

СОСТОЯНИЕ АТОМОВ МАРГАНЦА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$

© 2023 г. А. В. Федорова^{1*}, Н. В. Чежина¹, В. В. Шиловских¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия
*e-mail: avfiodorova@gmail.com

Поступило в редакцию 8 сентября 2022 г.

После доработки 23 октября 2022 г.

Принято к печати 27 октября 2022 г.

Методом магнитного разбавления исследованы твердые растворы манганитов лантана в LaAlO_3 , допированные атомами европия и стронция и обладающие структурой перовскита. Установлено наличие магнитных агрегатов из атомов марганца и европия с ферромагнитным характером обменных взаимодействий.

Ключевые слова: магниторезистивность, манганиты лантана, структура перовскита, магнитная восприимчивость, керамический метод синтеза, золь-гель синтез

DOI: 10.31857/S0044460X2301016X, EDN: PABQGI

Физические свойства замещенных манганитов редкоземельных элементов состава $\text{A}_{1-x}\text{A}'_x\text{MnO}_3$ (A – атомы трехвалентного редкоземельного элемента; A' – атомы щелочноземельного металла) являются объектом повышенного внимания исследователей, связанного с такими практически важными эффектами, как колоссальное магнитосопротивление, магнитокалорический эффект, зарядовое, орбитальное, спиновое упорядочение и пр. [1–4].

Сложные оксиды манганитов лантана, содержащие атомы щелочноземельных элементов, такие как $\text{La}_{1-x}\text{Ca}(\text{Sr})_x\text{MnO}_3$ проявляют свойства типичных магниторезисторов с высокими значениями температуры Кюри, которые интерпретируются в рамках модели двойного обмена Зинера [5]. Частичное замещение трехвалентных атомов лантана на двухвалентные атомы щелочноземельного элемента приводит к возникновению смешанно-валентного состояния атомов марганца $\text{Mn}^{+3}/\text{Mn}^{+4}$, которое определяет магнитные и электрические свойства материала [6, 7].

Несмотря на большое количество исследований, посвященных магниторезистивным мангани-

там со структурой перовскита, объяснение влияния состава магниторезистивной керамики на ее свойства до сих пор остается неполным и основывается на сопоставлении экспериментальных и теоретических данных.

В последние годы растет количество исследований перовскитоподобных манганитов, в которых часть атомов лантана замещена на атомы европия [8–12]. Одним из факторов, влияющих на свойства магниторезистивной керамики, является стерический фактор. Известно, что замещение атомов лантана на элементы с меньшим ионным радиусом приводит к возникновению локальных искажений кристаллической решетки, а также к образованию устойчивой антиферромагнитной фазы. Введение в структуру перовскита атомов европия сопровождается появлением зарядового упорядочения, которое становится все более ощутимым по мере увеличения концентрации атомов европия.

Манганиты являются прототипом коррелированных электронных систем, в которых одновременно реализуются спиновые, зарядовые и орбитальные эффекты, существенно осложняющие описание этих систем. Метод магнитного

Таблица 1. Значения параметров элементарной ячейки для системы $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$

Молярное содержание Mn, моль	a , Å	α , град	V , Å ³
0.009	5.3595	60.101	109.141
0.013	5.3618	60.090	109.222
0.018	5.3620	60.097	109.218
0.027	5.3635	60.113	109.382
0.03	5.3614	60.098	109.212
0.039	5.3641	60.119	109.403
0.041	5.3667	60.106	109.434
0.049	5.3658	60.069	109.413
0.0576	5.3669	60.113	109.589
0.0634	5.3687	60.115	109.644
0.07	5.3675	60.100	109.592
0.073	5.3680	60.140	109.722
0.077	5.3717	60.130	109.933

разбавления, основанный на изучении магнитных свойств твердых растворов изоморфного замещения, позволяет успешно решать эту проблему [13].

В данной работе с помощью метода магнитного разбавления исследуется состояние атомов марганца и наличие обменных взаимодействий в твердых растворах состава $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$. Исследуемая система представляет собой твердый раствор манганита лантана $(\text{La}_{0.8}\text{Eu}_{0.2})_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ в диамагнитной матрице алюмината лантана LaAlO_3 . Для этой цели золь-гель методом получена серия твердых растворов с концентрацией атомов марганца по шихте $x = 0.01-0.08$.

В сложных оксидах и твердых растворах замещенных манганитов лантана кубическая структура перовскита чаще всего претерпевает различного рода искажения, в простейшем случае определяющиеся размерами допирующих элементов. По результатам рентгенофазового анализа двух серий твердых растворов $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ установлена ромбоэдрическая структура перовскита и рассчитаны параметры элементарной ячейки (табл. 1). В исследованной системе параметр a элементарной кубической ячейки показывает тенденцию к увеличению по мере концентрирования твердых растворов, однако это изменение носит немонотонный характер, что может быть объяснено возникновением структурных фрустра-

ций в узлах кристаллической решетки. С другой стороны, введение в позиции лантана атомов европия, имеющих меньший радиус, будет приводить к искажениям кислородных октаэдров, их смещению и сближению по мере увеличения содержания атомов европия.

Для уточнения состояния атомов парамагнетиков твердые растворы $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ ($x = 0.013$) и $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$ были исследованы с помощью спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В спектре ЭПР (рис. 1) твердого раствора $\text{La}_{0.98}\text{Eu}_{0.02}\text{AlO}_3$ присутствует сигнал, характерный для двухвалентных атомов европия. Обнаружение в спектрах ЭПР $\text{Eu}(\text{II})$ говорит о том, что даже в отсутствие стехиометрической возможности для восстановления $\text{Eu}(\text{III}) \rightarrow \text{Eu}(\text{II})$ существует небольшая примесь этого состояния, возможно, из-за незначительной нестехиометрии по кислороду, которая не сказывается на величинах магнитной восприимчивости, но свидетельствует о том, что европий относительно легко восстанавливается.

В спектре ЭПР твердого раствора $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ ($x = 0.013$) наблюдается два сигнала. Первый, состоящий из 6 компонент сверхтонкого расщепления с константой тонкой структуры A 80 и g 2.04, относится к состоянию $\text{Mn}(\text{II})$. Второй сигнал, значительно уширенный, с несколько меньшим значением g -фактора (g 1.998)

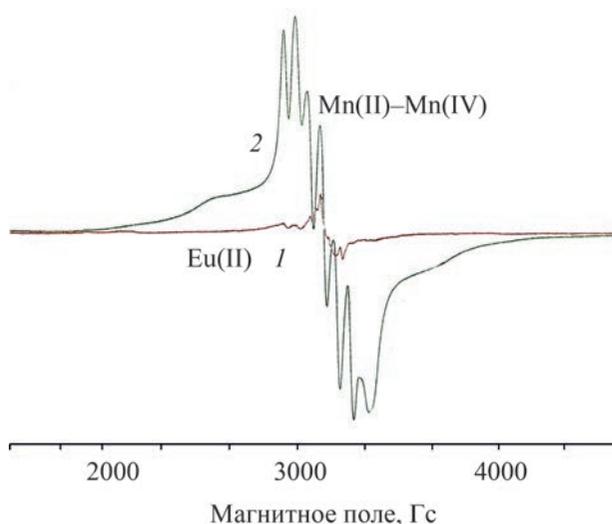


Рис. 1. Спектра ЭПР с наложением сигналов $\text{La}_{0.02}\text{Eu}_{0.98}\text{AlO}_3$ (1) для образца $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ ($x = 0.013$) (2).

и состоящий из трех компонент тонкого расщепления принадлежит состоянию Mn(IV) [14].

На основании экспериментальных величин удельной магнитной восприимчивости рассчитаны значения парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, отнесенной к 1 молю атомов марганца (χ_{Mn}), а также значения эффективного магнитного момента ($\mu_{\text{эф}}$). Так как исследованная система представляет собой твердые растворы $(\text{La}_{0.8}\text{Eu}_{0.2})_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ в LaAlO_3 , при вычислении χ_{Mn} учитывался вклад парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, рассчитанной на 1 моль атомов европия, исследованной ранее системы $\text{La}_y\text{Eu}_{1-y}\text{AlO}_3$ [15].

Температурные зависимости обратной величины парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, рассчитанной на 1 моль атомов марганца, для исследованных твердых растворов $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ подчиняются закону Кюри–Вейсса с небольшими положительными значениями константы Вейсса, свидетельствующими о преобладании ферромагнитных обменных взаимодействий дальнего порядка.

На изотермах парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, отнесенной к 1 молю атомов марганца (рис. 2), наблюдается мо-

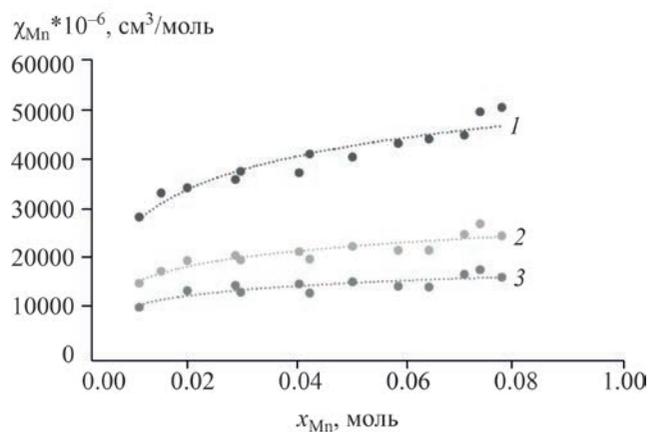


Рис. 2. Зависимость парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости (χ_{Mn}) от содержания атомов марганца в твердых растворах $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ при 100 (1), 180 (2) и 260 К (3).

нотонное увеличение значений χ_{Mn} по мере увеличения концентрации атомов марганца в твердых растворах, что также свидетельствует о ферромагнитном характере обменных взаимодействий в пределах парамагнитных центров.

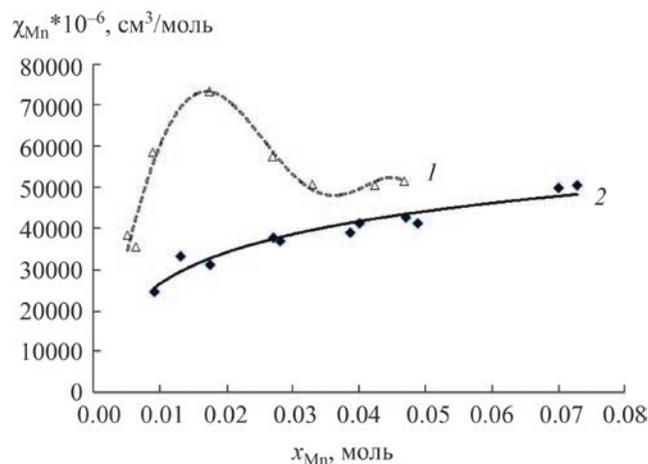


Рис. 3. Зависимость парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости от содержания атомов марганца в твердых растворах $\text{La}_{1-0.67x}\text{Sr}_{0.33x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ (1) и $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ (2) при 100 К.

Таблица 2. Значения эффективного магнитного момента $\mu^{x \rightarrow 0}$ и парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости $\chi_{\text{Mn}}^{x \rightarrow 0}$ при бесконечном разбавлении для $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$

T, K	$\chi_{\text{Mn}}^{x \rightarrow 0} \times 10^{-6},$ $\text{см}^3/\text{моль}$	$\mu^{x \rightarrow 0}, \text{М. Б.}$
77	37900	4.85
90	32400	4.85
100	29200	4.85
120	24300	4.85
140	20800	4.85
160	18200	4.85
180	16200	4.85
200	14500	4.83
220	13000	4.80
240	11600	4.73
260	10400	4.68
273	9900	4.67
293	9100	4.64
320	8200	4.60
350	7430	4.58
400	6470	4.57

Изотермы парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости для твердых растворов, не содержащих атомы европия $\text{La}_{1-0.67x}\text{Sr}_{0.33x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ [16], и исследованных твердых растворов $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ имеют различный вид и отличаются по абсолютной величине χ_{Mn} (рис. 3).

Введение атомов европия в $\text{La}_{1-0.67x}\text{Sr}_{0.33x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ приводит к снижению величин парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, рассчитанной на 1 моль атомов марганца в твердых растворах $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$. Это говорит о том, что европий оказывает существенное влияние на обменные взаимодействия в манганитах лантана, и, как следствие, на магнитные свойства.

Экстраполяцией изотерм парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости χ_{Mn} и эффективного магнитного момента на бесконечное разбавление ($x \rightarrow 0$) получены значения эффективного магнитного момента при бесконечном разбавлении ($\mu^{x \rightarrow 0}$) и значения парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости при $x \rightarrow 0$ (табл. 2). В интервале температур 77–200 К

значение эффективного магнитного момента не зависит от температуры и принимает значения 4.85 М. Б. Такое изменение магнитного момента с температурой является типичным в случае слабых ферромагнитных взаимодействий в твердом растворе [17]. Это означает, что в исследованной системе даже при бесконечном разбавлении отсутствует полная дезагрегация атомов марганца.

Чисто спиновые значения эффективного магнитного момента для атомов марганца Mn(III) и Mn(IV) составляют 4.92 и 3.88 М. Б. соответственно и не зависят от температуры. Оценка доли четырехвалентных атомов марганца (a) с помощью экспериментальных значений эффективного магнитного момента ($\mu_{\text{эксп}}$) для исследованной системы и чисто спиновых значений магнитного момента для разновалентных атомов марганца ($\mu_{\text{Mn(IV)}}$ и $\mu_{\text{Mn(III)}}$) по формуле (1) дает величину a порядка 5 мол%, в то время как для твердых растворов, не содержащих атомы европия состава $\text{La}_{1-0.67x}\text{Sr}_{0.33x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$, доля атомов Mn(IV) составила 30 мол%, что находится в соответствии со стехиометрией формульного состава [16].

$$\mu_{\text{эксп}}^2 = a \cdot \mu_{\text{Mn(IV)}}^2 + (1 - a) \mu_{\text{Mn(III)}}^2 \quad (1)$$

В рамках теории двойного обмена Зинера [1] такое низкое количество атомов Mn(IV) в твердых растворах, содержащих атомы европия $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$, может быть объяснено установлением в твердых растворах равновесия между разновалентными атомами парамагнитных элементов $\text{Mn(IV)} + \text{Eu(II)} \leftrightarrow \text{Mn(III)} + \text{Eu(III)}$. Тем более это возможно, поскольку во время синтеза образцов реализуется задача получить твердые растворы с распределением допирующих элементов по кристаллической решетке близкому к равновесному. С этой целью во время высокотемпературного прокаливания осуществляется не только фазовый контроль, но и подбираются такие условия, чтобы значения магнитной восприимчивости оставались постоянными при увеличении времени прокаливания. В такой равновесной системе возможны косвенные обменные взаимодействия между атомами Mn(IV) и Eu(II) , осуществляемые в кристаллической решетке перовскита через атомы кислорода под углом 90° . В таком магнитном агрегате $\text{Mn(IV)}\text{--O--Eu(II)}$ будет реализовываться

ферромагнитный характер обменных взаимодействий [17]. Для невырожденных состояний $^4A_{2g}$ и $^8S_{7/2}$ [Mn(IV) и Eu(II) соответственно] применима модель Гейзенберга–Дирака–ван-Флека, однако невозможность установить долю агрегатов Mn(IV)–O–Eu(II) в бесконечно разбавленном твердом растворе не позволяет провести точный расчет обменного параметра. При достаточно сильных ферромагнитных обменных взаимодействиях с обменным параметром $J \gg 0$ значения эффективного магнитного момента Mn(IV)–O–Eu(II) будут составлять 7.75 М. Б. При уменьшении обменного параметра величины магнитного момента такого агрегата будут уменьшаться до 6.24 М. Б. Таким образом, при любых положительных значениях J должно происходить уменьшение значений эффективного магнитного момента по мере роста температуры [18], что и наблюдается в исследованных твердых растворах (табл. 2).

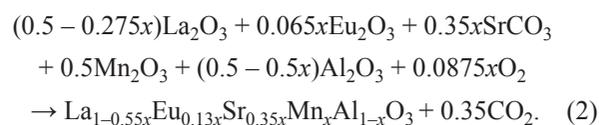
Отсутствие резкого возрастания значений магнитной восприимчивости твердых растворов $La_{1-0.55x}Eu_{0.13x}Sr_{0.35x}Mn_xAl_{1-x}O_3$ по сравнению с твердыми растворами $La_{1-0.55x}Eu_{0.13x}Sr_{0.35x}Mn_xAl_{1-x}O_3$ (рис. 3) объясняется тем, что значительная часть атомов Mn(IV) не участвует во взаимодействиях с Mn(III), будучи ферромагнитно связана с атомами европия. Это приводит к уменьшению величин парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, а также к более монотонному ее изменению при введении в структуру перовскита атомов европия.

Иными словами, введение атомов европия дополнительно к атомам стронция в структуру манганита лантана приводит к значительному изменению характера обменных взаимодействий между атомами марганца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Твердые растворы состава $La_{1-0.55x}Eu_{0.13x}Sr_{0.35x}Mn_xAl_{1-x}O_3$ ($x = 0.01, 0.015, 0.03, 0.04, 0.05, 0.07, 0.08$) получены золь-гель методом с промежуточным образованием цитратного геля. Для синтеза использовали следующие реактивы: оксид лантана (ОСЧ), оксид европия (ОСЧ), карбонат стронция (ЧДА), оксид марганца(III) (ОСЧ), γ -оксид алюминия, полученный в лабораторных условиях. Стехиометрические ко-

личества исходных веществ, рассчитывали по уравнению твердофазной реакции (2).



Исходные вещества растворяли в разбавленной азотной кислоте (1:1) при постоянном нагревании с добавлением 3%-ного раствора пероксида водорода. После упаривания и понижения кислотности раствора до pH, близкого к нейтральному, в раствор добавляли лимонную кислоту и этиленгликоль в количествах, рассчитанных по формуле (3).

$$n[(CH_2OH)_2] = n(C_6H_8O_7) = \sum z_i n_i. \quad (3)$$

где z_i – заряд катиона i -го металла; n_i – число моль i -го металла.

Полученный гель прокаливали при 800°C с медленным подъемом температуры до полного удаления органических компонентов. Полученный порошок таблетировали при помощи пресс-формы из органического стекла. Таблетки прокаливали при 1450°C в течение 13 ч до получения однофазных образцов с магнитной восприимчивостью, не зависящей от времени дополнительного прокаливания.

Определение содержания атомов европия и марганца в твердых растворах осуществляли с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICP-AESOptima 7000 DV (PerkinElmer). Точность определения концентрации атомов европия и марганца не превышала 1.5 мол%. Для определения однофазности полученных образцов использовали метод рентгенофазового анализа. Съемку порошковых дифрактограмм проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре Rigaku MINIFLEX с использованием CuK_α -излучения. Идентификацию порошкограмм осуществляли с использованием базы PDF2. Уточнение параметров элементарной ячейки с помощью полнопрофильного анализа методом Ритвельда проведено с использованием программного пакета Bruker TOPAS® 4.2. Рентгенодифракционные исследования проводили в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета.

Съемку спектров электронного парамагнитного резонанса осуществляли на спектрометре Bruker Elexsys E580 в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета «Магнитно-резонансные методы исследования». Измерения проводились при комнатной температуре (100–5100 Гс).

Для полученных твердых растворов была измерена магнитная восприимчивость по методу Фарадея в интервале температур 77–400 К. По экспериментальным значениям магнитной восприимчивости рассчитаны значения парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, отнесенной к 1 молю атомов европия, и эффективного магнитного момента. Поправки на диамагнетизм вносились с учетом восприимчивости диамагнитной матрицы LaAlO_3 , измеренной в том же температурном интервале. Учет магнитных свойств атомов европия в исследованной матрице алюмината лантана осуществлялся с учетом магнитной восприимчивости твердых растворов состава $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$, исследованных ранее [15].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федорова Анна Викторовна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8242-5608>

Чежина Наталья Владимировна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3490-6647>

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Чежина Н.В. является членом редколлегии Журнала общей химии. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eremina R.M., Fazlizhanov I.I., Yatsyk I.V., Shapiro K.R. // Phys. Rev. (B). 2011. Vol. 84. P. 644. doi 10.1103/PhysRevB.84.064410
2. Adashkevich S.V., Markevich S.A., Trukhanov S.V., Fedaruk R. // J. Appl. Spectr. 2017. Vol. 84. P. 683. doi 10.1007/s10812-017-0530-3
3. Amaral J.S., Reis M.S., Amaral V.S., Mendonca T.M. // J. Magn. Magn. Mater. 2005. Vol. 290. P. 686. doi 10.1016/j.jmmm.2004.11.337
4. Raju N., Roja Sree D., Shravan Kumar Reddy S., Gopal Reddy Ch., Yadagiri Reddy P., Rama Reddy K., Raghavendra Reddy V. // J. Magn. Magn. Mater. 2014. Vol. 368. P. 308. doi 10.1016/j.jmmm.2014.05.029
5. Zener K. // Phys. Rev. 1951. Vol. 82. N3. P. 403. doi 10.1103/PhysRev.82.403
6. Lee H.-H., Lee J.-C., Park M.-K., Park S. // J. Mat. Proc. Tech. 2006. Vol. 171. N 2. P. 240. doi 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.069
7. Li H., Liu M., Li N., Zheng W. // Ceram. Int. 2009. Vol. 35. N 1. P. 345. doi 10.1016/j.ceramint.2007.11.004
8. Rahmouni H., Cherif B., Jemai R., Dhahri A., Khirouni K. // J. Alloys Compd. 2017. Vol. 690. P. 890. doi 10.1016/j.jallcom.2016.08.200
9. Choudhary Y.R.S., Mangavati S., Patil S., Rao A., Nagaraja B.S., Thomas R., Okram G.S., Kini S.G. // J. Magn. Magn. Mater. 2018. Vol. 451. P. 110. doi 10.1016/j.jmmm.2017.11.007
10. Elghoul A., Krichene A., Chniba Boudjada N., Boujelben W. // Cer. Int. 2018. Vol. 44. N 12. P. 14510. doi 10.1016/j.ceramint.2018.05.066
11. Misra S., Andronenko S.I., Padia P., Vadnala S., Asthana S. // J. Magn. Magn. Mater. 2021. Vol. 519. P. 1645. doi 10.1016/j.jmmm.2020.167450
12. Hu Q., Yue B., Yang F., Shao H., Bao M., Wang Y., Liu J. // J. Alloys Compd. 2021. Vol. 872. doi 10.1016/j.jallcom.2021.159727
13. Федорова А.В., Чежина Н.В. // ЖОХ. 2019. Т. 89. № 6. С. 917; Федорова А.В., Чежина Н.В. // Russ. J. Gen. Chem. 2019. Vol. 89. N6. P. 1136. doi 10.1134/S1070363219060070
14. Альтшулер С.А., Козырев Б.М. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М: Наука. 1972. 672 с.
15. Федорова А.В., Чежина Н.В., Шиловских В.В. // ЖОХ. 2015. Т. 85. № 10. С. 1589; Федорова А.В., Чежина Н.В., Шиловских В.В. // Russ. J. Gen. Chem. 2015. Vol. 85. N 10. P. 2223. doi 10.1134/S1070363215100011
16. Чежина Н.В., Кузьмич М.В. // ЖОХ. 2002. Т. 72. № 5. С. 871; Чежина Н.В., Кузьмич М.В. // Russ. J. Gen. Chem. 2002. Vol. 72. N 5. P. 814. doi 10.1023/A:1019537125044
17. Ракитин Ю., Калинин В. Современная магнетохимия. СПб: Наука, 1994. 276 с.
18. Калинин В., Ракитин Ю. Введение в магнетохимию. Метод статической магнитной восприимчивости в химии. М.: Наука, 1980. 302 с.

State of Manganese Atoms in $\text{La}_{1-0.55x}\text{Eu}_{0.13x}\text{Sr}_{0.35x}\text{Mn}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_3$ Solid Solutions

A. V. Fedorova^{a,*}, N. V. Chezhina^a, and V. V. Shilovskikh^a

^a St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: avfedorova@gmail.com

Received September 8, 2022; revised October 23, 2022; accepted October 27, 2022

Solid solutions of lanthanum manganites in LaAlO_3 doped with europium and strontium atoms are studied by the method of magnetic dilution. The magnetic clusters were found including manganese and europium atoms with ferromagnetic type of exchange interactions.

Keywords: magnetoresistivity, lanthanum manganites, perovskite structure, magnetic susceptibility, ceramic synthesis method, sol-gel synthesis