

## Влияние окружения ионов марганца в октаэдрической подрешетке манганитов $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_{3+\gamma}$ на их свойства

В. К. Карпасюк, А. Г. Баделин, Э. Р. Датская, Р. М. Еремина,  
Д. И. Меркулов, С. Х. Эстемирова, М. А. Алджанов, Э. Ю. Сеидов

Представлены структурные, магнитные и электрические характеристики манганитов системы  $\text{La}^{3+}_{0,7}\text{Sr}^{2+}_{0,3}\text{Mn}^{3+}_{0,6-x-2\gamma}\text{Mn}^{4+}_{0,3+x+2\gamma}\text{Fe}^{3+}_{0,1-x}\text{Mg}^{2+}_x\text{O}^{2-}_{3+\gamma}$  ( $0 \leq x \leq 0,1$ ), синтезированных методом твердофазных реакций. Спекание было выполнено на воздухе при 1423 К. Образцы со стехиометрическим содержанием кислорода ( $\gamma = 0$ ) были получены в результате отжига при 1223 К и парциальном давлении кислорода 0,1 Па. Все исследованные манганиты имеют ромбоэдрическую структуру. С увеличением содержания магния объем элементарной ячейки уменьшается, причем у отожженных образцов объем ячейки больше, чем у исходных (спеченных) манганитов, содержащих сверхстехиометрический кислород. Отношение параметров решетки  $c/a$  практически не изменяется. Точка Кюри при повышении содержания магния в целом понижается, демонстрируя в области  $0,025 < x < 0,075$  слабо выраженное плато. Намагниченность и температура перехода “металл – полупроводник” имеют максимальные значения при  $x = 0$ , далее изменяются немонотонно, а при  $x > 0,075$  резко спадают. Манганит, содержащий наибольшее количество магния, имеет самое высокое сопротивление при температурах ниже 180 К и характеризуется наибольшей шириной температурного интервала перехода “ферромагнетик – парамагнетик”, что свидетельствует о существовании магнитных неоднородностей. Электромагнитные параметры исходных и отожженных образцов отличаются незначительно. Рассмотрен ряд эффектов и конкурирующих факторов, определяющих сложные зависимости электромагнитных характеристик манганитов данной системы от состава: неоднородное распределение ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ ; повышение концентрации ионов  $\text{Mn}^{4+}$  и их экранирование ионами магния; нарушение двойного обменного взаимодействия между  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Mn}^{3+}$  замещающими марганец ионами; отличие спиновых магнитных моментов последних; изменения характеристик магнитных неоднородностей.

**Ключевые слова:** манганиты, магний, железо, элементарная ячейка, намагниченность, точка Кюри, переход металл-полупроводник, неоднородности.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-8-29-38

### Введение

Объекты настоящего исследования — манганиты с перовскитоподобной структурой — относятся к классу сильно коррелированных систем и характеризуются сильной взаимосвязью магнитных и электрических свойств [1–3]. Колоссальное магнитосопротивление и высокая степень спиновой поляризации электронов проводимости, проявляющиеся в манганитах, делают их перспек-

тивными материалами для спинтроники и датчиков магнитного поля [4, 5]. Кроме того, манганиты могут обладать гигантской магнитоотрицательностью [5, 6], фазовым переходом “металл – полупроводник” [2, 3], вольтамперными характеристиками с отрицательным дифференциальным сопротивлением [7, 8], что расширяет возможности их применения, например, в магнитоотрицательных преобразователях, переключателях, генераторах колебаний и других электронных устройствах.

В то же время, следует отметить, что высокие рабочие параметры могут быть достигнуты только у манганитов сложного состава, которые обычно разрабатывают на основе La – Sr системы с различными замещениями марганца, что связано с решением ряда материаловедческих и физико-химических проблем [5, 9].

Как известно [2, 9], в структуре рассматриваемых манганитов ионы марганца и его заместители с достаточно малым ионным радиусом (не более 0,8 Å) занимают позиции внутри кислородных октаэдров (координационное число КЧ = 6), а крупные катионы  $\text{La}^{3+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$  размещаются в центрах кубооктаэдров (КЧ = 12).

Согласно современным представлениям [1 – 3, 10, 11], взаимосвязанные магнитные и электрические характеристики замещенных лантан-стронциевых манганитов определяются, главным образом, двойным обменным взаимодействием, вероятностью переноса  $e_g$ -электронов между соседними гетеровалентными ионами  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  и концентрацией носителей заряда. На механизмы формирования свойств манганитов оказывают влияние зарядовое состояние, электронная конфигурация и размерное несоответствие замещающих марганец катионов [9, 12, 13], а также дефекты нестехиометрии [14 – 16] и конкурирующие косвенные обменные взаимодействия [2, 17]. Указанные факторы определяют взаимодействие допирующих ионов с окружением в кристаллической решетке и их локализацию [9, 12, 18, 19]. С увеличением среднего радиуса катионов в октаэдрической подрешетке возрастает тенденция к локализации заряда и снижению подвижности носителей [2, 9].

В ряде работ [13, 20 – 27] было изучено замещение марганца железом в La – Sr и La – Ca манганитах. Установлено [13, 25, 26], что железо находится в трехвалентном состоянии, причем ионы  $\text{Fe}^{3+}$  не участвуют в двойном обменном взаимодействии [20 – 23, 25], нарушая при этом часть обменных связей  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Mn}^{4+}$ . В результате ферромагнитные параметры (точка Кюри  $T_c$ , намагниченность насыщения), температура перехода “металл – полупроводник”  $T_{ms}$  и проводимость манганитов снижаются [20, 23 – 25, 27].

Разбавление подрешетки ионов марганца замещающими двухвалентными ионами ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) [9, 28] также приводит к понижению  $T_c$ ,  $T_{ms}$  и к сдвигу границы концентрационного фазового перехода “металл – полупроводник” в сторону более высоких значений концентрации ионов  $\text{Mn}^{4+}$  по сравнению с фазовой диаграммой базовой системы  $\text{La}^{3+}_{1-c}\text{Sr}^{2+}_c\text{Mn}^{3+}_{1-c}\text{Mn}^{4+}_c\text{O}_3$  [1 – 3], причем

наибольшее смещение вызывает  $\text{Mg}^{2+}$ , что обусловлено различием не только ионных радиусов, но и электронных конфигураций ионов.

Рассмотрение совместного влияния разновалентных ионов с различным строением электронных оболочек —  $\text{Fe}^{3+}(3d^5)$  и  $\text{Mg}^{2+}(2p^6)$ , окружающих ионы  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  в октаэдрической подрешетке, на структурные и электромагнитные характеристики манганитов представляет интерес с точки зрения процессов зарядовой компенсации, пространственного распределения заряда и межионных взаимодействий. В базовой системе манганит с содержанием стронция  $c = 0,3$  обладает ромбоэдрической структурой и характеризуется высокими значениями температуры Кюри, намагниченности и металлическим типом проводимости [2, 3].

Цель данной работы — исследование лантан-стронциевых манганитов с замещением железа магнием в системе  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_{3+\gamma}$ .

### Материалы и методика эксперимента

Образцы манганитов с содержанием магния  $x = 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,100$  были синтезированы методом твердофазных реакций на воздухе с использованием в качестве исходных веществ: карбоната стронция ( $\text{SrCO}_3$ ), оксидов лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), марганца ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и магния ( $\text{MgO}$ ). Необходимые количества реагентов были смешаны в стехиометрических пропорциях и измельчены в шаровой мельнице с добавлением этилового спирта в течение 4 ч. Далее последовали операции брикетирования, предварительного обжига (1223 К, 4 ч), основного помола в течение 10 ч, введения связующего (10 % водного раствора поливинилового спирта), гранулирования, прессования образцов в виде таблеток и выжигания связующего. Заключительная операция спекания была выполнена при 1423 К в течение 12 ч с последующим охлаждением образцов в печи.

Для получения манганитов со стехиометрическим содержанием кислорода спеченные образцы были отожжены при 1223 К и парциальном давлении кислорода в газовой фазе  $P_{\text{O}_2} = 10^{-1}$  Па в течение 96 ч. Такой прием основан на данных работы [14] и был использован в [12, 16, 28].

Фазовый состав и параметры элементарной ячейки манганитов определяли по порошковым дифрактограммам, снятым в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Обработка дифрактометрических данных выполнена методом Ритвельда с помощью программного комплекса GSAS.

Удельную намагниченность ( $\sigma$ ) измеряли баллистическим методом в постоянном магнитном поле 5,6 кЭ при температуре 80 К. Измерения температурной зависимости магнитной проницаемости ( $\mu(T)$ ) были выполнены на частоте 99,9 кГц, точку Кюри ( $T_c$ ) определяли как температуру, соответствующую максимуму  $|\mu'(T)|$ , где  $\mu'(T) = d\mu(T)/dT$ . Зависимости электрического сопротивления от температуры ( $R(T)$ ) были получены с использованием контактов из самотвердеющей металлорганической смеси, содержащей 99 масс. % серебра. Температура перехода “металл – полупроводник” ( $T_{ms}$ ) была определена по положению пика зависимости  $R(T)$ , соответствующего переходу от металлического типа проводимости к полупроводниковому [1, 9], поскольку при более низких температурах производная  $dR/dT$  положительна, что характерно для металлов, а при более высоких — наблюдается типичная для полупроводников зависимость с  $dR/dT < 0$ .

**Результаты и обсуждение**

Структурные параметры спеченных и отожженных образцов манганитов, имеющих ромбоэдрическую структуру (пространственная группа  $R\bar{3}c$ ), представлены в табл. 1. Объем элементарной ячейки ( $V$ ) с повышением количества магния, замещающего железо, уменьшается. Это обусловлено возрастанием содержания ионов  $Mn^{4+}$  (ионный радиус  $r(Mn^{4+}) = 0,53 \text{ \AA}$ ) за счет уменьшения концентрации  $Mn^{3+}$  ( $r(Mn^{3+}) = 0,645 \text{ \AA}$ ) в соответствии с формулой  $La_{0,7}Sr_{0,3}Mn_{0,9}Fe_{0,1-x}Mg_xO_{3+\gamma}$  отражающей механизмы зарядовой компенсации. При этом следует учесть, что радиусы ионов  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  (0,72  $\text{\AA}$  и 0,645  $\text{\AA}$ , соответственно) отличаются на

существенно меньшую величину по сравнению с радиусами ионов  $Mn^{3+}$  и  $Mn^{4+}$  (0,075  $\text{\AA}$  и 0,115  $\text{\AA}$ ) [29]. У отожженных (стехиометрических) образцов объем элементарной ячейки больше, чем у исходных (спеченных) манганитов, содержащих сверхстехиометрический кислород, поскольку снижение содержания кислорода вызывает переход  $Mn^{4+} \rightarrow Mn^{3+}$ .

Отношение параметров решетки  $c/a$ , определяющее соотношение между конкурирующими ферромагнитным и антиферромагнитным взаимодействиями [17], имеет слабую тенденцию к увеличению с повышением содержания магния и не изменяется после отжига.

На рис. 1 приведены зависимости удельной намагниченности, точки Кюри и температуры перехода “металл – полупроводник” исследуемых манганитов от содержания магния. Значения  $T_c$  и  $T_{ms}$  были определены по температурным зависимостям  $d\mu(T)/dT$  и сопротивления  $R(T)$  манганитов, показанным на рис. 2 и 3 для стехиометрических манганитов. Указанные электромагнитные параметры исходных и отожженных образцов отличаются незначительно, практически в пределах погрешностей измерения (рис. 1).

Приведенные данные показывают, что при увеличении содержания магния точка Кюри снижается

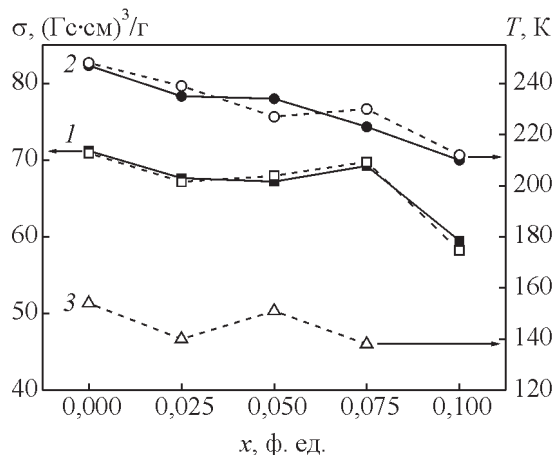


Рис. 1. Концентрационные зависимости удельной намагниченности ( $\sigma$ ), точки Кюри ( $T_c$ ), температуры перехода “металл – полупроводник” ( $T_{ms}$ ) исходных (черные символы) и отожженных (светлые символы) образцов манганитов  $La_{0,7}Sr_{0,3}Mn_{0,9}Fe_{0,1-x}Mg_xO_{3+\gamma}$ : 1 —  $\sigma$ ; 2 —  $T_c$ ; 3 —  $T_{ms}$ . При  $x = 0,100$  температура  $T_{ms} < 100$  К.

Fig. 1. Concentration dependences of specific magnetization ( $\sigma$ ), Curie point ( $T_c$ ), metal-semiconductor transition temperature ( $T_{ms}$ ) of initial (black symbols) and annealed (light symbols) samples of  $La_{0,7}Sr_{0,3}Mn_{0,9}Fe_{0,1-x}Mg_xO_{3+\gamma}$  manganites: 1 —  $\sigma$ ; 2 —  $T_c$ ; 3 —  $T_{ms}$ . At  $x = 0,100$  the temperature  $T_{ms} < 100$  K.

Таблица 1  
Параметры кристаллической структуры синтезированных образцов манганитов системы

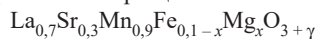


Table 1

Parameters of crystal structure of synthesized samples of manganites in  $La_{0,7}Sr_{0,3}Mn_{0,9}Fe_{0,1-x}Mg_xO_{3+\gamma}$  system

X	Спеченные образцы		Отожженные образцы	
	$V, \text{\AA}^3$	$c/a$	$V, \text{\AA}^3$	$c/a$
0,000	350,558(9)	2,424	350,761(8)	2,424
0,025	350,396(8)	2,424	350,688(7)	2,424
0,050	350,302(2)	2,425	350,660(9)	2,424
0,075	350,164(7)	2,425	350,230(7)	2,425
0,100	349,493(4)	2,426	349,564(4)	2,426

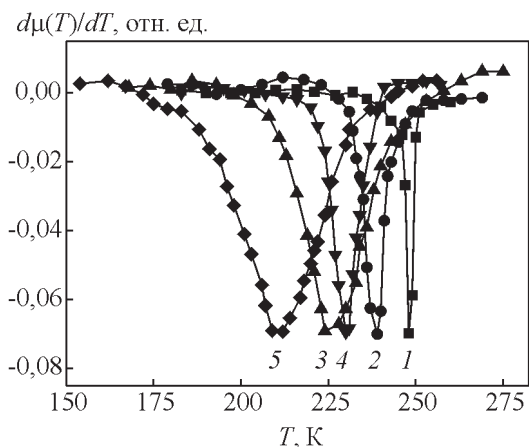


Рис. 2. Температурные зависимости производной  $\mu'(T) = d\mu(T)/dT$  отожженных манганитов  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_3$ : 1 —  $x = 0,000$ ; 2 —  $x = 0,025$ ; 3 —  $x = 0,050$ ; 4 —  $x = 0,075$ ; 5 —  $x = 0,100$ .

Fig. 2. Temperature dependences of the derivative  $d\mu(T)/dT$  of annealed  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_3$  manganites: 1 —  $x = 0,000$ ; 2 —  $x = 0,025$ ; 3 —  $x = 0,050$ ; 4 —  $x = 0,075$ ; 5 —  $x = 0,100$ .

ся с существованием нечетко выраженного плато в области  $0,025 < x < 0,075$ , а намагниченность  $\sigma$  и температура перехода “металл – полупроводник”  $T_{ms}$  сначала несколько уменьшаются, затем возрастают, а при  $x > 0,075$  следует резкий спад. Максимальными значениями этих параметров обладает манганит с  $x = 0$ , то есть с максимальным содержанием железа. В то же время, наиболее высокое сопротивление при температурах ниже 180 К имеет манганит, содержащий максимальное количество магния (рис. 3). Этот же манганит отличается наибольшей шириной температурного интервала перехода “ферромагнетик – парамагнетик” (рис. 2), что свидетельствует о существовании магнитных неоднородностей, возникновение которых может быть связано с неоднородным распределением ионов магния и формированием структурных неоднородностей, ферромагнитных или парамагнитных кластеров [9, 12, 16, 21, 23, 25, 27].

Немонотонная зависимость электромагнитных параметров рассматриваемых манганитов от содержания магния не коррелирует с монотонным уменьшением объема элементарной ячейки и практически не изменяющимся отношением параметров решетки  $c/a$ .

Интерпретация полученных экспериментальных данных может быть дана на основе следующих представлений, позволяющих объяснить свойства манганитов, изученных в [12, 27, 28].

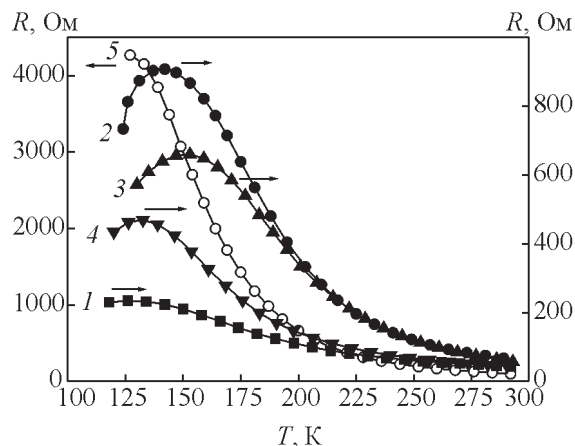


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления отожженных манганитов  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_3$ : 1 —  $x = 0,000$ ; 2 —  $x = 0,025$ ; 3 —  $x = 0,050$ ; 4 —  $x = 0,075$ ; 5 —  $x = 0,100$ .

Fig. 3. Temperature dependences of the resistance of annealed  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_3$  manganites: 1 —  $x = 0,000$ ; 2 —  $x = 0,025$ ; 3 —  $x = 0,050$ ; 4 —  $x = 0,075$ ; 5 —  $x = 0,100$ .

Замещение марганца двухвалентным катионом  $\text{Mg}^{2+}$  приводит к повышению концентрации  $\text{Mn}^{4+}$  и, соответственно, потенциально возможному увеличению количества пар  $\text{Mn}^{3+} - \text{Mn}^{4+}$ , связанных двойным обменным взаимодействием, что должно приводить к возрастанию намагниченности, повышению  $T_c$  и проводимости. С другой стороны, благодаря кулоновскому взаимодействию, в манганите формируются кластеры, обогащенные парами разновалентных катионов, в результате ионы  $\text{Mg}^{2+}$  экранируют  $\text{Mn}^{4+}$ , нарушая их обменную связь с ионами  $\text{Mn}^{3+}$  и снижая, тем самым, вероятность переноса заряда и ферромагнитные характеристики. Аналогичный эффект оказывают ионы  $\text{Fe}^{3+}$ , однако они имеют такой же заряд и радиус, как  $\text{Mn}^{3+}$ , поэтому распределяются более равномерно среди ионов марганца, а их количество с ростом  $x$  уменьшается, вследствие чего влияние этого эффекта снижается. Следует также учесть различие конфигурации электронных оболочек ионов  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , определяющих их взаимодействие с окружением в решетке: между  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{3+}$  или  $\text{Mn}^{4+}$  может возникать антиферромагнитное сверхобменное взаимодействие [20, 21], а ион магния является диамагнитным.

Под влиянием перечисленных конкурирующих факторов и формируются немонотонные концентрационные зависимости магнитных и электрических параметров изученных манганитов.

Отметим, что полученные в настоящей работе значения электромагнитных параметров Mg-содержащих манганитов ниже, чем параметры манганитов аналогичных составов, содержащих вместо магния цинк [27], хотя ионные радиусы соотносятся следующим образом:  $r(\text{Mg}^{2+}) < r(\text{Zn}^{2+})$ . Это согласуется с общим заключением, сделанным по данным для других систем [9, 12], что манганиты с  $2p^6$  и  $3p^6$ -заместителями марганца имеют более низкие параметры, чем с  $3d$ -заместителями.

## Выводы

Манганиты системы  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Mn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1-x}\text{Mg}_x\text{O}_{3+\gamma}$  ( $0 \leq x \leq 0,1, \gamma \geq 0$ ) имеют ромбоэдрическую кристаллическую структуру, объем элементарной ячейки которой уменьшается с повышением содержания магния. Это обусловлено увеличением концентрации  $\text{Mn}^{4+}$  за счет содержания  $\text{Mn}^{3+}$ . Отношение параметров решетки  $c/a$  практически не изменяется. У отожженных (стехиометрических) образцов объем элементарной ячейки больше, чем у исходных (спеченных) манганитов, содержащих сверхстехиометрический кислород, поскольку восстановительный отжиг вызывает переход  $\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{3+}$ .

С увеличением содержания магния температура Кюри снижается, а намагниченность и температура перехода “металл – полупроводник” изменяются немонотонно с резким спадом значений при  $x > 0,075$ . Максимальными значениями этих параметров обладает манганит с содержанием железа 0,1 ф.е. Манганит, содержащий максимальное количество магния, имеет самое высокое сопротивление при температурах ниже 180 К и характеризуется наибольшей шириной температурного интервала перехода “ферромагнетик – парамагнетик”, что свидетельствует о существовании магнитных неоднородностей. Электромагнитные параметры исходных и отожженных образцов отличаются незначительно.

Зависимости магнитных и электрических характеристик манганитов изученной системы от состава объясняются следующими эффектами:

— в целом, спад  $\sigma$ ,  $T_c$ ,  $T_{ms}$  и проводимости образцов с повышением содержания магния обусловлен нарушением двойного обменного взаимодействия между  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Mn}^{3+}$  ионами  $\text{Mg}^{2+}$ , экранирующими ионы  $\text{Mn}^{4+}$ , а также влиянием магнитных и структурных неоднородностей, служащих центрами рассеяния носителей заряда;

— возникновение локальных максимумов ферромагнитных характеристик и температуры перехода “металл – полупроводник” связано с воз-

растанием количества пар  $\text{Mn}^{3+} - \text{Mn}^{4+}$ , связанных двойным обменным взаимодействием, благодаря индуцируемому ионами  $\text{Mg}^{2+}$  увеличению концентрации ионов  $\text{Mn}^{4+}$ , уменьшению содержания железа, нарушающего связи  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Mn}^{4+}$  и вступающего в антиферромагнитное взаимодействие с ионами  $\text{Mn}^{3+}$  или  $\text{Mn}^{4+}$ .

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-52-06011.*

## Литература

1. Нагаев Э.Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением. Успехи физических наук, 1996, № 166, с. 833 – 858. DOI: 10.3367/UFNr.0166.199608b.0833.
2. Dagotto E., Hotta T., Moreo A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation. Physics reports, 2001, v. 344, pp. 1 – 153. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(00\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(00)00121-6).
3. Urushibara A., Moritomo Y., Arima T., Asamitsu A., Kido G., Tokura Y. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . Physical Review B, 1995, V. 51, no. 20, pp. 14103 – 14109. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.14103>.
4. Волков Н.В. Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов. Успехи физических наук, 2012, № 182, с. 263 – 285. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203b.0263.
5. Карпасюк В.К., Баделин А.Г., Державин И.М., Меркулов Д.И. Системы манганитов с повышенными электромагнитными параметрами. Перспективные материалы, 2018, № 4, с. 5 – 13. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-4-5-13.
6. Королева Л.И., Демин Р.В., Козлов А.В., Защиринская Д.М., Муковский Я.М. Связь гигантской объемной магнитострикции с колоссальным магнитосопротивлением и размягчением кристаллической решетки в манганитах  $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  (A = Ca, Ag, Ba, Sr). Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2007, т. 131, № 1, с. 85 – 96.
7. 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, v. 200, pp. 052026 – 052029, DOI: 10.1088/1742-6596/200/5/052026.
8. Belogolovskii M.A. Interface resistive switching effects in bulk manganites. Central European Journal of Physics, 2009, v. 7, no. 2, pp. 304 – 309. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0026-8>.
9. Карпасюк В.К., Баделин А.Г. Структура и магнитные характеристики лантан-стронциевых манганитов с замещением марганца разновалентными ионами. Монография. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2016, 92 с.



- Zener C. Interaction between the d-shells in the transition metals. II. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure. *Physical Review*, 1951, v. 82, no. 3, pp. 403 – 405. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.82.403>.
- Бибенин Н.Г., Зайнуллина Р.И., Устинов В.В. Манганиты с колоссальным магнетосопротивлением. *Успехи физических наук*, 2018, № 188, с. 801 – 820. DOI: [10.3367/UFN.2017.07.038180](https://doi.org/10.3367/UFN.2017.07.038180).
- 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. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, v. 10, no. 21, pp. 42746 – 42749.
- V'yunov O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I., Yanchevskii O.Z. (LaSr)(Mn,Me)O<sub>3</sub> manganites doped with d metals: Study of charge compensation mechanisms by crystallographic and magnetic characterizations. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, v. 27, no. 13 – 15, pp. 3919 – 3322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.063>.
- Mizusaki J., Mori N., Takai H., Yonemura Y., Minamiue H., Tagawa H., Dokiya M., Inaba H., Naraya K., Sasamoto T., Hashimoto T. Oxygen nonstoichiometry and defect equilibrium in the perovskite-type oxides La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3+d</sub>. *Solid State Ionics*, 2000, v. 129, pp. 163 – 177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(99\)00323-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(99)00323-9).
- Мусаева З.Р., Баделин А.Г., Смирнов А.М., Карпасюк В.К., Пономарев В.И., Щепеткин А.А. Влияние содержания кислорода и дефектов нестехиометрии на фазовые превращения в манганитах системы La<sub>0,65</sub>Sr<sub>0,35</sub>Mn<sub>1-x-y</sub>Ni<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>3+y</sub>. *Известия РАН. Серия физическая*, 2010, № 10, с. 1523 – 1525.
- Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Derzhavin I.M., Merkulov D.I., Pankratov A.A. Nonstoichiometry defects and microinhomogeneities in multicomponent manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, v. 476, pp. 371 – 375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.070>.
- Балагуров А.М., Бобриков И.А., Помякушин В.Ю., Шепяков Д.В., Бабушкина Н.А., Горбенко О.Ю., Картавцева М.С., Кауль А.Р. Магнито-структурное фазовое расслоение и гигантский изотопический эффект в R<sub>0,5</sub>Sr<sub>0,5</sub>MnO<sub>3</sub>. *Письма в ЖЭТФ*, 2005, вып. 82, № 9, pp. 672 – 677.
- Malavasi L., Ritter C., Mozzati M.C., Tealdi C., Islam M.S., Azzoni C.B., Flor G. Effects of cation vacancy distribution in doped LaMnO<sub>3+δ</sub> perovskites. *Journal of Solid State Chemistry*, 2005, v. 178, pp. 2042 – 2049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2005.04.019>.
- Estemirova S.Kh., Mitrofanov V.Ya., Uporov S.A., Gulyaeva R.I. Effect of cation substitution on structural, magnetic and magnetocaloric properties of (La<sub>0,7</sub>Eu<sub>0,3</sub>)<sub>0,75</sub>Sr<sub>0,25</sub>Mn<sub>0,9</sub>(Me)<sub>0,1</sub>O<sub>3</sub> (Me = Co, Ti). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, v. 502, 166593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166593>.
- Ahn K.H., Wu X.W., Liu K., Chien C.L. Magnetic properties and colossal magnetoresistance of La(Ca)MnO<sub>3</sub> materials doped with Fe. *Physical Review B*, 1996, v. 54, no. 21, pp. 15299 – 15302. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.15299>.
- Cai J.-W., Wang C., Shen B.-G., Zhao J.-G., Zhan W.-S. Colossal magnetoresistance of spin-glass perovskite La<sub>0,67</sub>Ca<sub>0,33</sub>Mn<sub>0,9</sub>F<sub>0,1</sub>O<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 1997, v. 71, no. 12, pp. 1727 – 1729. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.120017>.
- Li Y.-D., Zhang J.-H., Xiong C.-S., Liao H.-W. Ferromagnetism and magnetoresistance in La<sub>0,67</sub>Sr<sub>0,33</sub>Fe<sub>0,07</sub>Mn<sub>0,93</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, v. 83, no. 4, pp. 980 – 982. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01311.x>.
- Yanchevskii O.Z., V'yunov O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I. Crystallographic, electrical, and magnetic properties of the system La<sub>0,7</sub>Sr<sub>0,3</sub>Mn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>3</sub>. *Low temperature physics*, 2006, v. 32, no. 2, pp. 134 – 138. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2171513>.
- Ajan A., Venkataramani N., Prasad S., Shringi S.N., Nigam A.K., Pinto R. Effect of low Fe doping in La<sub>0,8</sub>Sr<sub>0,2</sub>MnO<sub>3</sub>. *Journal of Applied Physics*, 1998, v. 83, no. 11, pp. 7169 – 7170. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.367629>.
- Barandiaran J.M., Grenèche J.M., Hernandez T., Plazaola F., Rojo T. Non-conventional magnetic order in Fe-substituted La<sub>0,7</sub>Sr<sub>0,3</sub>MnO<sub>3</sub> giant-magnetoresistance manganites. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, v. 14, no. 47, pp. 12563 – 12573. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/47/328>.
- Sedykh V.D., Zverkova I.I., Dubovitskii A.V. Features of structure transformations in La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>Mn<sub>0,98</sub>Fe<sub>0,02</sub>O<sub>3+δ</sub> (x = 0.05 – 0.30). *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, v. 217, 012076. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/217/1/012076>.
- Баделин А.Г., Карпасюк В.К., Меркулов Д.И., Еремина Р.М., Яцык И.В., Шестаков А.В., Эстемирова С.Х. Влияние допирования железом на структурные, магнитные и электрические характеристики манганитов системы La<sub>0,7</sub>Sr<sub>0,3</sub>Mn<sub>0,9</sub>Zn<sub>0,1-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>3</sub> (0 ≤ x ≤ 0,1). *Перспективные материалы*, 2019, № 11, с. 49 – 58. DOI: [10.30791/1028-978X-2019-11-49-58](https://doi.org/10.30791/1028-978X-2019-11-49-58).
- Баделин А.Г., Карпасюк В.К., Смирнов А.М., Евсева А.В., Фирсова Е.П., Эстемирова С.Х. Фазовые переходы в манганитах с замещением марганца двухвалентными ионами. *Известия РАН. Серия физическая*, 2014, Вып. 78, № 2, с. 168 – 171.
- Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica A*, 1976, v. 32, pp. 751 – 767. DOI: <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.

## References

1. Nagaev E.L. Lanthanum manganites and other giant-magnetoresistance magnetic conductors. *Physics-Uspokhi*, 1996, vol. 39, no. 8, pp. 781 – 805. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU1996v039n08ABEH000161>.
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: [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(00\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(00)00121-6).
3. Urushibara A., Moritomo Y., Arima T., Asamitsu A., Kido G., Tokura Y. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . *Physical Review B*, 1995, vol. 51, no. 20, pp. 14103 – 14109. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.14103>.
4. Volkov N.V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures. *Physics-Uspokhi*, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 250 – 269. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.0182.201203b.0263>.
5. 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/S2075113318050143](https://doi.org/10.1134/S2075113318050143).
6. Koroleva L.I., Demin R.V., Kozlov A.V., Zashchirinskiĭ D.M., Mukovskii Ya.M. Relation between giant volume magnetostriction, colossal magnetoresistance, and crystal lattice softening in manganites  $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  (A = Ca, Ag, Ba, Sr). *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2007, vol. 104, no. 1, pp. 76 – 86. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063776107010098>.
7. 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. 052026–052029, DOI: [10.1088/1742-6596/200/5/052026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/5/052026).
8. Belogolovskii M.A. Interface resistive switching effects in bulk manganites. *Central European Journal of Physics*, 2009, vol. 7, no. 2, pp. 304–309. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0026-8>.
9. Karpasyuk V.K., Badelin A.G. Структура и магнитные характеристики манганитов с замещением марганца разновалентными ионами [Structure and magnetic characteristics of lanthanum-strontium manganites with substitution of different-valence ions for manganese]. Astrakhan, Sorokin R.V. Publ., 2016, 92 p.
10. Zener C. Interaction between the d-shells in the transition metals. II. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure. *Physical Review*, 1951, vol. 82, no. 3, pp. 403 – 405. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.82.403>.
11. Bebenin N.G., Zainullina R.I., Ustinov V.V. Colossal magnetoresistance manganites. *Physics-Uspokhi*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 719 – 738. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.07.038180>.
12. 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. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 21, pp. 42746 – 42749.
13. V'yunov O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I., Yanchevskii O.Z. (LaSr)(Mn,Me)O<sub>3</sub> manganites doped with d metals: Study of charge compensation mechanisms by crystallographic and magnetic characterizations. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27, no. 13 – 15, pp. 3919 – 3322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.063>.
14. Mizusaki J., Mori N., Takai H., Yonemura Y., Minamiue H., Tagawa H., Dokiya M., Inaba H., Naraya K., Sasamoto T., Hashimoto T. Oxygen nonstoichiometry and defect equilibrium in the perovskite-type oxides  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3+d}$ . *Solid State Ionics*, 2000, vol. 129, pp. 163 – 177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(99\)00323-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(99)00323-9).
15. Musaeva Z.R., Badelin A.G., Smirnov A.M., Karpasyuk V.K., Ponomarev V.I., Shchepetkin A.A. Effect of oxygen content and nonstoichiometry defects on the phase transformations in manganites of the  $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{1-x-y}\text{Ni}_x\text{Ti}_y\text{O}_{3+y}$  system. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya — Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2010, vol. 74, no. 10, pp. 1462 – 1465. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873810100424>.
16. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Derzhavin I.M., Merkulov D.I., Pankratov A.A. Nonstoichiometry defects and microinhomogeneities in multicomponent manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 476, pp. 371 – 375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.070>.
17. Balagurov A.M., Bobrikov I.A., Pomyakushin V.Yu., Sheptyakov D.V., Babushkina N.A., Gorbenko O.Yu., Kartavtseva M.S., Kaul' A.R. Magnetostructural phase separation and giant isotope effect in  $\text{R}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ . *Pisma v ZhETF — JETP Letters*, 2005, vol. 82, no. 9, pp. 594 – 598. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.2161288>.
18. Malavasi L., Ritter C., Mozzati M.C., Tealdi C., Islam M.S., Azzoni C.B., Flor G. Effects of cation vacancy distribution in doped  $\text{LaMnO}_{3+\delta}$  perovskites. *Journal of Solid State Chemistry*, 2005, vol. 178, pp. 2042 – 2049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2005.04.019>.
19. Estemirova S.Kh., Mitrofanov V.Ya., Uporov S.A., Gulyaeva R.I. Effect of cation substitution on structural, magnetic and magnetocaloric properties of  $(\text{La}_{0.7}\text{Eu}_{0.3})_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Mn}_{0.9}(\text{Me})_{0.1}\text{O}_3$  (Me = Co, Ti). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 502, pp. 166593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166593>.
20. Ahn K.H., Wu X.W., Liu K., Chien C.L. Magnetic properties and colossal magnetoresistance of La(Ca)MnO<sub>3</sub> materials doped with Fe. *Physical Review B*,

- 1996, vol. 54, no. 21, pp. 15299 – 15302. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.15299>.
21. Cai J.-W., Wang C., Shen B.-G., Zhao J.-G., Zhan W.-S. Colossal magnetoresistance of spin-glass perovskite  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{Mn}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{O}_3$ . *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 71, no. 12, pp. 1727 – 1729. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.120017>.
  22. Li Y.-D., Zhang J.-H., Xiong C.-S., Liao H.-W. Ferromagnetism and magnetoresistance in  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{Fe}_{0.07}\text{Mn}_{0.93}\text{O}_3$ . *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, vol. 83, no. 4, pp. 980 – 982. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01311.x>.
  23. Yanchevskii O.Z., V'yunov O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I. Crystallographic, electrical, and magnetic properties of the system  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ . *Low temperature physics*, 2006, vol. 32, no. 2, pp. 134 – 138. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2171513>.
  24. Ajan A., Venkataramani N., Prasad S., Shringi S.N., Nigam A.K., Pinto R. Effect of low Fe doping in  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ . *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 83, no. 11, pp. 7169 – 7170. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.367629>.
  25. Barandiaran J.M., Greneche J.M., Hernandez T., Plazaola F., Rojo T. Non-conventional magnetic order in Fe-substituted  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  giant-magnetoresistance manganites. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, vol. 14, no. 47, pp. 12563 – 12573. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/47/328>.
  26. Sedykh V.D., Zverkova I.I., Dubovitskii A.V. Features of structure transformations in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{3+\delta}$  ( $x = 0.05 - 0.30$ ). *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 217, 012076. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/217/1/012076>.
  27. Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Merkulov D.I., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Shestakov A.V., Estemirova S.Kh. Effect of iron doping on structural, magnetic, and electrical characteristics of manganites in  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.9}\text{Zn}_{0.1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.1$ ) system. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 435 – 440. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113320020057>.
  28. Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Smirnov A.M., Evseeva A.V., Firsova E.P., Estemirova S.Kh. Phase transitions in manganites with substitution of divalent ions for manganese. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya — Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2014, vol. 78, no. 2, pp. 100 – 103. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873814020075>.
  29. 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: <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.

*Статья поступила в редакцию — 11.02.2020 г.  
после доработки — 26.02.2020 г.  
принята к публикации — 27.02.2020 г.*

**Карпасюк Владимир Корнильевич** — Астраханский государственный университет (414056, Астрахань, ул. Татищева, 20а), доктор физико-математических наук, профессор, директор – научный руководитель Научно-образовательного центра функциональных магнитных материалов, специалист в области физики магнитных материалов, полупроводников и диэлектриков. E-mail: [vkarpasyuk@mail.ru](mailto:vkarpasyuk@mail.ru)

**Баделин Алексей Геннадьевич** — Астраханский государственный университет (414056, Астрахань, ул. Татищева, 20а), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики конденсированного состояния и технологии керамических материалов. E-mail: [alexey\\_badelin@mail.ru](mailto:alexey_badelin@mail.ru)

**Датская Замира Растямовна** — Астраханский государственный университет (414056, Астрахань, ул. Татищева, 20а), кандидат физико-математических наук, доцент кафедры, специалист в области материаловедения и физики конденсированного состояния. E-mail: [mira-phys@mail.ru](mailto:mira-phys@mail.ru)

**Еремина Рушана Михайловна** — Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области магнетизма и динамики кристаллической решетки в кристаллах и неупорядоченных системах. E-mail: [reremina@yandex.ru](mailto:reremina@yandex.ru)



**Меркулов Денис Иовинальевич** — Астраханский государственный университет (414056, Астрахань, ул. Татищева, 20а), кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, специалист в области физики конденсированного состояния, материаловедения полупроводников и диэлектриков. E-mail: merkul\_d@mail.ru

**Эстемирова Светлана Хусаиновна** — Институт металлургии УрО РАН (620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101), кандидат химических наук, старший научный сотрудник, специалист в области химии твердого тела и рентгеноструктурного анализа. E-mail: esveta100@mail.ru

**Алджанов Мезахир Амирджан оглы** — Институт Физики НАН Азербайджана (AZ1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 131), доктор физико-математических наук, заведующий отделом, специалист в области теплоемкости и фазовых переходах в низкомерных кристаллах и твердых растворах на их основе. E-mail: mezahir2002@mail.ru

**Сеидов Закир Юханнас оглы** — Институт Физики НАН Азербайджана (AZ1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 131), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области физики магнитных явлений и физики твердого тела. E-mail: zsyu@rambler.ru

---

## **Influence of manganese ions environment in octahedral sublattice of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1-x}\text{Mg}_x\text{O}_{3+\gamma}$ manganites on their properties**

**V. K. Karpasyuk, A. G. Badelin, Z. R. Datskaya, R. M. Eremina, D. I. Merkulov, S. Kh. Estemirova, M. A. Aljanov, Z. Y. Seidov**

Structural, magnetic, and electrical characteristics of manganites in the system  $\text{La}^{3+}_{0.7}\text{Sr}^{2+}_{0.3}\text{Mn}^{3+}_{0.6-x-2\gamma}\text{Mn}^{4+}_{0.3+x+2\gamma}\text{Fe}^{3+}_{0.1-x}\text{Mg}^{2+}_x\text{O}^{2-}_{3+\gamma}$  ( $0 \leq x \leq 0.1$ ) synthesized by solid-state reactions are presented. Sintering was performed in air at 1423 K. Samples with stoichiometric oxygen content ( $\gamma = 0$ ) were obtained by annealing at 1223 K and a partial oxygen pressure of 0.1 Pa. All studied manganites have a rhombohedral structure. With an increase in the magnesium content, the volume of the unit cell decreases, and annealed samples have a larger cell volume than the initial, sintered manganites containing over-stoichiometric oxygen. The ratio  $c/a$  of lattice parameters is practically unchanged. Curie point of manganites decreases in general with an increase in the magnesium content, showing a weakly expressed plateau in the region of  $0.025 < x < 0.075$ . Magnetization and “metal-semiconductor” transition temperature have maximum values at  $x = 0$ , then change non-monotonically, and at  $x > 0.075$  fall sharply. Manganite, which contains the largest amount of magnesium, has the highest resistance at temperatures below 180 K and is characterized by the largest width of the temperature interval of “ferromagnetic-paramagnetic” transition, which indicates the existence of magnetic inhomogeneities. The electromagnetic parameters of the initial and annealed samples differ slightly. A number of effects and competing factors that determine complicated dependencies of electromagnetic characteristics of the manganites of this system on the composition are considered.

**Keywords:** manganites, magnesium, iron, unit cell, magnetization, Curie point, metal-semiconductor transition, inhomogeneities.

---

**Karpasyuk Vladimir** — Astrakhan State University (20a Tatishchev Str., Astrakhan, 414056, Russia), Dr. Sci. (Phys-Math), professor, director and scientific head of the Research and educational center for functional magnetic materials, specialist in the field of the physics of magnetic materials, semiconductors and dielectrics. E-mail: vkarpasyuk@mail.ru

**Badelin Alexey** — Astrakhan State University (20a Tatishchev Str., Astrakhan, 414056, Russia), PhD (Phys-Math), senior researcher, specialist in the condensed matter physics and ceramic processing. E-mail: alexey\_badelin@mail.ru

**Datskaya Zamira** — Astrakhan State University (20a Tatishchev Str., Astrakhan, 414056, Russia), PhD (Phys-Math), associate professor; specialist in the field of materials science and condensed matter physics. E-mail: mira-phys@mail.ru.

**Eremina Rushana** — The Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute (10/7 Sibirsky tract Str., Kazan, 420029, Russia), Dr Sci (Phys-Math), leading researcher; specialist in the field of magnetism and lattice dynamics in crystals and disordered systems. E-mail: reremina@yandex.ru.

**Merkulov Denis** — Astrakhan State University (20a Tatishchev Str., Astrakhan, 414056, Russia), PhD (Phys-Math), head of laboratory, specialist in the field of condensed matter physics, materials science for semiconductors and dielectrics. E-mail: merkul\_d@mail.ru.

**Estemirova Svetlana** — Institute of metallurgy, Ural Division of RAS (101 Amundsen st., Ekaterinburg, 620016, Russia), PhD (Chem), senior researcher; specialist in condensed matter chemistry and X-ray structural analysis. E-mail: esveta100@mail.ru.

**Aljanov Mezhahir Amirjan oglu** — Institute of Physics, National Azerbaijan Academy of Sciences (131 H. Javid ave., Baku, AZ1143, Azerbaijan), Dr Sci (Phys-Math), head of department, specialist in the field of heat capacity and phase transitions in low-dimensional crystals and solid solutions based on them. E-mail: mezahir2002@mail.ru.

**Seidov Zakir Yuhannas oglu** — Institute of Physics, National Azerbaijan Academy of Sciences (131 H. Javid ave., Baku, AZ1143, Azerbaijan), Dr Sci (Phys-Math), leading researcher; specialist in the field of physics of magnetic phenomena and solid state physics. E-mail: zsyu@rambler.ru.