

Ф И З И К А

УДК 538.91+538.95

DOI: 10.31429/vestnik-17-4-25-32

СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МАНГАНИТОВ ЛАНТАН-СТРОНЦИЕВОЙ СИСТЕМЫ
С ЗАМЕЩЕНИЕМ МАРГАНЦА ВАНАДИЕМ

Датская З. Р., Корнеева Е. А., Баделин А. Г., Карпасюк В. К., Эстемирова С. Х.

STRUCTURAL AND ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF MANGANITES
OF THE LANTHANUM-STRONTIUM SYSTEM WITH THE SUBSTITUTION
OF VANADIUM FOR MANGANESEZ. R. Datskaya¹, E. A. Korneeva¹, A. G. Badelin¹, V. K. Karpasyuk¹, S. Kh. Estemirova^{1,2}¹ Astrakhan State University, Astrakhan, Russia² Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia
e-mail: mira-phys@mail.ru

Abstract. Polycrystalline perovskite-like manganites of the $\text{La}_{1-c}\text{Sr}_c\text{Mn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_3$ system ($c = 0.35; 0.45; 0.55; x = 0.05; 0.10$) were synthesized using conventional ceramic processing. Sintering was carried out at 1473 K for 10 h. Then the samples were annealed under conditions that provide stoichiometric oxygen content.

Manganite with the lowest strontium and vanadium content is of rhombohedral structure, while the other samples are orthorhombic. All samples contain an impurity of SrV_2O_5 phase in the amount of from a few tenths to 2.5 mass %. The introduction of strontium and vanadium leads to decrease in the unit cell volume of perovskite phase.

Electromagnetic parameters of manganites change with the content of Sr and V as follows: specific magnetization at 80 K decreases from 71.8 to 49.2 emu/g; Curie point rises from 326 K to 340 K; width of the “ferromagnetic–paramagnetic” transition temperature interval increases; metallic type of conductivity in the 120–300 K range is replaced by a semiconducting nature for $c = 0.55; x = 0.10$. Manganite $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$ has a maximum absolute value of magnetoresistance equal to 23 % in the field of 0.92 T at 120 K.

Possible approaches to the interpretation of the established regularities are discussed, taking into consideration the changes in the concentrations of different valence manganese ions and the ratio of competing exchange interactions, the formation of ferromagnetic clusters and possible violation of the percolation regime between them, the influence of second-phase segregations and localization of cation vacancies at the intercrystalline boundaries.

Keywords: ceramic samples, phase composition, unit cell volume, impurity, magnetization, magnetic permeability, Curie point, conduction, magnetoresistance.

Введение

Внимание исследователей и разработчиков новых материалов в течение уже достаточно длительного времени привлекают к

себе перовскитоподобные манганиты, относящиеся к классу сильно коррелированных систем [1–7]. Обладающие сочетанием эффектов колоссального магнитосопротивления, гигантской магнитострикции, электрического

Датская Замира Растямовна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры материаловедения и технологии сварки Астраханского государственного университета; e-mail: mira-phys@mail.ru.

Корнеева Елена Александровна, ассистент кафедры материаловедения и технологии сварки Астраханского государственного университета; e-mail: gvosdeva@mail.ru.

Баделин Алексей Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник научно-образовательного центра функциональных магнитных материалов Астраханского государственного университета; e-mail: alexey_badelin@mail.ru.

Карпасюк Владимир Корнильевич, д-р. физ.-мат. наук, профессор, директор–научный руководитель научно-образовательного центра функциональных магнитных материалов Астраханского государственного университета; e-mail: vkarpasyuk@mail.ru.

Эстемирова Светлана Хусаиновна, канд. хим. наук, старший научный сотрудник научно-образовательного центра функциональных магнитных материалов Астраханского государственного университета, старший научный сотрудник лаборатории статистики и кинетики процессов Института металлургии Уральского отделения РАН; e-mail: esveta100@mail.ru.

переключения, высокого магнитокалорического эффекта [1–8], манганиты рассматриваются как перспективные функциональные среды для устройств магнитной и спиновой электроники [5, 7–9], а также как материалы для магнитной гипертермии, используемой в медицине [10].

Получение требуемых параметров манганитов достигается обычно путем замещения ионов в базовой системе иновалентными катионами, являющихся донорами или акцепторами, а также варьированием содержания кислорода, что позволяет управлять фазовым составом, изменять зонную структуру, тип проводимости и концентрацию носителей заряда, соотношение конкурирующих обменных взаимодействий, вид магнитного упорядочения [2, 3, 6, 7, 10, 11].

Функциональные магнитные материалы различного назначения чаще всего разрабатываются на основе манганитов системы $\text{La}_{1-c}\text{Sr}_c\text{MnO}_3$, обладающих высокими значениями намагниченности насыщения (σ_s) и температуры Кюри (T_c). При этом важную роль в формировании параметров манганитов играют заряд, ионный радиус и электронная конфигурация допирующих ионов [2, 5, 7, 11].

Исследованию изменений свойств манганитов при замещении марганца разновалентными ионами с различной конфигурацией электронных оболочек посвящено значительное количество работ (например, [7, 8, 10–16]), в том числе, имеются немногочисленные публикации, в которых рассмотрены составы, содержащие элементы подгруппы ванадия (V, Nb) [14–16].

В работе [14] исследованы образцы манганитов $\text{LaMn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_3$ при содержании ванадия от 0,1 до 0,9 формульных единиц, синтезированные при 1473 К в вакууме с остаточным давлением $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Установлено, что при замещении марганца ванадием сохраняется орторомбическая кристаллическая структура, а магнитная структура изменяется от скошенной антиферромагнитной при концентрации ванадия менее 0,4 до коллинеарной антиферромагнитного упорядочения при $x = 0,9$, проходя через промежуточное состояние спинового стекла. Удельная намагниченность в поле 1,9 Тл с увеличением содержания ванадия уменьшается от 40 до 1 $\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$.

В работе [15] показано, что замещение марганца ионами Nb^{5+} в системе $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{1-x/2}\text{Nb}_{x/2})\text{O}_3$ ($x = 0,2; 0,3; 0,4$) обуслов-

ливает переход из металлического в диэлектрическое состояние, причем, несмотря на высокое удельное сопротивление, ниобийсодержащие манганиты обладают ферромагнитным упорядочением и проявляют большой магниторезистивный эффект (до 23 % в поле 0,9 Тл при температуре 90 К у образца с $x = 0,3$). Значения температуры Кюри находятся в интервале от 110 до 190 К в зависимости от содержания ниобия и условий синтеза.

Механизмы формирования свойств манганитов при комбинированном введении ванадия в октаэдрическую подрешетку и разновалентных ионов в редкоземельную подрешетку остаются пока что малоизученными.

Целью настоящего исследования является установление и сравнение влияния замещения марганца ванадием на структурные, магнитные и электрические характеристики манганитов системы $\text{La}_{1-c}\text{Sr}_c\text{Mn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_3$ ($x = 0,05; 0,10$) с увеличивающимся содержанием стронция ($c = 0,35; 0,45; 0,55$), обеспечивающим возрастание или поддержание постоянной концентрации ионов Mn^{4+} за счет процессов зарядовой компенсации. Такой подход был предложен (применительно к другим системам) в [7, 17] для реализации идеи сохранения количества пар четырех- и трехвалентных ионов марганца, связанных двойным обменным взаимодействием, которое является причиной возникновения ферромагнитного упорядочения и металлической проводимости манганитов [2].

1. Объекты и методы исследования

Поликристаллические образцы манганитов $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$ (состав №1), $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$ (состав №2), $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$ (состав №3) были синтезированы по обычной керамической технологии. Особенности операций синтеза представлены в [7, 11]. Завершающая стадия спекания осуществлялась при 1473 К в течение 10 ч., после чего образцы охлаждались вместе с печью. Затем, с целью приведения содержания кислорода в манганитах к стехиометрическому значению [11], образцы были отожжены при 1223 К и парциальном давлении кислорода в газовой фазе $P_{\text{O}_2} = 10^{-1}$ Па в течение 96 ч.

Отметим, что расчетное значение концентрации ионов Mn^{4+} при пятивалентном замещающем ионе в первом образце равно

Таблица 1. Параметры кристаллической структуры синтезированных образцов манганитов системы $\text{La}_{1-c}\text{Sr}_c\text{Mn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_{3+\gamma}$

с	х	Фазовый состав		$10^3 \cdot V_{\text{я}}, \text{нм}^3$	
		До отжига	После отжига	До отжига	После отжига
0,35	0,05	$R\bar{3}c$, следы SrV_2O_5	$R\bar{3}c$, следы SrV_2O_5	348,810	349,547
0,45	0,05	Pnma, SrV_2O_5 (< 1 масс.%)	Pnma, SrV_2O_5 (< 1 масс.%)	231,800	231,564
0,55	0,10	Pnma, SrV_2O_5 (~ 2 масс.%)	Pnma, SrV_2O_5 (~ 2,5 масс.%)	231,424	231,260

0,25 формульных единиц (ф.е.), а во втором и третьем образцах составляет 0,35 ф.е.; этим значениям в базовой системе $\text{La}_{1-c}\text{Sr}_c\text{MnO}_3$ соответствует область существования металлической ферромагнитной фазы с высокими значениями T_c и σ_s [2].

Фазовый состав и параметры элементарной ячейки синтезированных образцов определялись по порошковым дифрактограммам, полученным на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении.

Удельная намагниченность (σ) измерялась баллистическим методом в постоянном магнитном поле 0,56 Тл при температуре 80 К. Измерения температурной зависимости магнитной проницаемости ($\mu(T)$) осуществлялись индукционным методом на частоте 98,6 кГц. Точка Кюри (T_c) определялась как температура, соответствующая максимуму $|d\mu/dT|$.

Измерения электрических характеристик и магнитосопротивления ($MR = \frac{R(B) - R(0)}{R(B)} \cdot 100\%$, где $R(B)$ — электросопротивление в продольном поле с индукцией $B = 0,92$ Тл, $R(0)$ — сопротивление при $B = 0$) были выполнены с использованием медных контактов, нанесенных методом вакуумного напыления.

2. Результаты и их обсуждение

Фазовый состав и объем элементарной ячейки ($V_{\text{я}}$) полученных образцов до и после отжига приведены в табл. 1. Манганит первого состава имеет ромбоэдрическую структуру (пространственная группа $R\bar{3}c$), остальные манганиты обладают орторомбической решеткой (пространственная группа Pnma).

Образцы всех составов содержат примесь фазы SrV_2O_5 , количество которой возрастает с увеличением содержания стронция и ванадия. Фазовый состав после отжига практически не изменяется в пределах точности определения.

Объем элементарной ячейки орторомбических образцов с увеличением содержания стронция и ванадия уменьшается. Это обусловлено возрастанием содержания ионов Mn^{4+} (ионный радиус $r(\text{Mn}^{4+}) = 0,053$ нм) и V^{5+} (радиус $r(\text{V}^{5+}) = 0,054$ нм) за счет уменьшения концентрации Mn^{3+} ($r(\text{Mn}^{3+}) = 0,0645$ нм) [18]. При этом следует учесть, что радиусы ионов La^{3+} и Sr^{2+} (0,136 нм и 0,144 нм, соответственно) отличаются на меньшую величину.

У отожженных (стехиометрических) ромбоэдрических образцов объем элементарной ячейки больше, чем у исходных (спеченных) манганитов, содержащих сверхстехиометрический кислород [11], поскольку снижение содержания кислорода вызывает переход $\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{3+}$. Однако у орторомбических образцов с более высокими значениями (c, x) объем ячейки после отжига уменьшился, что может быть обусловлено образованием однозарядных ионов кислорода [19].

Данные об удельной намагниченности, температуре Кюри и максимальной (по модулю) величине магнитосопротивления отожженных (стехиометрических) образцов приведены в табл. 2.

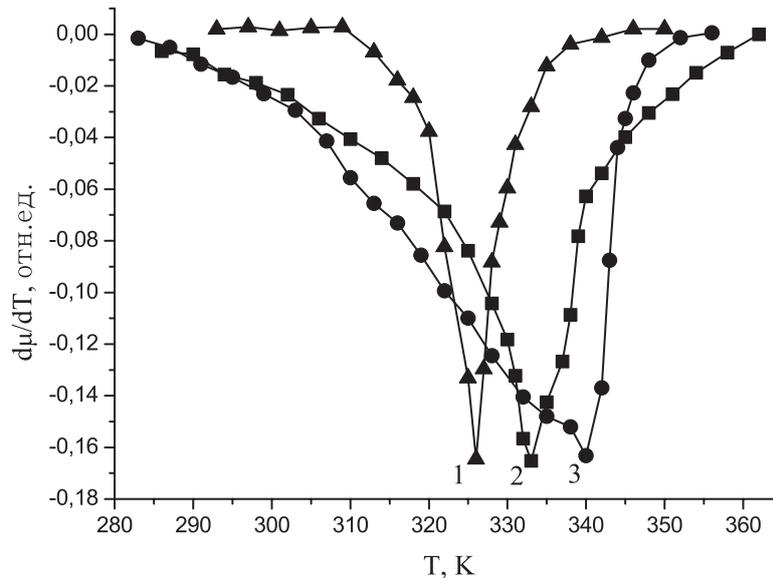
Температура Кюри была определена в точках, соответствующих минимумам на графиках температурной зависимости производной магнитной проницаемости по температуре, приведенных на рис. 1.

Обращает на себя внимание уширение температурного интервала перехода «ферромагнетик–парамагнетик» по мере увеличения содержания стронция и ванадия, что свидетельствует о возрастании неоднородности образцов, связанной с выделениями второй фазы и с неоднородным распределением разновалентных ионов вследствие кулоновского взаимодействия [11, 19].

Намагниченность манганитов с увеличением содержания стронция и ванадия уменьшается, а точка Кюри немного повышается. Такое интересное сочетание особенностей из-

Таблица 2. Удельная намагниченность при 80 К, температура Кюри и максимальная абсолютная величина магнитосопротивления отожженных образцов

Состав	σ , А·м ² /кг	T_c , К	$ \text{MR} _{\text{max}}$, %
№1: $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$	71,8	326	1
№2: $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$	69,8	333	23
№3: $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$	49,2	340	12

Рис. 1. Температурные зависимости производной магнитной проницаемости по температуре: 1 — $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$; 2 — $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$; 3 — $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$

менения σ и T_c объясняется влиянием следующих факторов. Ферромагнитные свойства разбавленных манганитов определяются количеством пар ионов (Mn^{4+} , Mn^{3+}), связанных двойным обменным взаимодействием, а также положительным сверхобменом $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$ [2, 15]. Зарядовая компенсация повышения содержания стронция обеспечивается переходом $\text{Mn}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$, а замещение марганца ванадием также приводит к снижению концентрации ионов Mn^{3+} , обладающих в рассматриваемых составах наибольшим магнитным моментом (4 магнетона Бора, μ_B). Поэтому намагниченность снижается. Повышение T_c , очевидно, связано с формированием ферромагнитных кластеров, которые обнаруживаются в определенном диапазоне температур вблизи точки Кюри [15].

Сопротивление манганитов возрастает при повышении содержания стронция и ванадия, причем образцы составов №1 и №2 в исследованном диапазоне температур обладают металлической проводимостью, а манганит состава №3 — полупроводниковой. Смена ти-

па проводимости орторомбических образцов с изменением состава иллюстрируется температурными зависимостями сопротивления, показанными на рис. 2.

Сопротивление образца №3 примерно в 100 раз выше, чем образца №2; сопротивление образца №1 составляет единицы Ом.

Резкое повышение сопротивления и смена типа проводимости манганитов с увеличением содержания ванадия могут быть обусловлены возрастанием количества выделений фазы SrV_2O_5 и возникновением в перовскитной фазе катионных вакансий, локализуемых на межкристаллитных границах, а также, возможно, нарушением режима перколяции между ферромагнитными металлическими фазами (кластерами) в разбавленной ионами ванадия среде.

При приложении магнитного поля сопротивление манганитов уменьшается. Величина магнитосопротивления образца №1 не превосходит (по модулю) 1 %. Температурные зависимости магнитосопротивления образцов №2 и №3 представлены на рис. 3.

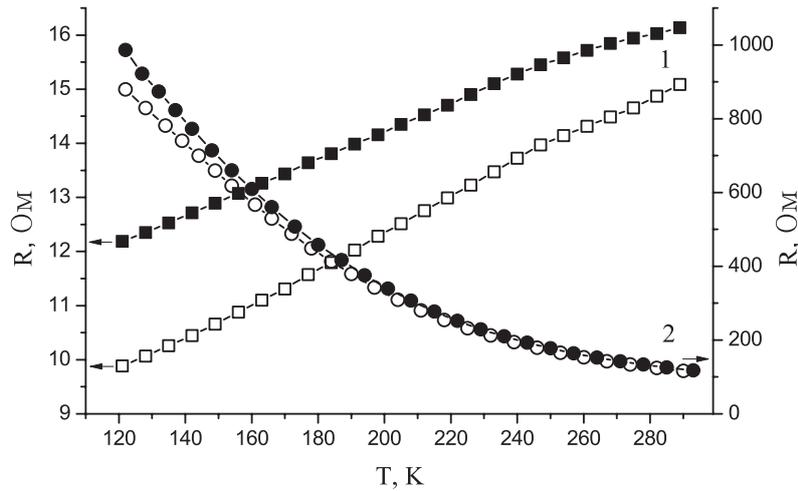


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления отожженных образцов в отсутствии магнитного поля (черные символы) и в магнитном поле (светлые символы):
1 — $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$; 2 — $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$

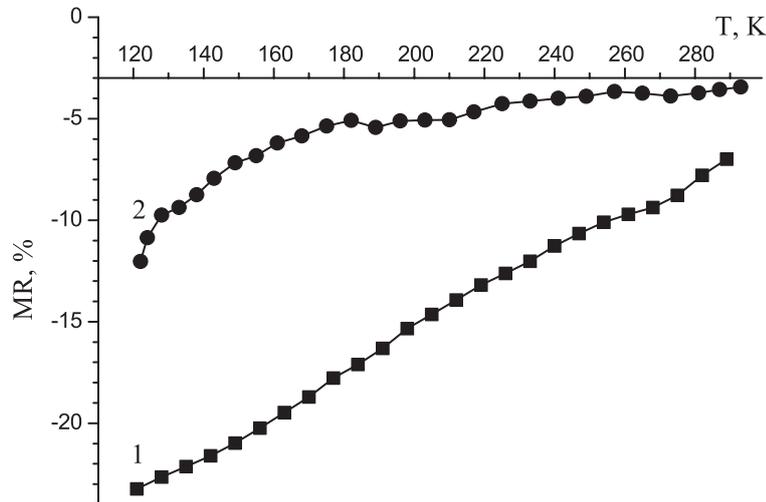


Рис. 3. Температурные зависимости магнитосопротивления отожженных образцов:
1 — $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$; 2 — $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$

Как обычно, $|\text{MR}|$ имеет тенденцию к увеличению при понижении температуры, что обусловлено туннелированием спин-поляризованных электронов через границы зерен [2]. Величина $|\text{MR}|$ достигает 23 % при температуре 120 К.

Выводы

1. Синтезированы керамические образцы перовскитоподобных манганитов $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$. Первый состав имеет ромбоэдрическую кристаллическую структуру, второй и третий — орторомбическую. Все образцы содержат примесь

SrV_2O_5 , количество которой возрастает с увеличением содержания стронция и ванадия от десятых долей до 2,5 масс. %.

2. По мере увеличения содержания стронция и ванадия удельная намагниченность при 80 К снижается от 71,8 до 49,2 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, температура Кюри повышается от 326 К до 340 К. Имеет место уширение температурного интервала перехода «ферромагнетик–парамагнетик», свидетельствующее о возрастании неоднородности образцов.

3. Манганиты первых двух составов обладают металлическим характером проводимости в интервале температур 120–300 К. Манганит с наиболее высоким содержанием строн-

ция и ванадия ($\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{Mn}_{0.90}\text{V}_{0.10}\text{O}_3$) проявляет свойства полупроводника.

4. Магнитное поле уменьшает величину сопротивления, причем эффект возрастает с понижением температуры. Максимальной абсолютной величиной магнитосопротивления (23%) при температуре 120 К обладает образец манганита $\text{La}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{Mn}_{0.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_3$.

5. Полученные результаты объясняются изменениями концентраций разновалентных ионов марганца и соотношения конкурирующих обменных взаимодействий, формированием ферромагнитных кластеров и возможным нарушением режима перколяции между ними, влиянием выделений второй фазы и локализацией на межкристаллитных границах катионных вакансий.

Литература

1. *Bebenin N.G., Zainullina R.I., Ustinov V.V.* Colossal magnetoresistance manganites // *Physics-Uspekhi*. 2018. Vol. 61. No. 8. P. 719–738. DOI: 10.3367/UFNe.2017.07.038180
2. *Dagotto E., Hotta T., Moreo A.* Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation // *Physics reports*. 2001. Vol. 344. P. 1–153. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00121-6
3. *Koroleva L., Batashev I., Morozov A., Balbashov A., Szymczak H., Slavskaya-Wanniewska A.* Connection of thermopower, magnetothermopower with resistivity and magnetoresistance in manganites with Nd and Sm // *EPJ Web of Conferences*. 2018. Vol. 185. P. 06014 (2 pp). DOI: 10.1051/epjconf/201818506014
4. *Jacobs R., Booske J., Morgan D.* Understanding and controlling the work function of perovskite oxides using density functional theory // *Advanced Functional Materials*. 2016. Vol. 26. No. 30, P. 5471–5482. DOI: 10.1002/adfm.201600243
5. *Abdel-Latif I.A.* Rare earth manganites and their applications // *Journal of Physics*. 2012. Vol. 1. No. 3. P. 15–31.
6. *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) // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2007. Vol. 104. No. 1. P. 76–86.
7. *Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Derzhavin I.M., Merkulov D.I.* Systems of manganites with enhanced electromagnetic parameters // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. No. 5. P. 807–812. DOI: 10.1134/S2075113318020132
8. *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 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 200. P. 052026 (5 pp).
9. *Volkov N.V.* Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures // *Physics-Uspekhi*. 2012. Vol. 55. No. 3. P. 250–269.
10. *Shlapa Y., Kulyk M., Kalita V., Polek T., Tovstolytkin A., Greneche J.-M., Solopan S., Belous A.* Iron-doped (La,Sr)MnO₃ manganites as promising mediators of self-controlled magnetic nanohyperthermia // *Nanoscale Research Letters*. 2016. Vol. 11. P. 24 (8 pp.). DOI: 10.1186/s11671-015-1223-6
11. *Карпасюк В.К., Баделин А.Г.* Структура и магнитные характеристики лантано-стронциевых манганитов с замещением марганца разновалентными ионами. Монография. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2016. 92 с.
12. *Estemirova S.Kh., Mitrofanov V.Ya., Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Uporov S.A., Kozhina G.A.* Effect of Cr doping on the structural magnetic and transport properties of perovskite-like manganites // *Solid State Sciences*. 2020. Vol. 108. 106433 (7 p.). DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2020.106433
13. *Liu M.F., Du Z.Z., Xie Y.L., Li X., Yan Z.B., Liu J.-M.* Unusual ferromagnetism enhancement in ferromagnetically optimal manganite $\text{La}_{0.7-y}\text{Ca}_{0.3+y}\text{Mn}_{1-y}\text{Ru}_y\text{O}_3$ ($0 \leq y < 0.3$): the role of Mn-Ru t_{2g} superexchange // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 9922:1–9. DOI: 10.1038/srep09922
14. *Теплых А.Е., Пирогов А.Н., Меньшиков А.З., Базуев Г.В.* Кристаллическая структура и магнитное состояние перовскитов $\text{LaMn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_3$ // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42. Вып. 12. С. 2175–2182.
15. *Троянчук И.О., Ефимов Д.А., Халявин Д.Д., Пушкарев Н.В., Шимчак Р.* Магнитное упорядочение и магниторезистивный эффект в перовскитах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{1-y}\text{Me}_y)\text{O}_3$ (Me = Nb, Mg) // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42. Вып. 1. С. 81–85.
16. *Троянчук И.О., Мантыцкая О.С., Чобот А.Н., Шимчак Г.* Переход из антиферромагнитного состояния в ферромагнитное в системах LaMnO_{3+y} и $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{1-x/2}\text{Nb}_{x/2})\text{O}_3$ // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2002. Т. 122. Вып. 2(8). С. 347–355.
17. *Badelin A., Datskaya Z., Epifanova I., Estemirova S., Karpasyuk V., Smirnov A.* Structural and electromagnetic characteristics of perovskites in $\text{La}_{1-c-x}\text{Sr}_{c+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Me}_x^{4+}\text{O}_3$ systems (Me=Ge, Ti) // *EPJ Web of Conferences*. 2013. Vol. 40. P. 15004 (4 p.). DOI: 10.1051/epjconf/20134015004

18. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Crystallographica A*. 1976. Vol. 32, P. 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551
19. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Merkulov D.I., Derzhavin I.M., Estemirova S.Kh. Unusual properties and features of oxygen nonstoichiometry of La-Sr manganites with manganese replacement by a combination of nickel and germanium // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1347. No. 1. P. 012036 (7 p.). DOI: 10.1088/1742-6596/1347/1/012036
20. Shlapa, Y., Kulyk, M., Kalita, V., Polek, T., Tovstolytkin, A., Greneche, J.-M., Solopan, S., Belous, A. Iron-doped (La,Sr)MnO₃ manganites as promising mediators of self-controlled magnetic nanohyperthermia. *Nanoscale Research Letters*, 2016, vol. 11, pp. 24 (8 pp.). DOI: 10.1186/s11671-015-1223-6
21. Karpasyuk, V.K., Badelin, A.G. *Struktura i magnitnyye kharakteristiki lantan-strontsiyevykh manganitov s zameshcheniyem margantsa raznovalentnymi ionami. Monografiya*. [Structure and magnetic characteristics of lanthanum-strontium manganites with replacement of manganese by ions of different valence. Monograph]. Astrakhan: Sorokin R.V. Publ., 2016. 92 p.
22. Estemirova, S.Kh., Mitrofanov, V.Ya., Karpasyuk, V.K., Badelin, A.G., Uporov, S.A., Kozhina, G.A. Effect of Cr doping on the structural magnetic and transport properties of perovskite-like manganites. *Solid State Sciences*, 2020, vol. 108, 106433 (7 p.). DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2020.106433
23. Liu, M.F., Du, Z.Z., Xie, Y.L., Li, X., Yan, Z.B., Liu, J.-M. Unusual ferromagnetism enhancement in ferromagnetically optimal manganite La_{0.7-y}Ca_{0.3+y}Mn_{1-y}Ru_yO₃ (0 ≤ y < 0.3): the role of Mn-Ru t_{2g} super-exchange. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, pp. 9922:1–9. DOI: 10.1038/srep09922
24. Teplykh A.E., Pirogov A.N., Menshikov A.Z., Bazuev G.V. Kristallicheskaya struktura i magnitnoye sostoyaniye perovskitov LaMn_{1-x}V_xO₃ [Crystal structure and magnetic state of LaMn_{1-x}V_xO₃ perovskites]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], 2000, vol. 42, iss. 12. pp. 2175–2182.
25. Troyanchuk, I.O., Efimov, D.A., Khalyavin, D.D., Pushkarev, N.V., Shimchak, R. Magnitnoye uporyadocheniye i magnitnoezistivnyy effekt v perovskitakh La_{1-x}Sr_x(Mn_{1-y}Me_y)O₃ (Me = Nb, Mg) [Magnetic ordering and magnetoresistive effect in perovskites La_{1-x}Sr_x(Mn_{1-y}Me_y)O₃ (Me = Nb, Mg)]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], 2000, vol. 42, iss. 1, pp. 81–85.
26. Troyanchuk, I.O., Mantytskaya, O.S., Chobot, A.N., Shimchak, G. Perekhod iz antiferromagnitnogo sostoyaniya v ferromagnitnoye v sistemakh LaMnO_{3+y} i La_{1-x}Sr_x(Mn_{1-x/2}Nb_{x/2})O₃. [Transition from the antiferromagnetic state to the ferromagnetic state in the LaMnO_{3+y} and La_{1-x}Sr_x(Mn_{1-x/2}Nb_{x/2})O₃]. *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2002, vol. 122, iss. 2(8), pp. 347–355.
27. Badelin, A., Datskaya, Z., Epifanova, I., Estemirova, S., Karpasyuk, V., Smirnov, A. Structural and electromagnetic characteristics of per-

References

1. Bebenin, N.G., Zainullina, R.I., Ustinov, V.V. Colossal magnetoresistance manganites. *Physics-Uspekhi*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 719–738. DOI: 10.3367/UFNe.2017.07.038180
2. Dagotto, E., Hotta, T., Moreo, A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation. *Physics reports*, 2001, vol. 344, pp. 1–153. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00121-6
3. Koroleva, L., Batashev, I., Morozov, A., Balbashov, A., Szymczak, H., Slavskaja-Wanniewska, A. Connection of thermopower, magnetothermopower with resistivity and magnetoresistance in manganites with Nd and Sm. *EPJ Web of Conferences*, 2018, vol. 185, pp. 06014 (2 p.) DOI: 10.1051/epjconf/201818506014
4. Jacobs, R., Booske, J., Morgan, D. Understanding and controlling the work function of perovskite oxides using density functional theory. *Advanced Functional Materials*, 2016, vol. 26, no. 30, pp. 5471–5482. DOI: 10.1002/adfm.201600243
5. Abdel-Latif, I.A. Rare earth manganites and their applications. *Journal of Physics*, 2012, vol. 1, no.3, pp. 15–31.
6. 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 La_{1-x}A_yMnO₃ (A=Ca, Ag, Ba, Sr). *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2007, vol. 104, no. 1, pp. 76–86.
7. Karpasyuk, V.K., Badelin, A.G., Derzhavin, I.M., Merkulov, D.I. Systems of manganites with enhanced electromagnetic parameters. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 807–812. DOI: 10.1134/S2075113318020132
8. 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. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 200, pp. 052026 (4 p.).
9. Volkov, N.V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures. *Physics-Uspekhi*,

- ovskites in $\text{La}_{1-c-x}\text{Sr}_{c+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Me}_x^{4+}\text{O}_3$ systems (Me=Ge, Ti). *EPJ Web of Conferences*, 2013, vol. 40, pp. 15004 (4 p.). DOI: 10.1051/epj-conf/20134015004
18. Shannon, R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica A*, 1976, vol. 32, pp. 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551
19. Karpasyuk, V.K., Badelin, A.G., Merkulov, D.I., Derzhavin, I.M., Estemirova, S.Kh. Unusual properties and features of oxygen nonstoichiometry of La-Sr manganites with manganese replacement by a combination of nickel and germanium. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1347, no. 1, pp. 012036 (7 p.). DOI: 10.1088/1742-6596/1347/1/012036

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2020

© Датская З. Р., Корнеева Е. А., Баделин А. Г., Карпасюк В. К., Эстемирова С. Х., 2020

Статья поступила 19 ноября 2020 г.