

УДК 538.91 + 537.311.3

DOI 10.31429/vestnik-19-1-75-81

Нелинейная связь между током и напряжением в допированных никелем лантан-стронциевых поликристаллических манганитах

А. Г. Баделин ¹✉, Г. В. Бич ¹, В. К. Карпасюк ¹, П. А. Шапошников ¹,
С. Х. Эстемирова ^{1,2}

¹ Астраханский государственный университет, ул. Татищева, 20а, Астрахань, 414056, Россия

² Институт металлургии Уральского отделения РАН, ул. Амундсена, 101, Екатеринбург, 620016, Россия

✉ Баделин Алексей Геннадьевич; e-mail: alexey_badelin@mail.ru

Синтезированные манганиты $\text{La}_{0,81+x}\text{Sr}_{0,19-x}\text{Mn}_{0,81-x}^{3+}\text{Mn}_{0,19}^{4+}\text{Ni}_x^{2+}\text{O}_3^{2-}$ ($x = 0, 100; 0,125$) имеют ромбоэдрическую структуру, являются ферромагнитными с точками Кюри 216 и 181 К, соответственно, и проявляют полупроводниковый характер проводимости в интервале температур 110–200 К. Манганит с содержанием никеля 0,100 ф.е. при $T = 112$ К обладает N -образной вольтамперной характеристикой (ВАХ).

У манганита $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$ при 122 К впервые обнаружена ВАХ с двумя участками отрицательного дифференциального сопротивления разного вида, на которых $dU < 0$ при $dI > 0$ и $dI < 0$ при $dU > 0$. В области температур 132–172 К этот манганит обладает S -образными ВАХ.

Полученные экспериментальные данные объясняются конкурирующими эффектами локального самоподогрева образцов и изменения параметров зонной структуры манганита при повышении напряжения с учетом роли микронеоднородностей, возможности образования токовых каналов и туннелирования носителей заряда между областями с различной плотностью состояний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА ромбоэдрическая структура, точка Кюри, полупроводники, вольтамперные характеристики N - и S -типа, два различных участка отрицательного дифференциального сопротивления.

ФИНАНСИРОВАНИЕ Исследование не имело спонсорской поддержки.

ПОЛУЧЕНО 21 января 2022 г. **ПРИНЯТО** 14 февраля 2022 г. **ПУБЛИКАЦИЯ** 30 марта 2022 г.

ЦИТИРОВАНИЕ Баделин А. Г., Бич Г. В., Карпасюк В. К., Шапошников П. А., Эстемирова С. Х. Нелинейная связь между током и напряжением в допированных никелем лантан-стронциевых поликристаллических манганитах // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2022. Т. 19. № 1. С. 75–81. DOI 10.31429/vestnik-19-1-75-81

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи.

© Автор(ы), 2022. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY).

Nonlinear Relation Between Current and Voltage in Nickel-Doped Lanthanum-Strontium Polycrystalline Manganites

Aleksey G. Badelin¹✉, Gennadiy V. Bich¹, Vladimir K. Karpasyuk¹, Pavel A. Shaposhnikov¹,
Svetlana Kh. Estemirova^{1,2}

¹ Astrakhan State University, Tatischev str., 20a, Astrakhan, 414056, Russia

² Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Amundsen str., 101, Ekaterinburg, 620016, Russia

✉ Aleksey G. Badelin; e-mail: alexey_badelin@mail.ru

Manganites of the $\text{La}_{0,81+x}\text{Sr}_{0,19-x}\text{Mn}_{0,81-x}^{3+}\text{Mn}_{0,19}^{4+}\text{Ni}_x^{2+}\text{O}_3^{2-}$ system ($x = 0.100; 0.125$) were synthesized using traditional ceramic processing. The obtained samples have a rhombohedral structure, are ferromagnetic with Curie points of 216 and 181 K, respectively, and exhibit semiconductive type of conduction in the temperature range of 110–200 K. The sample with $x = 0.125$ has submicron crystallite sizes and higher resistance.

In manganite with nickel content of 0.100 f.e. at $T = 112$ K, N -shaped current-voltage ($I - V$) characteristic is observed. Manganite $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$ has S -shaped $I - V$ characteristic in the temperature range of 132–172 K. With a decrease in temperature, the differential conductivity on the upper branch of $I - V$ characteristic decreases and becomes negative at 122 K. As a result, for the first time, current-voltage characteristic was detected with two sections of negative differential resistance of various types, on which $dU < 0$ at $dI > 0$ and $dI < 0$ at $dU > 0$.

Experimental data are explained by competing effects of local self-heating of the samples and changes in the parameters of zone structure with increasing voltage, taking into account the role of microinhomogeneities, the possibility of current channels occurrence and tunneling of charge carriers between regions with different densities of states. The study of regularities and mechanisms of $I - V$ characteristic formation with coexisting

sections of negative differential resistance of various types is important for understanding the nature of nonlinear phenomena in complex-substituted manganites as strongly correlated systems and for obtaining the required properties of these materials.

KEYWORDS rhombohedral structure, Curie point, semiconductors, current-voltage characteristics of *N*- and *S*-type, two various sections of negative differential resistance.

FUNDING The study did not have sponsorship.

RECEIVED 21 January 2022. **ACCEPTED** 14 February 2022. **PUBLISHED** 30 March 2022.

CITE AS Badelin A. G., Bich G. V., Karpasyuk V. K., Shaposhnikov P. A., Estemirova S. Kh. Nonlinear relation between current and voltage in nickel-doped lanthanum-strontium polycrystalline manganites. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 75–81. DOI 10.31429/vestnik-19-1-75-81

The author(s) declare no competing interests. The author(s) contributed equally.

© The Author(s), 2022. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Одно из известных семейств перспективных функциональных материалов с перовскитоподобной кристаллической структурой [1] составляют манганиты, которые, помимо характерного для них колоссального магниторезистивного эффекта [1–3], могут обладать переключаемыми вольтамперными характеристиками различного типа [4–7] и другими интересными для практических приложений свойствами [7–10]. Манганиты применяются в качестве чувствительных элементов датчиков магнитного поля и преобразователей [1, 7, 11], в устройствах спинтроники [1, 7, 12]. Материалы, обладающие *S*-образными или *N*-образными вольтамперными характеристиками (ВАХ), могут быть использованы в переключателях и генераторах колебаний. Интересно отметить, что в манганитах возможно получение вольтамперных характеристик, содержащих несколько участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением [6].

Однако механизмы электрического переключения лантан-стронциевых манганитов с замещением марганца разновалентными ионами в зависимости от состава и структуры до конца не поняты.

Обычно считается, что ВАХ *S*-типа обусловлены джоулевым разогревом манганитов с учетом существования перехода «металл–полупроводник» и роли фазового расслоения, некоторые аспекты которого остаются дискуссионными [3, 13–17].

Существование *N*-образных ВАХ может быть связано с усилением рассеяния носителей заряда в поле выше порогового или с перестройкой структуры энергетических уровней и изменением распределения концентрации носителей в энергетических зонах с различной плотностью состояний [5, 6].

В работе [18] рассмотрена возможность интерпретации нелинейных ВАХ на основе учета поляронных эффектов.

Имеющиеся экспериментальные данные о влиянии замещающих марганец ионов на вольтамперные характеристики манганитов достаточно бедны и относятся к единичным составам образцов. При этом, допирование влияет на зонный спектр манганитов и может стимулировать возникновение собственных микронеоднородностей [2, 9, 19], что должно сказываться на формировании ВАХ.

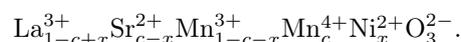
Данная работа посвящена исследованию нелинейных электрических характеристик манганитов системы $\text{La}_{1-c+x}\text{Sr}_{c-x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3+\gamma}$ при различных температурах во взаимосвязи с их структурными параметрами и магнитными свойствами с целью выявления возможности и условий получения ВАХ с несколькими участками отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) различного типа. Составы выбраны в области ромбоэдрической фазы диаграммы состояния, вблизи границы концентрационного перехода в орторомбическую фазу, где структура и свойства манганитов наиболее чувствительны к концентрации никеля.

Таблица 1. Кристаллографические и магнитные характеристики синтезированных манганитов

Состав	Параметры решетки, нм		$10^3 \cdot V_{\text{я}}, \text{ нм}^3$	$T_c, \text{ K}$	$\sigma, \text{ A}\cdot\text{M}^2/\text{кг}$
	a	c			
$\text{La}_{0,910}\text{Sr}_{0,090}\text{Mn}_{0,900}\text{Ni}_{0,100}\text{O}_3$	0,553	1,336	353,421	216	71,1
$\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$	0,553	1,334	353,176	181	58,2

1. Объекты и методы исследования

Система составов сконструирована таким образом, что сумма концентраций двухвалентных ионов Sr^{2+} и Ni^{2+} , равная « c » формульных единиц (ф.е.), остается постоянной при изменении содержания никеля. Отметим, что величина « c » соответствует концентрации катионов Mn^{4+} в стехиометрических по кислороду манганитах данной системы, т.к. её развернутая химическая формула имеет вид



Содержание Mn^{4+} имеет важное значение, поскольку, как известно [2, 7], электромагнитные свойства манганитов определяются, в основном, двойным обменным взаимодействием между трехвалентными и четырехвалентными ионами марганца. На фазовой диаграмме базовой системы $\text{La}_{1-a}\text{Sr}_a\text{MnO}_3$ границе «орторомбическая-ромбоэдрическая фазы» соответствует концентрация Mn^{4+} , равная 0,175. В настоящей работе выбраны следующие значения коэффициентов « c » и « x »: $c = 0,19$; $x = 0,100$; $0,125$. Манганиты таких составов имеют практически одинаковые факторы толерантности Гольдшмидта — 0,965 и 0,964.

Образцы манганитов были синтезированы по керамической технологии на воздухе, основные операции которой описаны в статье [9]. Заключительная стадия спекания осуществлялась при 1473 К в течение 10 ч с последующим охлаждением образцов вместе с печью.

Фазовый состав и параметры кристаллической решетки определялись по рентгеновским порошковым дифрактограммам. Съемка проводилась в $\text{CuK}\alpha$ -излучении на дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

Изображения микроструктуры экспериментальных образцов были получены на растровом электронном микроскопе MIRA 3.

Удельная намагниченность (σ) была измерена баллистическим методом в постоянном магнитном поле 0,56 Тл. Точка Кюри (T_c) определялась по температурным зависимостям магнитной проницаемости ($\mu(T)$) как температура, соответствующая максимуму $|d\mu/dT|$. Измерения электрических характеристик осуществлялись с использованием медных электродов, нанесенных методом вакуумного напыления на противоположные плоскости таблеток диаметром 4 мм и толщиной 2 мм.

2. Результаты и их обсуждение

Синтезированные манганиты имеют ромбоэдрическую кристаллическую структуру (пространственная группа $R\bar{3}c$). Параметры решетки a , c и объем элементарной ячейки $V_{\text{я}}$ представлены в табл. 1. Характер зависимости объема элементарной ячейки от состава соответствует изменению вкладов ионных радиусов катионов вследствие изменения их концентрации.

Уменьшение параметра решетки c обуславливает усиление антиферромагнитных взаимодействий, что должно приводить к снижению точки Кюри, намагниченности и проводимости. И это действительно наблюдается у образца с более высоким содержанием Ni (табл. 1, рис. 1), однако данный эффект в большей степени обусловлен тем, что ионы никеля не участвуют в двойном обменном взаимодействии, а встраиваясь в цепочки $\text{Mn}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Mn}^{4+}$, разрывают часть обменных связей между ионами Mn^{3+} и Mn^{4+} .

Представленные на рис. 1 зависимости сопротивления образцов от температуры демонстрируют полупроводниковый характер проводимости исследуемых манганитов в диапазоне

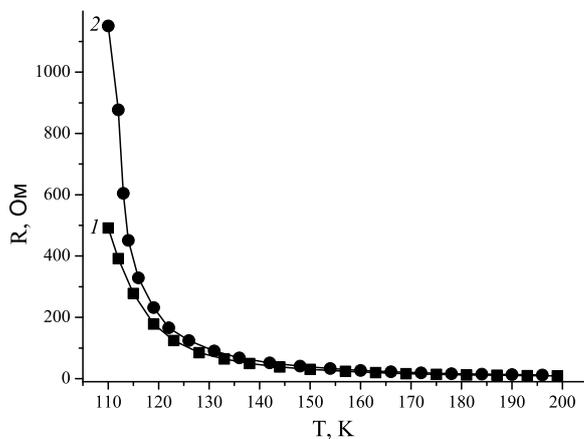


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления образцов манганитов: 1 — $\text{La}_{0,910}\text{Sr}_{0,090}\text{Mn}_{0,900}\text{Ni}_{0,100}\text{O}_3$; 2 — $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$

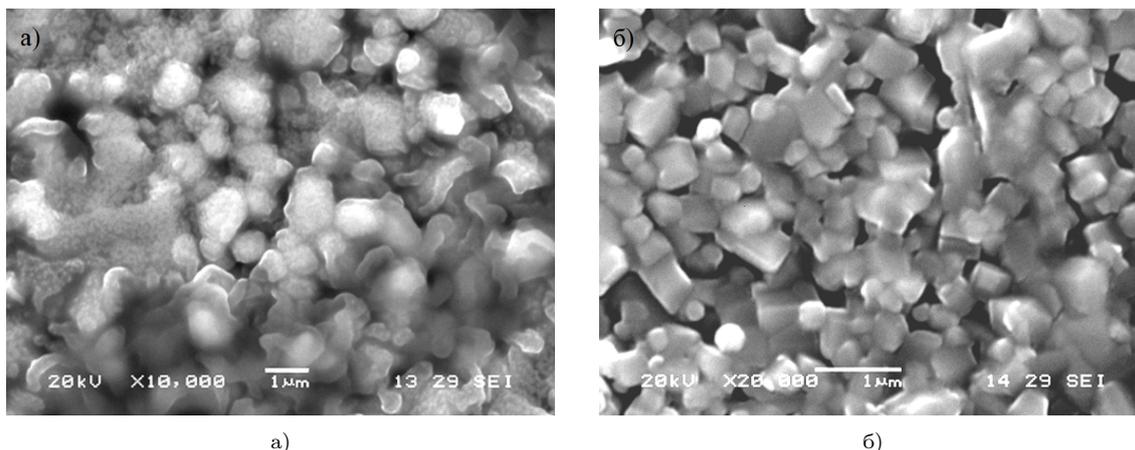


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения во вторичных электронах поверхности манганитов: а) $\text{La}_{0,910}\text{Sr}_{0,090}\text{Mn}_{0,900}\text{Ni}_{0,100}\text{O}_3$; б) $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$

температур от 110 до 200 К, тогда как в базовой La–Sr системе при содержании Mn^{4+} более 0,17 ф.е. при температуре ниже точки Кюри существует металлическая фаза. Таким образом, введение никеля приводит к снижению температуры перехода «металл–полупроводник».

Микроструктура образцов манганитов показана на рис. 2. Средний диаметр кристаллитов ($d_{\text{ср}}$) в манганите, содержащем 0,100 ф.е. Ni, равен 0,96 мкм, а в манганите с содержанием никеля 0,125 ф.е. $d_{\text{ср}} = 0,45$ мкм. Соответственно, последний образец обладает более высокой удельной поверхностью кристаллитов, влияющей на электрические параметры манганитов.

На рис. 3 приведены вольтамперные характеристики манганитов, снятые в области температур от 112 К до 172 К.

У образца с содержанием никеля $x = 0,100$ ф.е. по мере снижения температуры дифференциальное сопротивление dU/dI на участках $b-c$ увеличивается, а при температуре 112 К возникает N -образная ВАХ с $dU/dI < 0$ на участке $a-b$ (рис. 3а).

Образец, содержащий 0,125 ф.е. Ni (рис. 3б), обладает S -образными ВАХ при температурах от 172 до 132 К с ОДС на участках $e-f$, а участки $f-g$, на которых dU/dI возрастает с

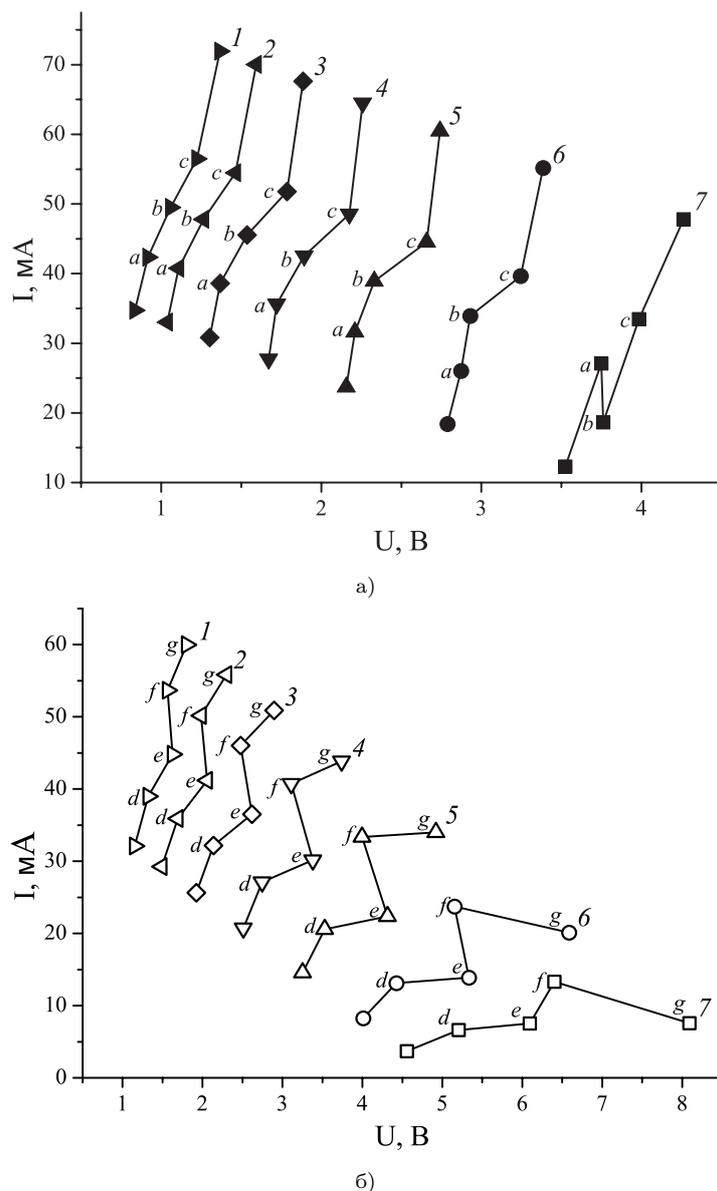


Рис. 3. Вольтамперные характеристики манганитов
 а) $\text{La}_{0,910}\text{Sr}_{0,090}\text{Mn}_{0,900}\text{Ni}_{0,100}\text{O}_3$ и б) $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$
 при температурах: 1 – 172 К; 2 – 162 К; 3 – 152 К; 4 – 142 К; 5 – 132 К; 6 – 122 К; 7 – 112 К

понижением температуры, подобны участкам $b-c$ на рис. 3а. При температурах 122 и 112 К дифференциальное сопротивление на участках $f-g$ становится отрицательным ($dI < 0, dU > 0$), причем на участке $e-f$ при 122 К $dI > 0, dU < 0$, а при 112 К $dU/dI > 0$ (рис. 3б).

Таким образом, вольтамперная характеристика манганита $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$ при температуре 122 К имеет два участка с ОДС разного вида: $dU < 0$ при $dI > 0$ и $dI < 0$ при $dU > 0$.

Отметим, что при температурах выше 190 К у всех образцов зависимости тока от напряжения являются практически линейными.

Возникновение S-образных ВАХ в манганите с более высоким содержанием никеля и более высоким сопротивлением обусловлено, очевидно, локальным саморазогревом образца. Это

может быть связано с формированием микронеоднородностей с пониженной проводимостью вследствие локализации ионов Ni^{2+} , благодаря кулоновскому взаимодействию, вблизи ионов Mn^{4+} , вследствие чего уменьшается энергия двойного обменного взаимодействия $\text{Mn}^{3+}-\text{Mn}^{4+}$ и вероятность переноса носителей заряда. При этом не исключено образование токовых каналов. Области с повышенным сопротивлением являются также межкристаллитные границы, площадь которых в манганите с содержанием никеля 0,125 ф.е. больше, чем в манганите с $x = 0,100$ ф.е.

Переход на участке $f-g$ от положительного дифференциального сопротивления при $T \geq 132$ К к ОДС вида $dI < 0$, $dU > 0$ при температурах 122 и 112 К (рис. 36), как и образование такого же вида ОДС на участке $a-b$ N -образной ВАХ при температуре 112 К (рис. 3а), обусловлено, вероятно, изменением структуры и заселенности энергетических уровней манганита с повышением напряжения, а также туннелированием носителей заряда между областями с различной плотностью занятых и свободных состояний. За счет уменьшения нагрева (вследствие уменьшения силы тока и улучшения теплоотвода) при $T = 112$ К на участке $e-f$ дифференциальное сопротивление становится положительным (рис. 36).

Выводы

1. Исследованы структурные, магнитные и электрические характеристики манганитов $\text{La}_{0,81+x}\text{Sr}_{0,19-x}\text{Mn}_{0,81-x}\text{Mn}_{0,19}\text{Ni}_x\text{O}_3$ ($x = 0, 100; 0,125$) при различных температурах. Оба образца имеют ромбоэдрическую структуру, являются ферромагнитными с точками Кюри 216 и 181 К, соответственно, и обладают полупроводниковым характером проводимости в области температур 110–200 К. Образец с $x = 0,125$ имеет субмикронные размеры кристаллитов и более высокое сопротивление.

2. У образца с содержанием никеля 0,100 ф.е. при $T = 112$ К наблюдается N -образная вольтамперная характеристика.

3. Образец, содержащий 0,125 ф.е. Ni, обладает S -образными ВАХ при температурах от 132 до 172 К.

4. Впервые обнаружена ВАХ с двумя участками отрицательного дифференциального сопротивления разного вида, на которых $dU < 0$ при $dI > 0$ и $dI < 0$ при $dU < 0$. Такой характеристикой обладает манганит $\text{La}_{0,935}\text{Sr}_{0,065}\text{Mn}_{0,875}\text{Ni}_{0,125}\text{O}_3$ при температуре 122 К.

5. Полученные результаты объясняются конкурирующими эффектами локального джоулева саморазогрева образцов и изменения параметров зонной структуры манганита при повышении напряжения. При этом учитываются роль микронеоднородностей с пониженной проводимостью и возможность образования токовых каналов, а также туннелирование носителей заряда между областями с различной плотностью состояний.

6. Исследование закономерностей и механизмов формирования ВАХ с сосуществующими участками отрицательного дифференциального сопротивления различного вида представляется важным для понимания природы таких ВАХ в сложно-замещенных манганитах и для получения требуемых свойств указанных материалов.

Литература [References]

1. Belich N., Udalova N., Semenova A., Petrov A., Fateev S., Tarasov A., Goodilin E. Perovskite puzzle for revolutionary functional materials. *Front. Chem.*, 2020, vol. 8, p. 550625. DOI [10.3389/fchem.2020.550625](https://doi.org/10.3389/fchem.2020.550625)
2. Bebenin N.G., Zainullina R.I., Ustinov V.V. Colossal magnetoresistance manganites. *Physics-Uspekhi*, 2018, vol. 61, iss. 8, pp. 719–738. DOI [10.3367/UFNe.2017.07.038180](https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.07.038180)
3. Dagotto E. Open questions in CMR manganites, relevance of clustered states and analogies with other compounds including the cuprates. *New J. of Phys.*, 2005, vol. 7 DOI [10.1088/1367-2630/7/1/067](https://doi.org/10.1088/1367-2630/7/1/067)
4. Guha A., Khare N., Raychaudhuri A.K., Rao C.N.R. Magnetic field resulting from nonlinear electrical transport in single crystals of charge-ordered $\text{Pr}_{0.63}\text{Ca}_{0.37}\text{MnO}_3$. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, p. R11941(R). DOI [10.1103/PhysRevB.62.R11941](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.R11941)

5. Kamilov I.K., Aliev K.M., Ibragimov Kh.O., Abakarova N.S. N-shaped voltage-current characteristic and current oscillations in $\text{Sm}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ manganite. *JETP Lett.* 2003, vol. 78, pp. 485–487. DOI [10.1134/1.1637699](https://doi.org/10.1134/1.1637699)
6. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Smirnov A.M., Sorokin V.V., Evseeva A., Doyutova E., Shchepetkin A.A. N-type current-voltage characteristics of manganites. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2010, vol. 200, p. 052026. DOI [10.1088/1742-6596/200/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/5/052026)
7. Abdel-Latif I.A. Rare earth manganites and their applications. *J. Phys.*, 2012, vol. 1, iss. 3, pp. 15–31.
8. Koroleva L.I., Demin R.V., Kozlov A.V., Zashchirinskii D.M., Mukovskii Ya.M. Relation between giant volume magnetostriction, colossal magnetoresistance, and crystal lattice softening in manganites $\text{La}_{1-x}\text{A}_y\text{MnO}_3$ (A=Ca, Ag, Ba, Sr). *J. Exp. Theor. Phys.*, 2007, vol. 104, iss. 1, pp. 76–86.
9. 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, iss. 5, pp. 807–812. DOI [10.1134/S2075113318020132](https://doi.org/10.1134/S2075113318020132)
10. Koroleva L.I., Morozov A.S., Zhakina E.S., Batashev I.K., Balbashov A.M. A new method of increasing thermopower in doped manganites. *Tech. Phys. Lett.*, 2016, vol. 42, pp. 652–655. DOI [10.1134/S1063785016060237](https://doi.org/10.1134/S1063785016060237)
11. Karpasyuk V., Smirnov A., Badelin A. Ceramic manganites with contacts of various metals in magnetic field sensors. *World Appl. Sci. J.*, 2014, vol. 32, iss. 10, pp. 2028–2031. DOI [10.5829/idosi.wasj.2014.32.10.1295](https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.32.10.1295)
12. Volkov N.V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures. *Physics-Uspekh*, 2012, vol. 55, iss. 3, pp. 250–269. DOI [10.3367/UFNe.0182.201203b.0263](https://doi.org/10.3367/UFNe.0182.201203b.0263)
13. Wu X.D., Suzuki K., Cochrane J., Markovich V., Gorodetsky G. Effect of electrical current on magnetic and transport properties of single-crystalline $\text{La}_{0.82}\text{Ca}_{0.18}\text{MnO}_3$. *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, iss. 6, pp. 1705–1707. DOI [10.1109/TMAG.2010.2044755](https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2044755)
14. Fisher B., Genossar J., Patlagan L., Reisner G.M. Electric-field effects in resistive oxides: facts and artifacts. *EPJ Web of Conf.*, 2013, vol. 40, p. 15009. DOI [10.1051/epjconf/20134015009](https://doi.org/10.1051/epjconf/20134015009)
15. Shaykhutdinov K.A., Popkov S.I., Balaev D.A., Semenov S.V., Bykov A.A., Dubrovskiy A.A., Saponova N.V., Volkov N.V. Non-linear current-voltage characteristics of $(\text{La}_{0.5}\text{Eu}_{0.5})_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ single crystals: Possible manifestation of the internal heating of chargecarriers. *Phys. B: Condens. Matter.*, 2010, vol. 405, iss. 24, pp. 4961–4965. DOI [10.1016/j.physb.2010.09.043](https://doi.org/10.1016/j.physb.2010.09.043)
16. Tulina N.A., Uspenskaya L.S., Sirotkin V.V., Mukovskii Y.M., Shulyatev D.A. Intrinsic inhomogeneities and effects of resistive switching in doped manganites. *Phys. C: Supercond. Appl.*, 2006, vol. 444, iss. 1–2, pp. 19–22. DOI [10.1016/j.physc.2006.05.081](https://doi.org/10.1016/j.physc.2006.05.081)
17. Povzner A.A., Volkov A.G. Influence of voltage on magnetization of ferromagnetic semiconductors with colossal magnetoresistance. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, vol. 432, pp. 466–471. DOI [10.1016/j.jmmm.2017.01.104](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.104)
18. Moshnyaga V., Gehrke K., Lebedev O.I., Sudheendra L., Belenchuk A., Raabe S., Shapoval O., Verbeeck J., Tendeloo G. Van, Samwer K. Electrical nonlinearity in colossal magnetoresistance manganite films: Relevance of correlated polarons. *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 79, p. 134413. DOI [10.1103/PhysRevB.79.134413](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.134413)
19. 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, pp. 251–253. DOI [10.12693/APhysPolA.127.251](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.251)