistance effect in manganites. *J. Supercond. Nov. Magn.* 2013;26(5):1437–1440. <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1867-8>
- Telegin A.V., Barsaume S., Bessonova V.A., et al. Magneto-optical response to tunnel magnetoresistance in manganite films with a variant structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:317–321. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.006>
- Кауль А.Р., Горбенко О.Ю., Каменев А.А. Роль гетерозэпитаксии в разработке новых тонкопленочных функциональных материалов на основе оксидов. *Успехи химии*. 2004;73(9):932–939.
- Юрасов А.Н., Телегин А.В., Сухоруков Ю.П. Модель магниторефрактивного эффекта в манганитах в рамках теории эффективной среды. *Физика твердого тела (ФТТ)*. 2016;58(4):656–660.
- Быков И.В., Ганьшина Е.А., Грановский А.Б., Гущин В.С., Козлов А.А., Масумото Т., Онума С. Магниторефрактивный эффект в гранулированных сплавах с туннельным магнитосопротивлением. *Физика твердого тела (ФТТ)*. 2005;47(2):268–273.
- Телегин А.В., Сухоруков Ю.П., Носов А.П., Бессонова В.А., Ганьшина Е.А. Магнитоотражение и магнитооптический эффект Керра в пленках $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ при комнатной температуре. *Физика твердого тела (ФТТ)*. 2017;59(2):284–289. <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.02.44049.303>
- Нагаев Э.Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением. *Успехи физ. наук (УФН)*. 1996;166(8):833–858. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199608b.0833>
- Сухоруков Ю.П., Телегин А.В., Ганьшина Е.А., Локарева Н.Н., Кауль А.Р., Горбенко О.Ю., Мостовщикова Е.Н., Мельников О.В., Виноградов А.Н. Туннелирование спин-поляризованных носителей заряда в пленках $\text{La}_{0.8}\text{Ag}_{0.1}\text{MnO}_{3+d}$ с вариантной структурой: магнетотранспортные и магнитооптические данные. *Письма в ЖТФ*. 2005;31(11):78–87.
- Бессонова В.А., Телегин А.В., Носов А.П., Сухоруков Ю.П. Особенности поглощения тонких пленок $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-d}$, полученных методом импульсного лазерного осаждения. *Оптика и спектроскопия*. 2022;130(9):1365–1371. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.09.53296.3223-22>
- Грановский А.Б., Сухоруков Ю.П., Телегин А.В., Бессонов В.Д., Ганьшина Е.А., Кауль А.Р., Корсаков И.Е., Горбенко О.Ю., Гонзалес Х. Гигантский магниторефрактивный эффект в пленках $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2011;139(1):90–100.
- Акимов Г.Я., Прилипко С.Ю., Ревенко Ю.Ф., Тимченко В.М. Особенности физических свойств нанокристаллических образцов $(\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35})_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_{3+\Delta}$, полученных с использованием холодного изостатического прессования. *Физика твердого тела (ФТТ)*. 2009;51(4):727–728.
- Юрасов А.Н., Сайфулина Д.А., Бахвалова Т.Н. Магниторефрактивный эффект в металлических наноструктурах Co/Pt. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):57–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-57-66>
- Гладышев И.В. Отражение света от многослойных структур, включающих как когерентные, так и некогерентные слои. В сб.: *Оптические технологии, материалы и системы (Optotech 2024): Сборник докладов конференции*. Москва: 2024. С. 520–525. <https://www.elibrary.ru/otpmij>
- Гладышев И.В., Юрасов А.Н., Яшин М.М. Вклад интерференции в магнитооптический экваториальный эффект Керра в белом свете. *Russian Technological Journal*. 2024;12(6):59–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-59-68>
- Ганьшина Е.А., Гаршин В.В., Перова Н.Н., Припеченков И.М., Юрасов А.Н., Яшин М.М., Рыльков В.В., Грановский А.Б. Магнитооптическая керр-спектроскопия нанокомпозитов. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2023;164(4):662–672. <https://doi.org/10.31857/S0044451023100188>

REFERENCES

- Ramirez A.P. Colossal magnetoresistance. *J. Phys.: Condens. Matter*. 1997;9(39):8171–8199. <http://doi.org/10.1088/0953-8984/9/39/005>
- Granovsky A., Sukhorukov Yu., Gan'shina E., Telegin A. Magnetorefractive effect in magnetoresistive materials. In: *Magnetophotonics: From Theory to Applications*. Berlin Heidelberg: Springer; 2013. P. 107–133. http://doi.org/10.1007/978-3-642-35509-7_5
- Gan'shina E., Loshkareva N., Sukhorukov Yu., et al. Optical and magneto-optical spectroscopy of manganites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2006;300(1):62–66. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.10.033>

4. Gorbenko O.Yu., Demin R.V., Kaul A.R., et al. Magnetic, electrical and crystallographic properties of thin $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ films. *Phys. Solid State*. 1998;40(2):263–267. <https://doi.org/10.1134/1.1130289>
[Original Russian Text: Gorbenko O.Yu., Demin R.V., Kaul A.R., Koroleva L.I. Magnetic, electrical and crystallographic properties of thin $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ films. *Fizika tverdogo tela (FTT)*. 1998;40(2):290–294 (in Russ..)]
5. Bebenin N.G. Lanthanum manganites near the Curie temperature. *Phys. Metals Metallography*. 2004;98(1):78–85.
6. Bebenin N.G., Loshkareva N.N., Makhnev A.A., et al. Optical and magneto-optical properties of ferromagnetic $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ single crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2010;22(9):096003. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/9/096003>
7. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., et al. Magnetorefractive effect in the $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ thin films grown by MOCVD. *J. Magn. Magn. Mater.* 2014;367:53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.055>
8. Telegin A., Sukhorukov Yu., Bessonov V. Optical response on the colossal magnetoresistance effect in manganites. *J. Supercond. Nov. Magn.* 2013;26(5):1437–1440. <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1867-8>
9. Telegin A.V., Barsaume S., Bessonova V.A., et al. Magneto-optical response to tunnel magnetoresistance in manganite films with a variant structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:317–321. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.006>
10. Kaul A.R., Gorbenko O.Yu., Kamenev A.A. The role of heteroepitaxy in the development of new thin-film oxide-based functional materials. *Russ. Chem. Rev.* 2004;73(9):861–880. <https://doi.org/10.1070/RC2004v073n09ABEH000919>
[Original Russian Text: Kaul A.R., Gorbenko O.Yu., Kamenev A.A. The role of heteroepitaxy in the development of new thin-film oxide-based functional materials. *Uspekhi khimii*. 2004;73(9):932–939 (in Russ..)]
11. Yurasov A.N., Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P. Model of magnetorefractive effect in manganites within the effective medium theory. *Phys. Solid State*. 2016;58(4):674–677. <https://doi.org/10.1134/S1063783416040326>
[Original Russian Text: Yurasov A.N., Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P. Model of magnetorefractive effect in manganites within the effective medium theory. *Fizika tverdogo tela (FTT)*. 2016;58(4):656–660 (in Russ..)]
12. Bykov I.V., Gan'shina E.A., Granovskii A.B., et al. Magnetorefractive effect in granular alloys with tunnel magnetoresistance. *Phys. Solid State*. 2005;47(2):281–286. <https://doi.org/10.1134/1.1866407>
[Original Russian Text: Bykov I.V., Gan'shina E.A., Granovskii A.B., Gushchin V.S., Kozlov A.A., Masumoto T., Onuma S. Magnetorefractive effect in granular alloys with tunnel magnetoresistance. *Fizika tverdogo tela (FTT)*. 2005;47(2):268–273 (in Russ..)]
13. Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Nosov A.P., et al. Magnetorefractive and magneto-optical Kerr effect in $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ films at room temperature. *Phys. Solid State*. 2017;59(2):292–297. <https://doi.org/10.1134/S1063783417020305>
[Original Russian Text: Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Nosov A.P., Bessonova V.A., Gan'shina E.A. Magnetorefractive and magneto-optical Kerr effect in $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ films at room temperature. *Fizika tverdogo tela (FTT)*. 2017;59(2):284–289 (in Russ..)] <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.02.44049.303>
14. Nagaev E.L. Lanthanum manganites and other giant magnetoresistance magnetic conductors. *Phys. Usp.* 1996;39(8):781–805. <https://doi.org/10.1070/PU1996v039n08ABEH000161>
[Original Russian Text: Nagaev E.L. Lanthanum manganites and other giant magnetoresistance magnetic conductors. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1996;166(8):833–858 (in Russ..)] <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199608b.0833>
15. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Gan'shina E.A., et al. Tunneling of spin-polarized charge carriers in $\text{La}_{0.8}\text{Ag}_{0.1}\text{MnO}_{3+\delta}$ film with variant structure: Magnetotransport and magneto-optical data. *Tech. Phys. Lett.* 2005;31(6):484–487. <https://doi.org/10.1134/1.1969772>
[Original Russian Text: Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Gan'shina E.A., Lokareva N.N., Kaul' A.R., Gorbenko O.Yu., Mostovshchikova E.N., Mel'nikov O.V., Vinogradov A.N. Tunneling of spin-polarized charge carriers in $\text{La}_{0.8}\text{Ag}_{0.1}\text{MnO}_{3+\delta}$ film with variant structure: Magnetotransport and magneto-optical data. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2005;31(11):78–87 (in Russ..)]
16. Bessonova V.A., Telegin A.V., Nosov A.P., et al. Features of absorption of thin films $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-d}$ obtained using the method of pulsed laser deposition. *Opt. Spectroscopy*. 2022;130(9):1097–1103. <http://doi.org/10.21883/EOS.2022.09.54826.3223-22>
[Original Russian Text: Bessonova V.A., Telegin A.V., Nosov A.P., Sukhorukov Yu.P. Features of absorption of thin films $\text{La}_{0.69}\text{Ba}_{0.31}\text{MnO}_{3-d}$ obtained using the method of pulsed laser deposition. *Optika i spektroskopiya*. 2022;130(9):1365–1371 (in Russ..)] <https://doi.org/10.21883/OS.2022.09.53296.3223-22>
17. Granovskii A.B., Sukhorukov Y.P., Telegin A.V., et al. Giant magnetorefractive effect in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ films. *J. Exp. Theor. Phys.* 2011;112(1):77–86. <https://doi.org/10.1134/S106377611005105X>
[Original Russian Text: Granovskii A.B., Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., Gan'shina E.A., Kaul' A.R., Korsakov I.E., Gorbenko O.Yu., Gonzales Kh. Giant magnetorefractive effect in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ films. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 2011;139(1):90–100 (in Russ..)]
18. Akimov G.Ya., Prilipko S.Yu., Revenko Yu.F., Timchenko V.M. Specific physical properties of nanocrystalline $(\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35})_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_{3+\Delta}$ samples obtained by cold isostatic pressing. *Phys. Solid State*. 2009;51(4):770–772. <https://doi.org/10.1134/S1063783409040210>
[Original Russian Text: Akimov G.Ya., Prilipko S.Yu., Revenko Yu.F., Timchenko V.M. Features of physical properties of nanocrystalline samples of $(\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35})_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_{3+\Delta}$ obtained using cold isostatic pressing. *Fizika tverdogo tela (FTT)*. 2009;51(4):727–728 (in Russ..)]
19. Yurasov A.N., Sayfulina D.A., Bakhvalova T.N. Magnetorefractive effect in metallic Co/Pt nanostructures. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):57–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-57-66>
20. Gladyshev I.V. Reflection of light from multilayer structures, including both coherent and incoherent layers. In: *Optical Technologies, Materials and Systems (Optotech 2024): Conference Proceedings*. Moscow: 2024. P. 520–525 (in Russ..)

21. Gladyshev I.V., Yurasov A.N., Yashin M.M. Contribution of interference to the magneto-optical transverse Kerr effect in white light. *Russian Technological Journal*. 2024;12(6):59–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-59-68>
22. Gan'shina E.A., Garshin V.V., Perova N.N., et al. Magneto-optical Kerr Spectroscopy of Nanocomposites. *J. Exp. Theor. Phys.* 2023;137(4):572–581. <https://doi.org/10.1134/S1063776123100151>
[Original Russian Text: Gan'shina E.A., Garshin V.V., Perova N.N., Pripechenkov I.M., Yurasov A.N., Yashin M.M., Ryl'kov V.V., Granovskii A.B. Magneto-optical Kerr Spectroscopy of Nanocomposites. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 2023;164(4):662–672 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044451023100188>]

Об авторах

Бахвалова Татьяна Николаевна, преподаватель, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bahvalova@mirea.ru. ResearcherID ITW-2747-2023, Scopus Author ID 35145196400, <https://orcid.org/0000-0001-7595-785X>

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID M-3113-2016, Scopus Authors ID 6602974416, SPIN-код РИНЦ 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

Яшин Максим Михайлович, к.ф.-м.н., доцент, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, SPIN-код РИНЦ 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Бессонова Валентина Анатольевна, младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук» (ИФМ УрО РАН) (620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18). E-mail: valentina.a.bessonova@mail.ru. Scopus Author ID 55510248600, ResearcherID K-5887-2013, SPIN-код РИНЦ 7874-2518, <https://orcid.org/0000-0002-2163-4913>

About the Authors

Tatiana N. Bakhvalova, Lecturer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bahvalova@mirea.ru. ResearcherID ITW-2747-2023, Scopus Author ID 35145196400, <https://orcid.org/0000-0001-7595-785X>

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID M-3113-2016, Scopus Authors ID 6602974416, RSCI SPIN-code 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

Maxim M. Yashin, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, RSCI SPIN-code 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Valentina A. Bessonova, Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (IMP UB RAS) (18, S. Kovalevskaya ul., Yekaterinburg, 620108 Russia). E-mail: valentina.a.bessonova@mail.ru. Scopus Author ID 55510248600, ResearcherID K-5887-2013, RSCI SPIN-code 7874-2518, <https://orcid.org/0000-0002-2163-4913>