



ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 37–43
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 37–43
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-37-43>, EDN: IIQEFU

Научная статья
УДК 537.311.3:537.622

Структура, магнитные и электрические свойства La-Sr манганита, легированного церием и цинком

И. М. Державин¹, А. Г. Баделин^{1✉}, В. К. Карпасюк¹, С. Х. Эстемирова^{1,2}

¹Астраханский государственный университет (АГУ) им. В. Н. Татищева, Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20 а

²Институт металлургии Уральского отделения РАН (ИМЕТ УрО РАН), Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 101

Державин Игорь Михайлович, младший научный сотрудник научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, derzh_igor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8037-1909>, AuthorID: 899296

Баделин Алексей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, alexey_badelin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1276-840X>, AuthorID: 513426

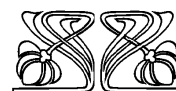
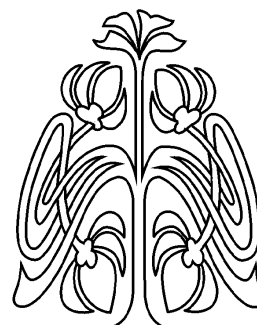
Карпасюк Владимир Корнильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, vkarпасyuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5154-2171>, AuthorID: 338812

Эстемирова Светлана Хусаиновна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, старший научный сотрудник лаборатории статики и кинетики процессов, esveta100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-1420>, AuthorID: 114541

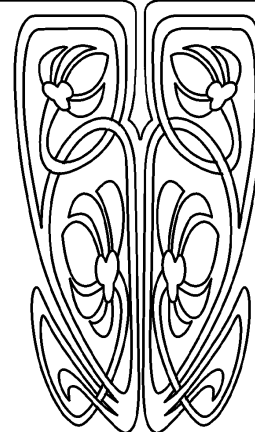
Аннотация. Легированные манганиты La-Sr системы, проявляющие эффекты колоссального магнитосопротивления, гигантской магнитострикции, электрического переключения, являются перспективными функциональными материалами для различных технических приложений, в том числе для сенсорных и информационных устройств. Однако влияние характеристик легирующих ионов, особенно вводимых в разные подрешетки, на свойства манганитов и их частотные зависимости изучено недостаточно. В настоящей работе впервые синтезирован однофазный керамический манганит $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$, содержащий ионы $\text{Ce}^{4+}(5p^6)$ и $\text{Zn}^{2+}(3d^{10})$, являющиеся донорами и акцепторами. Определены параметры ромбоэдрической кристаллической структуры. Намагниченность синтезированного манганита выше, а температура Кюри ниже, чем у манганита базового состава $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$. Большая ширина температурного интервала перехода «ферромагнетик–парамагнетик» свидетельствует о высокой неоднородности полученного манганита. При температурах выше 285 К манганит проявляет свойства полупроводника. Модуль отрицательного магнитосопротивления достигает максимума 18% при температуре 231 К. С повышением частоты в диапазоне 100 кГц – 4 МГц сопротивление манганита уменьшается. Полученные результаты объясняются диамагнитным разбавлением октаэдрической подрешетки, образованием ионов Mn^{2+} , формированием кластеров разновалентных ионов, конкуренцией и сменой различных механизмов переноса зарядов.

Ключевые слова: кристаллическая структура, кластеры, намагниченность, точка Кюри, магнитосопротивление, температурные и частотные зависимости сопротивления, механизмы переноса зарядов

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета (Приоритет-2030) (проект № 1373360549).



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Для цитирования: Державин И. М., Баделин А. Г., Карпасюк В. К., Эстемирова С. Х. Структура, магнитные и электрические свойства La-Sr манганита, легированного церием и цинком // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 37–43. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-37-43>, EDN: IIQEFU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Structure, magnetic and electrical properties of La-Sr manganite doped with cerium and zinc

I. M. Derzhavin¹, A. G. Badelin^{1✉}, V. K. Karpasyuk¹, S. Kh. Estemirova^{1,2}

¹Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan 414056, Russia

²Institute for Metallurgy, Ural Branch of the RAS, 101 Amundsen St., Ekaterinburg 620016, Russia

Igor M. Derzhavin, derzh_igor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8037-1909>, AuthorID: 899296

Alexey G. Badelin, alexey_badelin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1276-840X>, AuthorID: 513426

Vladimir K. Karpasyuk, vkarpasyuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5154-2171>, AuthorID: 338812

Svetlana Kh. Estemirova, esveta100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-1420>, AuthorID: 114541

Abstract. Background and Objectives: Doped manganites of La-Sr system exhibiting effects of colossal magnetoresistance, giant magnetostriction, and electrical switching are promising functional materials for various technical applications, in particular for sensor and information devices. However, the influence of characteristics of doping ions, especially those introduced into various sublattices, on the properties of manganites and their frequency dependences has not been sufficiently studied. The aim of this work is to establish the influence of Ce⁴⁺ (5p⁶) and Zn²⁺ (3d¹⁰) ions, which are donors and acceptors, on crystal lattice parameters of manganites, their magnetization, Curie point, magnetoresistance, and dependences of the resistance on the frequency and amplitude of electric field. **Materials and Methods:** For the first time, single-phase ceramic La_{0.625}Sr_{0.35}Ce_{0.025}Mn_{0.975}Zn_{0.025}O₃ manganite was synthesized. Parameters of crystal structure were determined from powder X-ray diffractograms. Specific magnetization measurements were performed in magnetic field with an induction of 0.56 T. Curie point was determined by the maximum modulus of the derivative of magnetic permeability with respect to temperature. Measurements of the resistance were performed in the frequency range from 100 kHz to 4 MHz at two values of measuring voltage. Dependences of magnetoresistance on the temperature were measured in transverse field with an induction of 0.92 T. **Results:** The synthesized manganite has a rhombohedral crystal structure. Specific magnetization (91.2 A · m²/kg at 80 K) is higher, and Curie temperature (222 K) is lower than that of the manganite of basic composition La_{0.65}Sr_{0.35}MnO₃. A significant width of the temperature range of ferromagnetic–paramagnetic transition (about 45 K) indicates a high inhomogeneity of obtained manganite. At the temperatures exceeding 285 K, manganite exhibits semiconductor properties. The modulus of negative magnetoresistance varies with temperature nonmonotonically and reaches a maximum (18%) at the temperature of 231 K. With an increase in frequency in the range from 100 kHz to 4 MHz, the resistance of manganite decreases with a slowdown of the fall process in the region of 1.5–2 MHz. **Conclusion:** The results obtained are explained by diamagnetic dilution of octahedral sublattice with zinc ions, formation of Mn²⁺ ions, increase in spin fluctuations near Curie point, relationship of electronic band structure with magnetic subsystem of manganite, phase stratification and formation of the clusters of different-valence ions, competition and change of charge transfer mechanisms (hopping, tunneling, percolation) depending on temperature and frequency. Established dependencies are important for understanding the mechanisms of the effect of simultaneous introduction of quadrivalent and divalent ions into various sublattices of manganites on their properties, and are also of interest for obtaining manganites with required parameters.

Keywords: crystal structure, clusters, magnetization, Curie point, magnetoresistance, temperature and frequency dependences of resistance, charge transfer mechanisms

Acknowledgements: This research was supported by the Astrakhan State University Development Program (Priority-2030) (project No. 1373360549).

For citation: Derzhavin I. M., Badelin A. G., Karpasyuk V. K., Estemirova S. Kh. Structure, magnetic and electrical properties of La-Sr manganite doped with cerium and zinc. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 37–43 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-37-43>, EDN: IIQEFU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Манганиты системы La_{1-x}Sr_xMnO₃, имеющие высокие значения намагниченности насыщения и температуры Кюри при содержании стронция $x \approx 0.35$ [1, 2], часто используются как базовые составы для получения перспективных функциональных материалов с требуемыми параметрами путем легирования соответствующими катионами [3–5]. Составы с $0.175 < x < 0.5$ обладают проводимостью *p*-типа, обусловленной

сосуществованием ионов Mn⁴⁺, Mn³⁺, и проявляют металлические свойства при достаточно низких температурах, а с повышением температуры испытывают фазовый переход «металл-полупроводник» [1, 2].

Исследованию La-Sr систем, содержащих катионы Ce⁴⁺, обеспечивающие электронное легирование, посвящены работы [6–8]. Однако имеющиеся сведения о Ce-замещенных манганитах, относятся к неоднофазным объемным



образцам или к тонким пленкам. В [4, 5, 9] представлены данные о влиянии замещения марганца комбинациями двух- и четырехвалентных ионов на свойства манганитов. Особенно интересным представляется легирование манганитов катионами, вводимыми одновременно в разные подрешетки [5, 8, 10], но данные о свойствах таких манганитов немногочисленны.

В настоящей работе изучены структурные и электромагнитные характеристики лантан-стронциевого манганита с одновременным введением четырехвалентного и двухвалентного ионов, являющиеся, соответственно, донорами и акцепторами: $\text{Ce}^{4+}(5p^6)$ – в редкоземельную подрешетку, ионов $\text{Zn}^{2+}(3d^{10})$ – в подрешетку марганца. При этом уделено внимание зависимости электросопротивления от частоты и амплитуды измерительного электрического поля. Следует отметить, что частотные зависимости электрических параметров таких манганитов (и даже базовых лантан-стронциевых составов) практически не исследованы, а механизмы влияния состава на такие зависимости точно не установлены [11–13]. Приведенные в недавней работе [12] данные об электрических свойствах отдельных составов в диапазоне от 10^2 до 10^6 Гц являются результатом вклада различных транспортных механизмов, проявляющихся в определенных интервалах частот и температур. Представляет интерес сопоставить эти данные с характеристиками легированного манганита La-Sr системы в более широком частотном диапазоне.

1. Объекты и методы исследования

Синтезирован и исследован манганит $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$. Синтез осуществлялся по традиционной керамической технологии. Исходные компоненты (высушенные порошки La_2O_3 , SrCO_3 , CeO_2 , MnO_2 , ZnO), взятые в соответствующих стехиометрических пропорциях, подвергались совместному помолу (с добавлением этилового спирта) в шаровой мельнице в течение четырех часов. После высушивания и брикетирования полученной смеси производился предварительный обжиг при 1273 К (время выдержки – 4 ч). Далее следовали операции второго помола, сушки, введения пластификатора (поливинилового спирта), гранулирования, формования образцов, выжигания связки. Заключительная операция спекания осуществлялась на воздухе при температуре 1523 К

в течение 10 ч с последующим охлаждением вместе с печью.

Полученные в едином технологическом процессе образцы манганита имели форму таблеток диаметром 4 мм и толщиной 2 мм. Для измерений электрических характеристик на противоположные плоскости одной из таблеток были нанесены контакты, изготовленные из самозатвердевающей металлоорганической смеси, содержащей 99% серебра.

Фазовый состав и параметры элементарной ячейки манганитов определялись по порошковым дифрактограммам, снятым в $\text{CuK}\alpha$ -излучении при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в угловом диапазоне $2\Theta = 20\text{--}70^\circ$ с шагом $\Delta(2\Theta) = 0.02^\circ$. Время набора импульсов составляло 2 с в каждой точке.

Расчет структурных данных выполнен методом Ритвелда [14] с помощью программы GSAS [15]. Погрешность определения параметров решетки не превышала $5 \cdot 10^{-5}$ нм.

Измерения удельной намагниченности (σ) выполнялись баллистическим методом путем регистрации изменения магнитного потока, проходящего через измерительную катушку, которая располагалась в межполюсном пространстве постоянного магнита, при извлечении из нее капсулы с порошкообразным образцом известной массы. Индукция постоянного магнитного поля в межполюсном пространстве составляла 0.56 Тл. Измерения проводились при температуре 80 К, погрешность не превышала $\pm 2\%$ при надежности 0.92.

Магнитная проницаемость при различных температурах ($\mu(T)$) измерялась индукционным методом на частоте 99.9 кГц. Манганит помещался в керамическую капсулу, которая вставлялась внутрь одной из секций двухсекционной измерительной катушки. Вторая секция, включенная в противофазе, обеспечивала компенсацию ЭДС индукции, наводимой возбуждающей катушкой в секциях, при отсутствии манганита.

Вся конструкция охлаждалась до температуры кипения жидкого азота, затем температура медленно повышалась, при этом производилась регистрация напряжения на измерительной катушке. Точка Кюри T_C определялась по максимуму $|d\mu/dT|$ [16].

При измерениях сопротивления и магнитосопротивления манганит вместе с термпарой помещался в измерительную ячейку, которая



располагалась между полюсами электромагнита. Измерялась величина падения напряжения при пропускании стабилизированного постоянного тока. Погрешность измерений не превышала $\pm 2\%$. Измерения магнитосопротивления осуществлялись в магнитном поле с индукцией $B = 0.92$ Тл, направленном перпендикулярно измерительному току. Величина магнитосопротивления вычислялась как

$$MR = (R(B) - R(0))/R(B),$$

где $R(B)$ – электросопротивление в поле B , $R(0)$ – электросопротивление при $B = 0$.

Частотные зависимости сопротивления снимались в диапазоне от 100 Гц до 4 МГц. По данным об индуктивности и емкости измерительной цепи, реактивную составляющую сопротивления можно считать пренебрежимо малой.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены и сопоставлены экспериментальная и расчетная дифрактограммы синтезированного манганита. Расчетная дифракто-

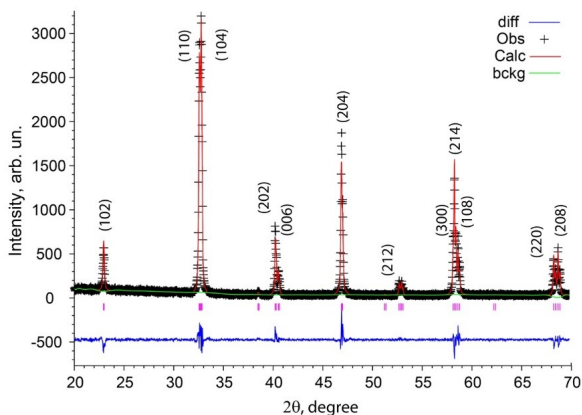


Рис. 1. Экспериментальные (+) и расчетные (Calc) дифракционные профили, разностная кривая (diff) манганита $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$; (bckg) – уровень фона; вертикальными штриховыми линиями показаны позиции брэгговских рефлексов ромбоэдрической фазы (цвет онлайн)

Fig. 1. Experimental (+) and calculated (Calc) diffraction profiles, difference curve (diff) of manganite $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$; (bckg) is the background level; the vertical dashed lines show the positions of Bragg reflexes of the rhombohedral phase (color online)

грамма хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. Дифрактограммы содержат рефлексы только ромбоэдрической фазы (пространственная группа $R\bar{3}c$), т. е. полученный манганит является однофазным.

В таблице приведены параметры решетки a , c и объем элементарной ячейки V , а также значения удельной намагниченности σ (при 80 К) и температуры Кюри T_C .

Полученное значение объема элементарной ячейки меньше, чем у манганита базового состава $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ ($V = 350.35 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^3$) вследствие значительно меньшего радиуса иона Ce^{4+} (0.114 нм) по сравнению с радиусом иона La^{3+} (0.136 нм) [17] (радиусы Mn^{3+} и Zn^{2+} отличаются гораздо меньше – на 0.0095 нм). Удельная намагниченность на $5.5 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ выше, а температура Кюри на 112 К ниже. Снижение T_C связано, очевидно, с диамагнитным разбавлением октаэдрической подрешетки ионами цинка со сравнительно большим радиусом и экранированием ими ионов Mn^{4+} . Увеличение намагниченности может быть обусловлено вероятным образованием ионов Mn^{2+} с высоким магнитным моментом (5 μ_B), вступающих в двойное обменное взаимодействие Mn^{2+} -O- Mn^{3+} [8, 18].

На рис. 2 приведен график зависимости $\mu(T)$, свидетельствующий о значительной магнитной неоднородности манганита, возникновение которой стимулируется комбинированным введением двух- и четырехвалентных ионов [4] и приводит к размытию перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние вследствие разброса значений температуры Кюри неоднородностей [11]. Указанные на рисунке значения температуры T_1 и T_2 , соответствующие значениям проницаемости $\mu(T_1) = 0.9 \cdot (\mu_{\text{макс}} - 1) + 1$ и $\mu(T_2) = 0.1 \cdot (\mu_{\text{макс}} - 1) + 1$ ($\mu_{\text{макс}}$ – максимальная величина μ), условно определяют температурный интервал перехода «ферромагнетик-парамагнетик».

В данном случае ширина интервала $\Delta T = T_2 - T_1$ велика – достигает 45 К, поэтому приведенное в таблице значение температуры Кюри следует рассматривать как среднюю величину.

Кристаллографические и магнитные характеристики манганита $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$

Table. Crystallographic and magnetic characteristics of $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$ manganite

Параметры решетки / Lattice parameters		$10^3 \times V, \text{ nm}^3 / 10^3 \times V, \text{ nm}^3$	$\sigma, \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg} / \sigma, \text{ emu/g}$	$T_C, \text{ K}$
$a, \text{ nm}$	$c, \text{ nm}$			
0.549	1.334	348.75	91.2	222

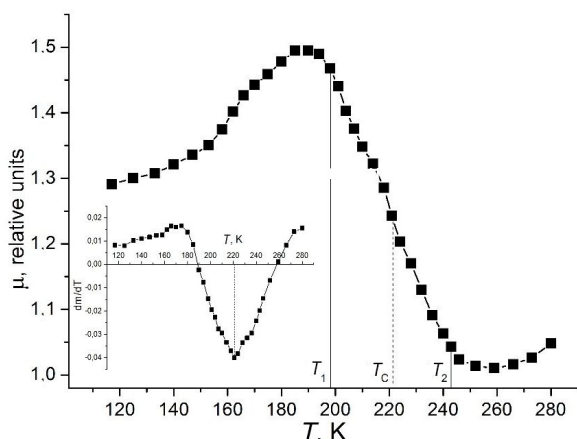


Рис. 2. Температурные зависимости магнитной проницаемости и производной $\mu(T)$ по температуре (произвольные единицы). (T_1 , T_2) – температурный интервал перехода «ферромагнетик-парамагнетик»

Fig. 2. Temperature dependences of magnetic permeability and derivative of $\mu(T)$ with respect to temperature (arbitrary units). (T_1 , T_2) is the temperature range of ferromagnetic-paramagnetic transition

Существование неоднородностей, изоструктурных матрице, но отличающихся параметрами решетки, приводит к уширению рентгеновских дифракционных рефлексов. В данном случае уширение составляет 3–7.5%. Такие неоднородности представляют собой кластеры, формирующиеся вследствие различия зарядов и радиусов ионов, минимизации энергии кулоновского взаимодействия между ними и энергии упругих напряжений [4].

На рис. 3 показаны температурные зависимости сопротивления, измеренные на постоянном токе в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле. Максимумы сопротивления достигаются при температурах выше точки Кюри, что в манганитах La-Sr системы связано с нарастанием спиновых флуктуаций при приближении температуры из парамагнитной области к T_C и уменьшением при этом сопротивления [11]. Поскольку вблизи точки Кюри в манганите содержится смесь ферромагнитной металлической и парамагнитной полупроводниковой фаз, соотношение объемов и проводимость которых зависят от температуры [1, 2, 11], можно предполагать, что формирование полупроводникового характера зависимости объемного сопротивления от температуры начинается в области 210–230 К, где наблюдается некоторое уменьшение производной dR/dT . При температуре выше 285 К манганит заведомо обладает проводимостью полупроводникового типа.

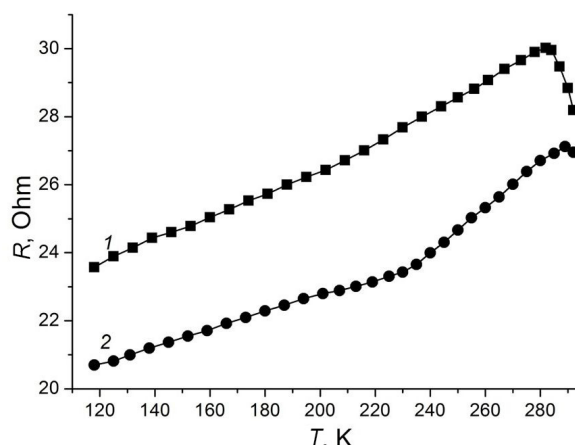


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления манганита в отсутствие магнитного поля (1) и в магнитном поле (2) с индукцией 0.92 Тл

Fig. 3. Temperature dependences of the resistance of manganite in the absence of magnetic field (1) and in the magnetic field (2) with an induction of 0.92 T

Вблизи T_C на зависимости $R(T)$, измеренной в магнитном поле, наблюдается «излом», соответствующий максимуму модуля магнитосопротивления (рис. 4). Обычно $|MR|$ возрастает при понижении температуры, что связывается с тунелированием спин-поляризованных носителей через границы зерен или неоднородностей [1], однако в исследованном манганите наблюдается спад $|MR|$. Этот эффект можно связать с перестройкой электронной зонной структуры при изменении состояния магнитной подсистемы манганита [11].

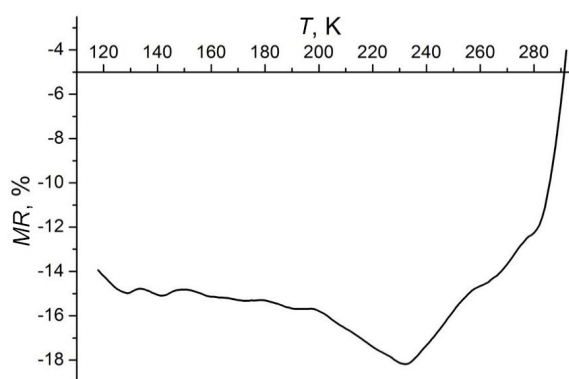


Рис. 4. Зависимость магнитосопротивления манганита от температуры

Fig. 4. Dependence of the magnetoresistance of manganite on the temperature

Графики зависимости сопротивления манганита от частоты в диапазоне от 100 Гц до 4 МГц, построенные при комнатной температуре для двух значений напряжения (4 и 6 В) приведены на рис. 5.

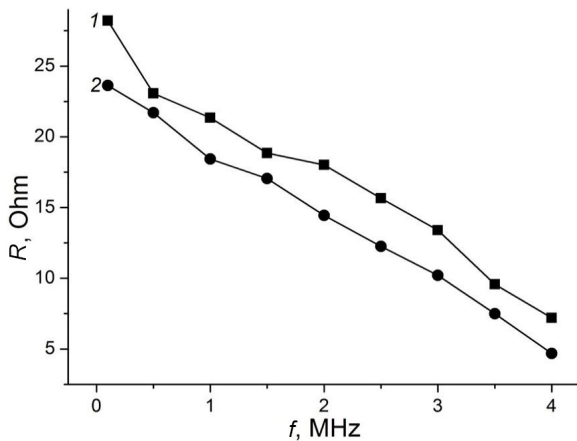


Рис. 5. Частотные зависимости сопротивления манганита при разных значениях измерительного напряжения: 1 – 4 В; 2 – 6 В

Fig. 5. Frequency dependences of the resistance of manganese oxide at different measurement voltages: 1 – 4 V; 2 – 6 V

Построенные зависимости демонстрируют уменьшение сопротивления с ростом частоты, причем в области 1.5–2 МГц на графике 1 наблюдается слабая зависимость от частоты, приближающаяся к плато. В работе [12] четко выраженное плато проявляется на температурной зависимости проводимости манганита $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$ на более низких частотах (100–300 кГц) и объясняется сменой прыжкового механизма переноса зарядов туннельной проводимостью. Далее вступает в действие перколяционный механизм переноса с образованием мезоскопической структуры перколяционных кластеров в фазово-расслоенном неоднородном манганите [12].

С повышением напряжения сопротивление манганита уменьшилось, что связано, очевидно, с его разогревом.

Заключение

1. Синтезирован однофазный керамический манганит $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$, имеющий ромбоэдрическую кристаллическую структуру.

2. Намагниченность синтезированного манганита выше, а температура Кюри ниже, чем у манганита базового состава $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$. Значительная ширина температурного интервала перехода «ферромагнетик-парамагнетик» (около 45 К) свидетельствует о высокой неоднородности полученного манганита.

3. При температурах выше 285 К манганит проявляет свойства полупроводника. Модуль отрицательного магнитосопротивления достигает максимума (18%) при температуре 231 К.

4. С повышением частоты от 100 кГц до 4 МГц сопротивление манганита уменьшается с замедлением процесса спада в области 1.5–2 МГц. При повышении напряжения при измерениях сопротивление снижается за счет разогрева манганита протекающим током.

5. Полученные результаты объясняются экранированием ионов Mn^{4+} диамагнитными ионами цинка, образованием ионов Mn^{2+} , взаимосвязью зонной структуры с магнитной подсистемой манганита, фазовым расслоением и формированием кластеров разновалентных ионов, конкуренцией и сменой механизмов переноса зарядов (прыжкового, туннельного, перколяционного).

Список литературы/References

1. Salamon M. B., Jaime M. The physics of manganites: Structure and transport. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, vol. 73, no. 3, pp. 583–628. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.583>
2. Urushibara A., Moritomo Y., Arima T., Asamitsu A., Kido G., Tokura Y. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. *Phys. Rev. B*, 1995, vol. 51, no. 2, pp. 14103–14109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.14103>
3. Abdel-Latif I. A. Rare earth manganites and their applications. *J. Phys.*, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 15–31.
4. Karpasyuk V. K., Badelin A. G., Derzhavin I. M., Merkulov D. I., Smirnov A. M. Electromagnetic parameters of multicomponent manganites depending on combination and electronic configuration of substituents for manganese. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 42746–42749.
5. Karpasyuk V. K., Badelin A. G., Derzhavin I. M., Merkulov D. I. Systems of manganites with enhanced electromagnetic parameters. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 807–812. <https://doi.org/10.1134/S2075113318050143>
6. Raychaudhuri P., Mitra C., Mann P. D. A., Wirth S. Phase diagram and Hall effect of the electron doped manganese $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, iss. 10, pp. 8328–8330. <https://doi.org/10.1063/1.1556976>
7. Mandal P., Hassen A., Loidl A. Effect of Ce doping on structural, magnetic, and transport properties of SrMnO_3 perovskite. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 69, pp. 224418–224423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.224418>
8. Karpasyuk V. K., Badelin A. G., Datskaya Z. R., Merkulov D. I., Estemirova S. Kh. Properties of La-Sr manganites with combined substitution of different valence ions for strontium and manganese. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 201–206. <https://doi.org/10.1134/S2075113318020132>
9. Musaeva Z. R., Vybornov N. A., Karpasyuk V. K., Smirnov A. M., Uspenskaya L. S., Yzenkov S. Kh. Structural self-organization, domain structure, and magnetic characteristics of manganites of the La-Sr-Mn-Ti-Ni-O system. *J. Surf. Investig.*, 2007,



- vol. 1, no. 4, pp. 423–427. <https://doi.org/10.1134/S1027451007040118>
10. Kowalik M., Tokarz W., Kolodziejczyk A. Electronic band structures of $\text{La}_{2/3}\text{Pb}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}(\text{Fe,Co,Ni})_{1/3}\text{O}_3$. *Acta Phys. Pol. A*, 2015, vol. 127, no. 2, pp. 251–253. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.251>
11. Bebenin N. G., Zainullina R. I., Ustinov V. V. Colossal magnetoresistance manganites. *Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 719–738. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.07.038180>
12. Hizi W., Rahmouni H., Khirouni K., Dhahri E. Consistency between theoretical conduction models and experimental conductivity measurements of strontium-doped lanthanum manganite. *J. Alloys Compd.*, 2023, vol. 957, art. 170418. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170418>
13. Lunkenheimer P., Mayr F., Loidl A. Dynamic conductivity from audio to optical frequencies of semiconducting manganites approaching the metal-insulator transition. *Ann. Phys.*, 2006, vol. 15, no. 7–8, pp. 498–507. <https://doi.org/10.1002/andp.200651807-806>
14. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J. Appl. Crystallogr.*, 1969, vol. 2, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
15. Larson A. C., Von Dreele R. B. General Structure Analysis System (GSAS). *Los Alamos National Laboratory Report*, 1994, pp. 86–748.
16. Abramovich A. I., Koroleva L. I., Michurin A. V. Peculiarities of magnetic, galvanomagnetic, elastic, and magnetoelastic properties of $\text{Sm}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ manganites. *J. Exp. Theor. Phys.*, 2002, vol. 95, no. 5, pp. 917–926. <https://doi.org/10.1134/1.1528684>
17. Shannon R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Cryst. A*, 1976, vol. 32, pp. 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
18. Tan G., Chen Z., Zhang X. Anomalous magnetotransport in $\text{LaMn}_{1-x}\text{Te}_x\text{O}_3$. *Sci. China Ser. G-Phys. Mech. Astron.*, 2009, vol. 52, no. 7, pp. 987–992. <https://doi.org/10.1007/s11433-009-0134-x>

Поступила в редакцию 31.05.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2024; принята к публикации 03.10.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 31.05.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 03.10.2024; published 31.03.2025