

УДК 541.122:538.214

ОБМЕННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ АТОМАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СТРУКТУРЕ ПЕРОВСКИТА

© 2019 г. А. В. Федорова*, Н. В. Чежина

Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: avfedorova@gmail.com

Поступило в Редакцию 20 марта 2019 г.

После доработки 20 марта 2019 г.

Принято к печати 23 марта 2019 г.

Методом магнитного разбавления исследованы твердые растворы алюминатов лантана, включающие редкоземельные элементы (церий, европий, гадолиний и иттербий). Атомы лантаноидов в структуре перовскита вступают в обменные взаимодействия.

Ключевые слова: структура перовскита, лантаноиды, магнитная восприимчивость

DOI: 10.1134/S0044460X19060099

Замещенные манганиты лантана со структурой перовскита, проявляющие магниторезистивные свойства, привлекают повышенное внимание исследователей на протяжении 70 лет. Обнаружение в 1950 годах резкого снижения сопротивления в сложных оксидах $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ при наложении магнитного поля [1] стимулировало интерес к этому классу соединений как к перспективным материалам. Состав замещенных манганитов лантана может быть выражен формулой $\text{La}_{1-x}\text{E}_x\text{MnO}_3$, где E – атомы замещающих элементов.

В 1951 году была предложена модель двойного обмена, объясняющая изменение магнитных свойств замещенных манганитов лантана [2]. Согласно модели двойного обмена, эффект магнитосопротивления в манганитах определяется двойным электронным переходом между разновалентными атомами марганца с участием атомов кислорода $\text{Mn(III)} \rightarrow \text{O} \rightarrow \text{Mn(IV)}$. Эффективность двойного обмена определяется соотношением атомов $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ и взаимным расположением атомов марганца и кислорода в кристаллической решетке.

В магниторезистивных манганитах соотношение разновалентных атомов $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ в манганитах варьируется путем гетеровалентного замещения трехвалентных атомов лантана двухвалентными атомами, чаще всего щелочноземельных элементов. Среди таких систем

наиболее изучены $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ [3–5]. Замещение части атомов лантана на двухвалентные элементы может приводить не только к изменению соотношения разновалентных атомов марганца, но и к возникновению кислородной нестехиометрии в таких сложных оксидах. Все это существенно затрудняет исследование влияния природы замещающих элементов на состояние атомов марганца и магнитные свойства магниторезистивной керамики.

В последние годы внимание исследователей все больше уделяется использованию редкоземельных элементов в качестве допантов [6–14]. Исследование манганитов лантана, допированных щелочноземельными и редкоземельными элементами, такими как самарий, гадолиний и иттербий $\text{La}_{0.49}\text{E}_{0.01}\text{Ca}_{0.50}\text{MnO}_3$ (E = Sm, Gd, Yb), выявило ряд интересных особенностей [16]. Для всех исследованных оксидных систем при повышении температуры обнаружен переход металл–изолятор, что обуславливает появление экстремума на температурных зависимостях сопротивления образцов. При этом скачок сопротивления оказывается максимальным у манганитов, допированных самарием $\text{La}_{0.49}\text{Sm}_{0.01}\text{Ca}_{0.50}\text{MnO}_3$, а наименьший – у $\text{La}_{0.49}\text{Gd}_{0.01}\text{Ca}_{0.50}\text{MnO}_3$. Это кажется весьма необычным, поскольку в ряду $\text{Sm}^{3+}-\text{Gd}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ гадолиний, обладающий 7 неспаренными

электронами ($4f^7$), имеет наибольший магнитный момент. В основе современных моделей, объясняющих появление магниторезистивности, лежат представления об обменных взаимодействиях между магнитными центрами, в связи с чем возникает вопрос о возможности f -элементов принимать участие в обменных взаимодействиях.

Сложные оксиды, включающие атомы парамагнитных элементов, – магнитноконцентрированные системы, исследование которых осложнено различного рода кооперативными явлениями. В последние годы предпринимаются попытки получения магнитных материалов на основе диамагнитной матрицы алюмината лантана LaAlO_3 . Замещение части атомов лантана в LaAlO_3 на атомы редкоземельных элементов, а алюминия – на атомы марганца открывает большие перспективы не только для фундаментальных исследований [17, 18].

Сложные оксиды замещенных манганитов лантана со структурой перовскита могут проявлять различные физико-химические свойства в зависимости от состава диамагнитной подрешетки и соотношения замещающих элементов. Несмотря на большое количество исследований, посвященных замещенным манганитам, вопрос о влиянии природы допирующих элементов остается нерешенным. В оксидной керамике по мере увеличения доли парамагнитных атомов усиливаются различного рода электронные эффекты. Поэтому исследование таких систем не позволяет выявить влияние допирующих элементов на магнитные свойства сложнооксидной керамики.

Метод магнитного разбавления, разработанный на кафедре общей и неорганической химии химического факультета Санкт-Петербургского университета, позволяет проследить влияние допирующего элемента на магнитные свойства твердых растворов изоморфного замещения [19–23]. Исследование манганитов лантана, допированных редкоземельными элементами, осложняется присутствием в структуре перовскита одновременно двух различных парамагнитных атомов. Для того чтобы выяснить, как влияет природа редкоземельного элемента на состояние атомов марганца и на обменные взаимодействия в магниторезистивных манганитах, необходимо исследовать твердые растворы, включающие только редкоземельный элемент в диамагнитной матрице алюминате лантана.

Методом магнитного разбавления исследовано поведение некоторых редкоземельных элементов в диамагнитной матрице со структурой перовскита $\text{La}_{1-y}\text{E}_y\text{AlO}_3$ (где $\text{E} = \text{Ce}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Yb}$; $y = 0.02, 0.03, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$). Для синтеза твердых растворов, включающих различные редкоземельные элементы, использовались стандартный керамический и золь-гель метод. Выбор методики проводили экспериментально с целью получения однофазных образцов, близких к равновесным по распределению атомов в кристаллической решетке. Для всех исследованных твердых растворов определено точное содержание редкоземельного элемента, рассчитаны параметры элементарной ячейки, измерены значения магнитной восприимчивости в интервале температур 77–400 К.

Исследование структурных особенностей твердых растворов $\text{La}_{1-y}\text{Ce}_y\text{AlO}_3$ показало, что параметры элементарной ячейки практически не изменяются по мере увеличения доли церия (y) в структуре LaAlO_3 , что связано с сопоставимостью ионных радиусов церия и лантана: $r(\text{Ce}^{3+}) = 0.134$, $r(\text{La}^{3+}) = 0.136$ нм [24]. Твердые растворы алюмината лантана $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$ кристаллизуются в тригональной сингонии, что обусловлено искажением кубической структуры перовскита при замещении части атомов лантана меньшими по размеру атомами европия. Для этих твердых растворов характерно уменьшение объема и параметра a элементарной ячейки при увеличении доли европия в LaAlO_3 . Введение в структуру LaAlO_3 атомов гадолиния, имеющих меньший радиус, чем атомы лантана, приводит к уменьшению параметров элементарной ячейки и к стабилизации ромбической кристаллической решетки однофазных образцов $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$. Зависимости параметров элементарной ячейки от доли атомов гадолиния в образцах носят прямолинейный характер и также уменьшаются с увеличением доли атомов гадолиния в твердых растворах.

Температурные зависимости обратной величины парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, рассчитанной на 1 моль атомов редкоземельных элементов ($1/\chi_E$), для твердых растворов $\text{La}_{1-y}\text{Ce}_y\text{AlO}_3$, $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$, $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$ носят прямолинейный характер и подчиняются закону Кюри–Вейсса с отрицательными значениями констант Вейсса. Для твердых растворов алюминатов лантана $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$, включающих атомы европия, закон Кюри–Вейсса не выпол-

Таблица 1. Основные состояния и рассчитанные (μ_J) и экспериментальные ($\mu_{\text{эксп}}$) значения магнитных моментов некоторых редкоземельных ионов

E^{3+}		Ce^{3+}	Eu^{3+}	Gd^{3+}	Yb^{3+}
Квантовые числа основного состояния	S	1/2	6/2	7/2	1/2
	L	3	3	0	3
	J	5/2	0	7/2	7/2
μ_J , М. Б.		2.54	0	7.9	4.5
$\mu_{\text{эксп}}$, М. Б.		2.5	3.4	7.9	4.5

няется. Отклонения от закона Кюри–Вейсса в таких оксидных системах, как правило, связывают с необходимостью учитывать заселенность не только ближайшего F_1 терма, но и трех следующих возбужденных состояний [25].

Одна из наиболее важных характеристик состояния парамагнитных атомов в твердом теле – эффективный магнитный момент. В соединениях переходных элементов неспаренные электроны парамагнитных атомов подвергаются сильному воздействию кристаллического окружения, энергия которого превосходит энергию спин-орбитального взаимодействия. В результате чего орбитальный момент «замораживается» [25]. В таком случае для оценки магнитных свойств соединений $3d$ -металлов с достаточно высокой точностью используют схему Рассела–Саундерса, и значения $\mu_{\text{эф}}$ рассчитывают как чисто спиновые или с учетом спин-орбитального взаимодействия.

Магнитные свойства соединений d - и f -элементов существенно отличаются. В случае редкоземельных элементов $4f$ -оболочка экранирована от воздействия кристаллического поля $5s^2$ - и $5p^6$ -электронами и влияние кристаллического окружения сказывается в гораздо меньшей степени, чем для соединений d -элементов. Это приводит к тому, что в формировании магнитного момента ионов редкоземельных элементов вносят вклад и спиновый, и орбитальный моменты. Магнитный момент атомов f -элементов рассчитывали по формуле (1).

$$\mu_J = g_J \mu_B \sqrt{J(J+1)}. \quad (1)$$

Здесь J – полный момент основного состояния, g_J – g -фактор этого состояния.

Таблица 2. Значения эффективного магнитного момента на бесконечном разбавлении ($y \rightarrow 0$) для твердых растворов $La_{1-y}E_yAlO_3$ при некоторых температурах

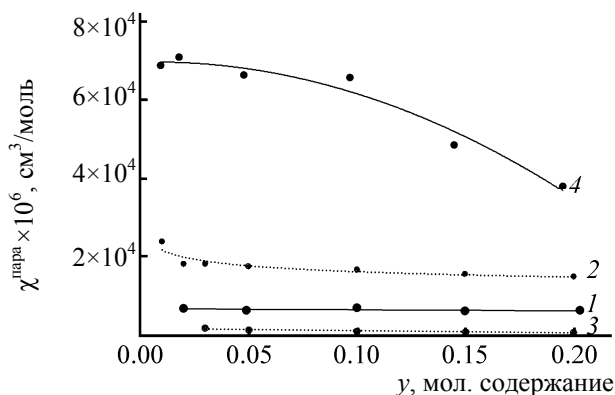
Раствор	μ , М. Б.			
	120 К	180 К	220 К	320 К
$La_{1-y}Ce_yAlO_3$	1.66	1.72	1.82	1.84
$La_yEu_{1-y}AlO_3$	2.60	3.12	3.32	3.73
$La_{1-y}Gd_yAlO_3$	8.80	8.77	8.80	8.72
$La_{1-y}Yb_yAlO_3$	4.40	4.67	4.80	4.98

Рассчитанные таким образом значения магнитного момента и сравнение их с экспериментальными для различных трехвалентных ионов редкоземельных элементов представлены в табл. 1. В отличие от Eu^{3+} , экспериментальные значения эффективного магнитного момента для трехвалентных атомов церия, гадолиния и иттербия совпадают с теоретическими рассчитанными по формуле (1).

Для исследованных твердых растворов $La_{1-y}E_yAlO_3$ экстраполяцией парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости и эффективного магнитного момента на бесконечное разбавление ($y \rightarrow 0$) получены значения эффективного магнитного момента на бесконечном разбавлении (табл. 2). Как следует из представленных значений, эффективный магнитный момент на бесконечном разбавлении $La_{1-y}Ce_yAlO_3$ не превышает значений, полученных для различных систем (табл. 1), и соответствует одиночным атомам трехвалентного церия. При этом значения магнитного момента при бесконечном разбавлении для $La_{1-y}Ce_yAlO_3$ зависят от температуры за счет влияния спин-орбитального взаимодействия и расщепления нижнего уровня мультиплета.

В твердых растворах алюминатов лантана $La_yEu_{1-y}AlO_3$, включающих атомы европия, значения эффективного магнитного момента при $y \rightarrow 0$ также свидетельствуют о существовании на бесконечном разбавлении одиночных атомов европия, для которых при комнатной температуре экспериментально установлено значение $\mu_{\text{эксп}} = 3.4$ М. Б.

Для атомов $Eu(III)$ в основном состоянии $L = 3$, $S = 6/2$, $J = 0$, $g = 0$, терм 7F_0 . Экспериментальное значение эффективного магнитного момента



Зависимости величин парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, рассчитанной на 1 моль атомов f -элемента ($\chi^{\text{пара}}$), от концентрации (y) для $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$ (1) [27], $\text{La}_{1-y}\text{Yb}_y\text{AlO}_3$ (2) [28], $\text{La}_{1-y}\text{Ce}_y\text{AlO}_3$ (3) [29] и $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$ (4) [30] при 220 К.

Eu(III) в оксалатных комплексах [26] ~ 3.4 М. Б. при комнатной температуре. Несоответствие теоретического и экспериментального значений эффективного магнитного момента для включающих европий систем объясняется малой величиной расщепления между нижним и первым возбужденным уровнями, что приводит к термической заселенности близлежащих возбужденных состояний. В таком случае магнитная восприимчивость соединений европия (2) должна складываться из температурно-зависимой части и вклада парамагнетизма Ван-Флека.

$$\chi_{\text{общ}} = \frac{N\mu^2\beta^2}{3kT} + 2N\alpha. \quad (2)$$

Здесь N – число атомов, T – температура, $N\alpha$ – парамагнетизм Ван-Флека, μ – магнитный момент атома, β – магнетон Бора.

Парамагнитная составляющая магнитной восприимчивости для исследованных твердых растворов $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$ при $y \rightarrow 0$ описывается формулой (3).

$$\chi_{\text{общ}} = \frac{N\mu^2\beta^2}{3kT} + 0.001. \quad (3)$$

Здесь $0.001 \text{ см}^3/\text{моль}$ – величина ван-флековского парамагнетизма. Такое большое значение ван-флековского парамагнетизма не встречается для d -элементов, однако в соединениях f -элементов величина ван-флековского парамагнетизма может достигать $10^{-2} \text{ см}^3/\text{моль}$ [25].

Таким образом, результаты измерения магнитной восприимчивости и анализ полученных магнитных характеристик показывает, что атомы

европия в твердых растворах $\text{La}_{1-y}\text{Eu}_y\text{AlO}_3$ участвуют в косвенных обменных взаимодействиях антиферромагнитного характера. Магнитные характеристики при бесконечном разбавлении соответствуют существованию одиночных атомов Eu(III) с большим вкладом температурно-независимого парамагнетизма Ван-Флека ($\sim 0.001 \text{ см}^3/\text{моль}$) и температурно-зависимым эффективным магнитным моментом.

Значения эффективного магнитного момента на бесконечном разбавлении для аллюминатов, допированных гадолинием $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$, принимают значения ~ 8.7 М. Б. и практически не зависят от температуры. В твердых растворах $\text{La}_{1-y}\text{Yb}_y\text{AlO}_3$ эффективный магнитный момент при бесконечном разбавлении зависит от температуры, что свидетельствует о заселенности вышележащих термов.

Для всех исследованных твердых растворов величины магнитного момента отличаются от теоретически рассчитанных, но позволяют предположить при бесконечном разбавлении наличие одиночных атомов гадолиния. Деагрегация атомов f -элементов при бесконечном разбавлении в аллюминате лантана встречается довольно часто, а разница экспериментальных значений эффективного магнитного момента и теоретически рассчитанных является общей закономерностью для ионов редкоземельных элементов.

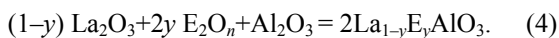
Раньше считалось, что атомы f -элементов не принимают участия в обменных взаимодействиях в твердых телах, поскольку за счет лантаноидного сжатия $4f$ -электроны оказываются сильно локализованными вблизи ядра. В таком случае следовало бы ожидать, что введение в позиции атомов лантана атомов гадолиния приведет к тому, что магнитная восприимчивость не будет зависеть от концентрации f -элемента. Однако исследования, проведенные для других лантаноидов в аллюминате лантана выявили уменьшение магнитной восприимчивости с концентрацией, т. е. наблюдается эффект магнитного разбавления [27–30]. Наименее значительно этот эффект проявляется в случае аллюминатов лантана, допированных церием и европием (см. рисунок).

Для гадолиния уменьшение магнитной восприимчивости с увеличением его доли в аллюминате лантана выражено очень отчетливо и свидетельствует о том, что атомы гадолиния принимают участие в антиферромагнитном

обмене, очевидно, через орбитали атомов кислорода. Можно полагать, что степень участия f -элементов в обмене связана с количеством неспаренных f -электронов. Если атомы редкоземельных элементов могут принимать участие в магнитном обмене, то необходимо принимать его во внимание при рассмотрении магнитных свойств допированных манганитов лантана, а в конечном итоге, – и магниторезистивности подобных систем.

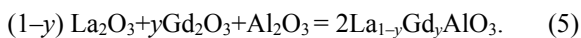
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Твердые растворы $\text{La}_{1-y}\text{E}_y\text{AlO}_3$ ($\text{E} = \text{Ce}, \text{Eu}, \text{Yb}$; $y = 0.02, 0.03, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) получены керамическим методом. Исходные вещества – оксиды лантана, редкоземельных элементов (церия, европия, иттербия) марки ОСЧ – и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, полученный путем термического разложения нитрата алюминия марки ЧДА, смешивали в соотношениях, соответствующих уравнению твердофазной реакции (4).



Исходные вещества в стехиометрических количествах гомогенизировали в яшмовой ступке 1 ч. Полученный порошок таблетировали при помощи пресс-формы из органического стекла и прокаливали 50 ч при 1450°C . Для получения твердых растворов с распределением атомов в кристаллической решетке, близким к равновесному, образцы прокаливали до постоянства магнитной восприимчивости.

Синтез твердых растворов $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$ ($y = 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.10, 0.15$) проводили золь-гель методом. Согласно методике золь-гель синтеза, стехиометрические количества исходных веществ, рассчитанные по уравнению твердофазной реакции (5), растворяли в растворе азотной кислоты (1:1) при нагревании на песчаной бане.



После полного растворения исходных веществ и понижения кислотности раствора до значений $\text{pH} \sim 6-7$ в раствор добавляли лимонную кислоту и этиленгликоль в количествах, рассчитанных по формуле (6).

$$n(\text{CH}_2\text{OH})_2 = n(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7) = \sum z_i n_i. \quad (6)$$

Здесь z_i – заряд катиона i -го металла; n_i – число молей i -го металла.

После высушивания геля полученный порошок таблетировали и прокаливали 40 ч при 1450°C до

получения однофазных твердых растворов, близким к равновесным.

Полученные образцы подвергали рентгенофазовому анализу. Рентгенофазовый анализ проводили в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета «Рентгенодифракционные методы исследования» на рентгеновском порошковом дифрактометре Rigaku MINIFLEX, с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Порошкограммы идентифицировали с использованием базы PDF2. По данным РФА, все полученные твердые растворы однофазны и имеют структуру перовскита.

Определение мольной доли атомов редкоземельных элементов в твердых растворах $\text{La}_{1-y}\text{Gd}_y\text{AlO}_3$ проводили с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICP-AES Optima 7000 DV (PerkinElmer, США). Градуировочный график для определения мольной доли гадолиния строили по растворам, полученным путем перевода рассчитанного количества оксидов редкоземельных элементов в азотнокислый раствор. Погрешность измерения мольной доли атомов гадолиния не превышала 5% от величины y в формуле твердого раствора.

Измерение магнитной восприимчивости проводили по методу Фарадея в интервале температур $77-400\text{ K}$ при 16 фиксированных значениях температуры. Погрешность измерения не превышала 1%.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volger J. // Physica. 1950. Vol. 20. P. 49. doi 10.1016/S0031-8914(54)80015-2
2. Van Santen J., Jonker G. // Physica. 1950. Vol. 16. P. 599. doi 10.1016/0031-8914(50)90033-4
3. Zener C. // Phys. Rev. 1951. Vol. 82. N 3. P. 403. doi 10.1103/PhysRev.81.440
4. Jin S., Tiefel T., McCormack M. // Science. 1994. Vol. 264. P. 413. doi 10.1126/science.264.5157.413
5. Wollan E.O., Koehler W.C. // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. N 2. P. 545. doi 10.1103/PhysRev.100.545
6. Elghoul A., Krichene A., Chniba N., Boudjada, W. Boujelben // Ceramics Int. 2018. Vol. 44. P. 12723. doi 10.1016/j.ceramint.2018.04.075

7. Zarifi M., Kameli P., Ehsani M.H., Ahmadvand H., Salamati H. // *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 718. P. 443. doi 10.1016/j.jallcom.2017.05.196
8. Vadnala S., Asthana S. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2018. Vol. 446. P. 68. doi 10.1016/j.jmmm.2017.09.001
9. Mleiki A., M'nassri R., Cheikhrouhou-Koubaa W., Cheikhrouhou A, Hlil E.K. // *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 727. P. 1203. doi 10.1016/j.jallcom.2017.08.236
10. Ehsani M.H., Raoufi T., Razavi F.S. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. Vol. 475. P. 484. doi 10.1016/j.jmmm.2018.11.131
11. Saravanan C., Thiyagarajan R., Kanjariya P.V., Sivaprakash P., Bhalodia J.A., Arumugam S. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. Vol. 476. P. 35. doi 10.1016/j.jmmm.2018.12.057
12. Krichene A., Boujelben W., Cheikhrouhou A // *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 550. P. 75. doi 10.1016/j.jallcom.2012.09.036
13. Chen L., Fan J., Yang Y.-E., Qian F., Yang H., Hu D., Liu J., Ji Y., Tong W., Ling L., Zhang L., Pi L., Zhang Y., Yang H. // *Mater. Chem. Phys.* 2018. Vol. 212. P. 230. doi 10.1016/j.matchemphys.2018.03.027
14. Ben Jazia K., Khirouni K., Boujelben W. // *Phys. Lett. (A)*. 2018. Vol. 382. N 48. P. 3435. doi 10.1016/j.physleta.2018.10.010
15. Cai H.L., Wu X.S., Wang F.Z., Hu A., Jiang S.S., Gao J., Tan W.S. // *J. Alloys Compd.* 2005. Vol. 39. P. 250. doi 10.1016/j.jallcom.2004.11.068
16. Aslam A., Hasanain S.K., Akhtar M.J., Nadeem M. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2006. Vol. 301. P. 79. doi 10.1016/j.jmmm.2005.06.012
17. Liu J., Meng J., Liang J., Duan X., Huo X., Tang Q. // *Mater. Res. Bull.* 2015. Vol. 66. P. 26. doi 10.1016/j.materresbull.2015.02.016
18. Deng Y., Zhang K., Shi X., Dong T., Yang L., Yang W., Hong M., Wang Y., Dargusch M., Chen Zh.-G. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. Vol. 476. P. 35. doi 10.1016/j.jmmm.2018.12.057
19. Чежина Н.В., Федорова А.В., Мусатов С.М. // *ЖОХ*. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 1419; *Chezhina N.V., Fedorova A., Musatov S.M.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2013. Vol. 86. N 9. P. 1645. doi 10.1134/S107036321309003X
20. Чежина Н.В., Федорова А.В. // *ЖОХ*. 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 705; *Chezhina N.V., Fedorova A.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2007. Vol. 77. N 5. P. 705. doi 10.1134/S1070363210020015
21. Чежина Н.В., Федорова А.В. // *ЖОХ*. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 1962; *Chezhina N.V., Fedorova A.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2014. Vol. 84. N 12. P. 2382. doi 10.1134/S1070363214120044
22. Чежина Н.В., Федорова А.В. // *ЖОХ*. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 181; *Chezhina N.V., Fedorova A.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2010. Vol. 80. N 5. P. 909. doi 10.1134/S1070363210050075
23. Чежина Н.В., Федорова А.В. // *ЖОХ*. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 177; *Chezhina N.V., Fedorova A.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2010. Vol. 80. N 2. P. 203. doi 10.1134/S1070363210020015
24. Shannon R.D., Prewitt C.T. // *Acta Cryst. (B)*. 1969. Vol. 25. P. 925. doi 10.1107/S0567740869003220
25. Ракитин Ю., Калинин В. Современная магнетохимия. СПб: Наука, 1994. 276 с.
26. Шаров В.А., Базуев Г.В., Зуев М.Г., Бамбуров В.Г. Комплексы оксалатов 3d- и 4f-элементов с гидразином. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 178 с.
27. Федорова А.В., Чежина Н.В., Шиловских В.В. // *ЖОХ*. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 1589; *Fedorova A.V., Chezhina N.V., Shilovskikh V.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2015. Vol. 85. N 10. P. 2223. doi 10.1134/S1070363215100011
28. Федорова А.В., Чежина Н.В., Сухенко К.Ю. // *ЖОХ*. 2016. Т. 86. Вып. 7. С. 1072; *Fedorova A.V., Chezhina N.V., Sukhenko K.Yu.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2016. Vol. 86. N 7. P. 1552. doi 10.1134/S1070363216070033
29. Пономарева Е.А., Федорова А.В., Чежина Н.В. // *ЖОХ*. 2017. Т. 87. Вып. 1. С. 1908; *Ponomareva E.A., Fedorova, A.V., Chezhina N.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2017. Vol. 87. N 11. P. 2730. doi 10.1134/S1070363217110329
30. Федорова А.В., Пономарева Е.А., Чежина Н.В. // *ЖОХ*. 2018. Т. 88. Вып. 12. С. 1951; *Fedorova, A.V., Ponomareva E.A., Chezhina N.V.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. N 12. P. 2472. doi 10.1134/S1070363218120034

Exchange Interactions Between Rare-Earth Elements Atoms in a Perovskite Structure

A. V. Fedorova* and N. V. Chezhina

St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg, 199034 Russia

**e-mail: avfedorova@gmail.com*

Received March 20, 2019; revised March 20, 2019; accepted March 23, 2019

Solid solutions of lanthanum aluminates, including rare-earth elements (cerium, europium, gadolinium and ytterbium), were studied by the magnetic dilution method. Lanthanides atoms in the perovskite structure enter into exchange interactions.

Keywords: perovskite structure, lanthanides, magnetic susceptibility