

ISSN 0002–354X (print)

УДК 536.424

Поступило в редакцию 25.01.2017

Received 25.01.2017

**Член-корреспондент И. О. Троянчук<sup>1</sup>, М. В. Бушинский<sup>1</sup>, Г. М. Чобот<sup>2</sup>, А. В. Никитин<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь***МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
В ПЕРОВСКИТАХ  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0,2$ )**

Перовскиты  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0,2$ ) были исследованы методами дифракции нейтронов, измерения намагниченности и магниторезистивного эффекта. Показано, что ионы никеля и марганца частично упорядочены во всех составах, несмотря на замещение ионов  $\text{La}^{3+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$  и повышение средней валентности ионов никеля. Магнитная структура изменяется от ферромагнитной ( $x = 0$ ) к антиферромагнитной ( $x \geq 0,1$ ), однако температура перехода в парамагнитное состояние не меняется. Магнитосопротивление в ферромагнитной фазе большое и уменьшается с ростом температуры и увеличением отношения  $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{2+}$ . Результаты обсуждаются в модели, согласно которой ферромагнитная и антиферромагнитная части обменных взаимодействий  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$  близки по величине, тогда как для  $\text{Ni}^{3+}\text{--O--Mn}^{4+}$  сверхобменное взаимодействие антиферромагнитно.

*Ключевые слова:* магнитные материалы, дифракция, магниторезистивный эффект, обменное взаимодействие.

**Corresponding Member I. O. Troyanchuk<sup>1</sup>, M. V. Bushinsky<sup>1</sup>, G. M. Chobot<sup>2</sup>, A. V. Nikitin<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus***MAGNETIC PHASE TRANSITIONS IN  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.2$ ) PEROVSKITES**

The  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.2$ ) perovskites have been studied by the methods of neutron powder diffraction and magnetization and by magnetoresistance measurement. It was shown that Ni and Mn ions are partially ordered in spite of the presence of  $\text{Ni}^{3+}$  ions arising from  $\text{La}^{3+}$  with  $\text{Sr}^{2+}$  substitution. The magnetic structure changes from ferromagnetic ( $x = 0$ ) to antiferromagnetic ( $x \geq 0.1$ ); however, the transition temperature into the paramagnetic state is constant. Magnetoresistance in the ferromagnetic phase is large and gradually decreases with increasing temperature and  $\text{Sr}^{2+}$  content. The results are discussed in terms of close in value ferromagnetic and antiferromagnetic parts of  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$  magnetic interactions and the enforcement of 3d-O2p orbital hybridization in the magnetic field.

*Keywords:* magnetic materials, diffraction, magnetoresistive effect, exchange interactions.

**Введение.** Твердые растворы со структурой перовскита на основе марганца, никеля или кобальта являются интересными объектами благодаря большому разнообразию физических свойств, которые во многом еще не поняты. Ферромагнитные и металлические свойства манганитов и кобальтитов возникают благодаря замещению  $\text{La}^{3+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$  и, как следствие, появлению разновалентных ионов марганца или кобальта в твердых растворах  $\text{La}_{1-x}^{3+}\text{Sr}_x^{2+}\text{Mn}(\text{Co})\text{O}_3$  [1–4]. Однако есть другой путь получения диэлектрического ферромагнитного состояния путем замещения ионов марганца в антиферромагнитном  $\text{La}^{3+}\text{Mn}^{3+}\text{O}_3$  ионами никеля или кобальта [5–8]. Максимальные точки Кюри получены при 50 %-ном замещении, что связывается со структурным упорядочением ионов марганца и кобальта (никеля) [5–9]. Однако в зависимости от условий синтеза можно получить сильный разброс значений точек Кюри, которые достигают 280 К для  $\text{LaMn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$  [8; 9] и 230 К для  $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$  [6] в упорядоченных составах. В [10] предположено, что в низкотемпературных магнитных фазах 3d-ионы находятся преимущественно в трехвалентном состоянии, тогда как в высокотемпературной фазе доминируют ионы  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  ( $\text{Co}^{2+}$ ), которые структурно упорядочены [11]. Однако методом ХМCD показано [6], что в обеих магнитных фазах  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  ( $\text{Co}^{2+}$ ) ионные состояния являются доминирующими, что косвенно указывает на то, что структурное упорядочение разновалентных ионов играет важную роль. Не-

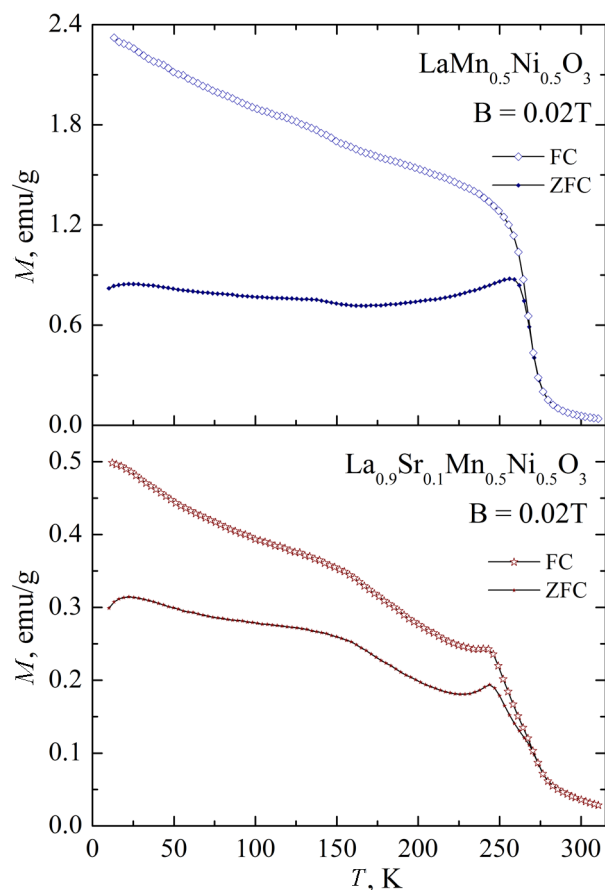


Рис. 1. ZFC- и FC-намагниченности составов  $x = 0$  и  $x = 0,1$  в зависимости от температуры

Fig. 1. ZFC- and FC-magnetizations of the compositions  $x = 0$  and  $x = 0.1$  as a function of temperature

$\text{La}_2\text{O}_3$  был прокален на воздухе при  $1050\text{ }^\circ\text{C}$ . Затем исходные оксиды смешивались в стехиометрическом соотношении, перемалывались в планетарной мельнице RETCH-100 в течение 30 мин. Предварительный синтез проводился при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  на воздухе. Окончательный – при  $1420\text{ }^\circ\text{C}$  на воздухе в течение 7 ч с последующим охлаждением в течение 12 ч до  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Фазовый состав определялся с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М в  $\text{Cu K}_\alpha$ -излучении. Нейтронографические исследования проведены на дифрактометре E9 в Helmholtz-Zentrum for Materials and Energy (Берлин). Длина волны нейтронов  $\lambda = 1,7982\text{ \AA}$ . Экспериментальные данные были обработаны методом Ритвельда, используя программу FullProf. Магнитные и магниторезистивные измерения выполнены на универсальной измерительной установке физических свойств (Cryogenic Ltd) в магнитных полях до 14 Тл и в интервале температур 5–300 К. При измерении электропроводности 4-зондовым методом в качестве контактов использовался индий, нанесенный с помощью ультразвукового паяльника.

**Результаты и их обсуждение.** Рентгеновский фазовый анализ в образцах  $0 \leq x \leq 0,15$  не выявил наличия примесей других фаз, тог-

обходимо отметить, что разные методы исследования структурного упорядочения ионов дают противоречивые результаты. Так, согласно нейтронографическим исследованиям составов с высокой точкой Кюри ( $T_c$ ), наблюдается достаточно высокая степень упорядочения разновалентных ионов [11], тогда как исследования методом электронной спектроскопии высокого разрешения позволили только в небольшом количестве зерен выявить несовершенную кристаллическую структуру, обусловленную корреляциями в расположении ионов [12].

При замещении части ионов  $\text{La}^{3+}$  ионами  $\text{Sr}^{2+}$  должен произойти сдвиг баланса зарядовых состояний от  $\text{Ni}^{2+}$  к  $\text{Ni}^{3+}$  при условии сохранения стехиометрии. При этом можно предположить, что зарядовое упорядочение должно разрушиться вследствие появления ионов  $\text{Ni}^{3+}$ . Ожидается, что такой метод замещения позволит выявить роль кристаллоструктурного упорядочения ионов никеля и марганца в магнетизме этих соединений, а также установить знак и оценить величину обменных взаимодействий между ионами Ni и Mn.

**Материалы и методы исследования.** Твердые растворы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5})\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0,2$ ) получены из оксидов и карбонатов высокой чистоты  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{NiO}$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  методом твердофазных реакций. Для удаления влаги

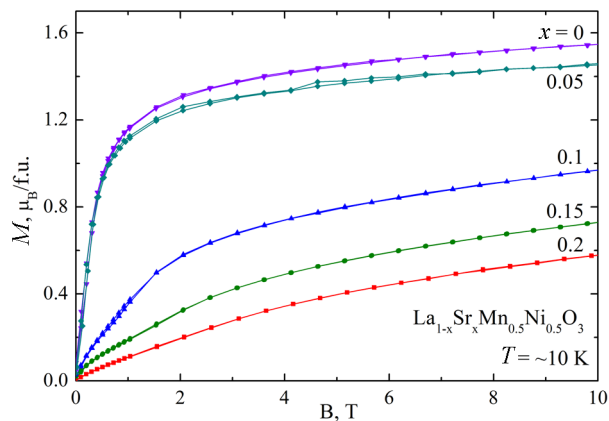


Рис. 2. Полевые зависимости намагниченности  
Fig. 2. Field magnetization dependences

да как в образце  $x = 0,2$  обнаружено небольшое количество примесной фазы NiO. Параметры элементарной ячейки всех образцов в интервале  $0 \leq x \leq 0,2$  были рассчитаны, предполагая ромбоэдрическую структуру (пространственная группа  $R\bar{3}c$ ). Объем элементарной ячейки уменьшался с ростом содержания  $Sr^{2+}$ . Это свидетельствует о повышении окислительного состояния ионов никеля, так как ионный радиус  $La^{3+}$  значительно меньше, чем ионный радиус  $Sr^{2+}$ , тогда как ионный радиус  $Ni^{3+}$  значительно меньше ионного радиуса  $Ni^{2+}$ .

На рис. 1 показана температурная зависимость FC (охлаждение в поле) и ZFC (охлаждение без поля) намагниченностей образцов  $x = 0$  и  $x = 0,1$ , измеренных в малых магнитных полях. Полученный нами  $LaMn_{0,5}Ni_{0,5}O_3$  является ферромагнетиком с  $T_c$  около 270 К (рис. 1). Неожиданно оказалось, что критическая температура перехода в парамагнитное состояние не уменьшалась по мере роста содержания стронция (рис. 1). Этот факт находится в контрасте с резким уменьшением по мере роста содержания  $Sr^{2+}$  спонтанной намагниченности при низкой температуре. Спонтанная намагниченность практически отсутствует в составах  $x \geq 0,15$  (рис. 2). Отсутствие насыщения намагниченности в больших магнитных полях свидетельствует о конкуренции разного знака обменных магнитных взаимодействий, которые при замещении  $La^{3+}$  на  $Sr^{2+}$ , по-видимому, становятся преимущественно антиферромагнитными.

Согласно исследованиям электрических свойств все составы являются полупроводниковыми с высоким электросопротивлением при относительно низких температурах –  $10^7$ – $10^8$  Ом·см. В точках перехода в магнитоупорядоченное состояние аномалий электропроводности не обнаружено. Магниторезистивный эффект имеет большее значение при низких температурах и постепенно уменьшается с повышением температуры, а также ростом содержания стронция при  $x \geq 0,1$  (рис. 3). В точке Кюри увеличения магниторезистивного эффекта не наблюдалось. В отличие от работы [8], мы не обнаружили низкополевого туннельного магниторезистивного эффекта ни при каких температурах. Это можно объяснить тем, что носители заряда относительно слабо поляризованы по спину и магниторезистивный эффект, возможно, связан с кристаллоструктурным и магнитным беспорядком и гибридизацией  $3d$ - $O2p$  орбиталей, которая усиливается в магнитном поле.

Нейтроннографические дифракционные исследования составов  $x = 0,1$  и  $x = 0,2$  были проведены в интервале температур 4–300 К. Нейтронный дифракционный спектр состава  $x = 0,1$  приведен на рис. 4 при температурах 4 и 300 К. При температуре 300 К дифракционные пики были успешно проиндексированы на основе ромбоэдрической пространственной группы  $R\bar{3}$ . Это означает, что ионы марганца и никеля кристаллоструктурно упорядочены. Ниже температуры 300 К наблюдался заметный рост пика (101), вклад в который дает кристаллоструктурное и магнитное упорядочение. Увеличение интенсивности этого пика указывает на антиферромагнитное упорядочение G-типа (шахматный магнитный порядок). Рост интенсивности этого пика практически совпадает с высокотемпературной аномалией магнитных свойств и появлением спонтанной на-

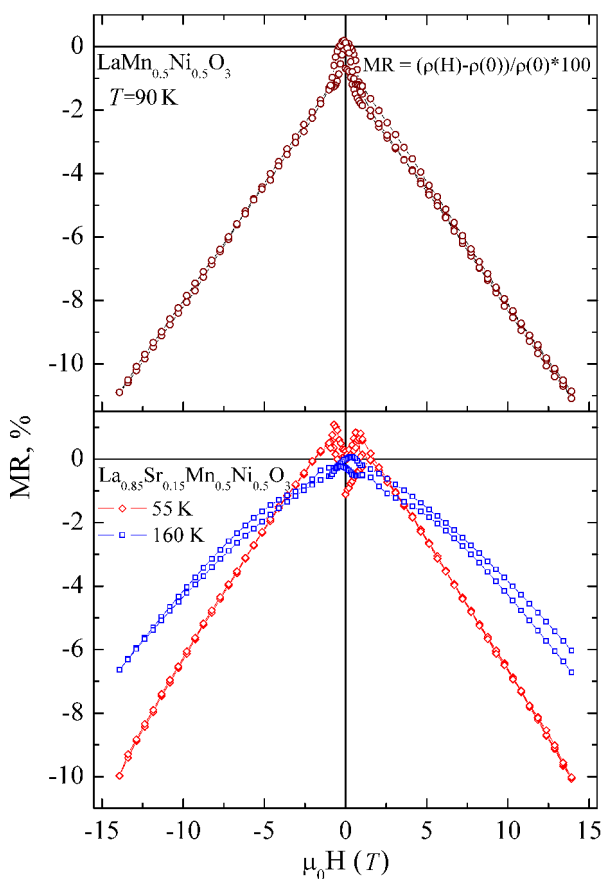


Рис. 3. Полевые зависимости магниторезистивного эффекта составов  $x = 0$  и  $x = 0,15$

Fig. 3. Field dependences of the magnetoresistance effect of the compositions  $x = 0$  and  $x = 0,15$

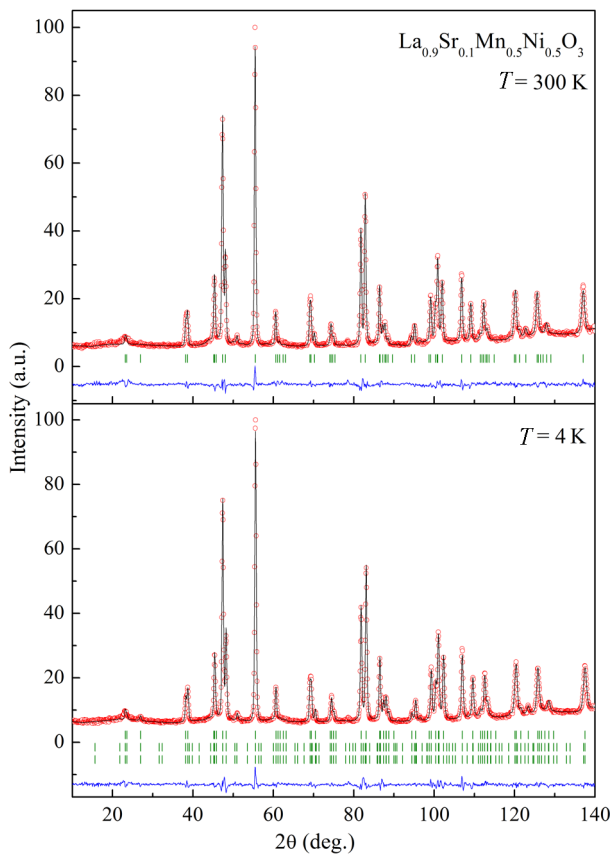


Рис. 4. Рассчитанные и экспериментально определенные дифракционные спектры состава  $x = 0,1$  при  $T = 4$  и  $300$  К. Нижняя кривая показывает их разность. Верхние штрихи относятся к кристаллоструктурной фазе, нижние – к антиферромагнитной и ферромагнитной фазам

Fig. 4. Predicted and experimental diffraction spectra of the composition  $x = 0.1$  at  $T = 4$  and  $300$  K. The lower curve denotes their difference. The upper primes refer to the crystal-structural phase, the lower ones – the antiferromagnetic and ferromagnetic phases

всегда антиферромагнитны, также как и взаимодействия между ионами  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Ni}^{2+}$  [13]. Поэтому считается, что ферромагнетизм  $\text{LaMn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$  возникает вследствие положительного обменного взаимодействия между  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$ . Однако магнитный момент синтезированного нами соединения с  $x = 0$  существенно ниже рассчитанного в ионной модели. Наиболее вероятная интерпретация этого экспериментального факта заключается в том, что образец состоит не только из структурно упорядоченных областей, где доминируют ионы никеля в состоянии  $\text{Ni}^{2+}$  и ионы марганца в состоянии  $\text{Mn}^{4+}$ . В этих областях количество обменных связей оптимально, намагниченность, а также температура Кюри большие. В других областях, где в существенном количестве находятся ионы  $\text{Ni}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{3+}$ , структурное упорядочение  $\text{Ni}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{3+}$  разрушается, появляются антиферромагнитные связи и температура Кюри и намагниченность уменьшаются. Ионы  $\text{Sr}^{2+}$  переводят все ионы марганца в четырехвалентное состояние и тенденция к ионному упорядочению сохраняется несмотря на присутствие ионов  $\text{Ni}^{3+}$ , которые, по-видимому, антиферромагнитно взаимодействуют с ионами  $\text{Mn}^{4+}$ . В случае, когда величина части положительного обменного взаимодействия  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$  близка к величине части антиферромагнитного обмена  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$ , может реализоваться суммарная антиферромагнитная структура приблизительно с такой же температурой перехода в парамагнитное состояние, как и в ферромагнитно упорядоченном образце, не замещенном ионами  $\text{Sr}^{2+}$ , так как кристаллоструктурное упорядочение сохраняется.

магнитности. Следует отметить, что ширина пика (101) намного больше ширины других дифракционных пиков. Это указывает на наноструктурно неоднородный характер упорядочения ионов никеля и марганца и их магнитных моментов. Результаты расчета магнитной и кристаллической структур представлены в таблице. Наблюдалось хорошее соответствие экспериментальных и рассчитанных данных. Уточненное значение содержания анионов кислорода соответствует стехиометрическому значению. Это означает, что часть ионов никеля находится в трехвалентном состоянии, а весь марганец является четырехвалентным. Антиферромагнитный момент при  $4$  К равен  $\pm 0,4\mu_B$  на формульную единицу, что значительно меньше, чем можно ожидать в однородной магнитной структуре. Структурные параметры соединения  $x = 0,2$  близки к параметрам состава  $x = 0,1$ , однако антиферромагнитный момент несколько больше –  $0,7\mu_B$ , тогда как объем элементарной ячейки меньше.

В составе  $x = 0,1$  был обнаружен магнитный вклад в рефлекс (102). Это означает наличие ферромагнитной компоненты. Оцененная величина ферромагнитной компоненты равна  $0,9\mu_B$  на формульную единицу (таблица).

Для того чтобы понять изменение магнитных свойств этой системы при замещении  $\text{La}^{3+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$ , необходимо знать знак и величину обменных взаимодействий между  $3d$ -ионами, входящими в решетку структуры перовскита. Взаимодействия между ионами  $\text{Mn}^{4+}\text{--O--Mn}^{4+}$

**Кристаллоструктурные и магнитные параметры состава  $x = 0,1$ , определенные из дифракции нейтронов по методу Ритвельда**

**Crystal-structural and magnetic parameters of the composition  $x = 0.1$  determined from the neutron diffraction by the Rietveld method**

Temperature (K)	4	300
Space group	<i>R</i> -3	<i>R</i> -3
<i>a</i> (Å)	5,4911(1)	5,4950(1)
<i>c</i> (Å)	13,2014(2)	13,2437(2)
<i>V</i> (Å <sup>3</sup> )	344,728(6)	346,317(7)
La/Sr: <i>x</i>	0	0
<i>y</i>	0	0
<i>z</i>	0,2509(3)	0,2519(4)
<i>Biso</i> (Å <sup>2</sup> )	0,12(4)	0,55(4)
*Mn: ( <i>x y z</i> )	(0 0 ½)	(0 0 ½)
<i>Biso</i> (Å <sup>2</sup> )	0,43(7)	0,53(7)
*Ni: ( <i>x y z</i> )	(0 0 0)	(0 0 0)
<i>Biso</i> (Å <sup>2</sup> )	0,43(7)	0,53(7)
O: <i>x</i>	0,5501(5)	0,5468(5)
<i>y</i>	–0,0018(9)	–0,0049(8)
<i>z</i>	0,2506(3)	0,2508(3)
<i>Biso</i> (Å <sup>2</sup> )	0,44(3)	0,81(3)
$\mu_F$ (μ <sub>B</sub> )	0,9	–
$\mu_{AF}$ (μ <sub>B</sub> )	0,4	–
$\chi^2/R_{wp}$ (%)	2,30/4,12	2,65/4,37
$R_{Bragg}$ (%) / $R_{mag}$ (%)	2,68/47,4	5,47/–

Примечание. \* – уточненное количество антисайтовских дефектов составляет 34 %.

Note. \* – the refined number of anti-site defects is 34 %.

**Заклучение.** Проведено исследование магнитных и транспортных свойств соединения  $\text{LaMn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_3$  с замещением ионов  $\text{La}^{3+}$  на ионы  $\text{Sr}^{2+}$ , используя методы измерения дифракции нейтронов, намагниченности и магниторезистивного эффекта. Показано, что легирование ионами  $\text{Sr}^{2+}$  ведет к изменению основного магнитного состояния из ферромагнитного к антиферромагнитному даже при небольшом замещении ионов  $\text{La}^{3+}$  на ионы  $\text{Sr}^{2+}$ . При этом температура Кюри нелегированных составов совпадает с температурой Нееля составов, легированных ионами  $\text{Sr}^{2+}$ . Магниторезистивный эффект уменьшается с ростом температуры и увеличением содержания  $\text{Sr}^{2+}$ . Результаты объясняются в модели, согласно которой положительная часть обменного взаимодействия  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$  близка по величине к отрицательной части обменного взаимодействия  $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$ , тогда как обменное взаимодействие  $\text{Ni}^{3+}\text{--O--Mn}^{4+}$  является отрицательным. Большой отрицательный магниторезистивный эффект связан с наличием структурного и магнитного беспорядка и относительно большой гибридизацией 3d-O2p состояний, усиливающейся во внешнем магнитном поле.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф15Д-002).

**Acknowledgement.** The work has been financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant no. Ф15Д-002).

**Список использованных источников**

1. Raccah, P. First-Order Localized-Electron  $\rightleftharpoons$  Collective-Electron Transition in  $\text{LaCoO}_3$  / P. M. Raccah, J. B. Goodenough // Phys. Rev. – 1967. – Vol. 155, N 3. – P. 932–943. doi.org/10.1103/physrev.155.932.
2. Señaris-Rodríguez, M. A. Magnetic and Transport Properties of the System  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$  ( $0 < x \leq 0.50$ ) / M. A. Señaris-Rodríguez, J. B. Goodenough // J. Solid State Chem. – 1995. – Vol. 118, N 2. – P. 323–336. doi.org/10.1006/jssc.1995.1351.

3. Zhou, J.-S. Paramagnetic phase in single-crystal  $\text{LaMnO}_3$  / J.-S. Zhou, J. B. Goodenough // *Phys. Rev. B.* – 1999. – Vol. 60, N 22. – P. 15002–15004. doi.org/10.1103/physrevb.60.r15002.
4. Tokura, Y. Critical features of colossal magnetoresistive manganites / Y. Tokura // *Rep. Prog. Phys.* – 2006. – Vol. 69, N 3. – P. 797–851. doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/r06.
5. Magnetic phase diagrams of the  $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$  (Ln=Eu, Nd, Y) systems / I. O. Troyanchuk [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88, N 1. – P. 360–367. doi.org/10.1063/1.373668.
6. Local electronic structure and magnetic properties of  $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$  studied by *x*-ray absorption and magnetic circular dichroism spectroscopy / T. Burnus [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77, N 12. – P. 125124. doi.org/10.1103/physrevb.77.125124.
7. Valence states and metamagnetic phase transition in partially *B*-site-disordered perovskite  $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$  / A. N. Vasiliev [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77, N 10. – P. 104442. doi.org/10.1103/physrevb.77.104442.
8. Near room-temperature magnetoresistance effect in double perovskite  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$  / Yuqiao Guo [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102, N 22. – P. 222401. doi.org/10.1063/1.4808437.
9. Tunable exchange bias effect in Sr-doped double perovskite  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$  / Yuqiao Guo [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 46, N 17. – P. 175302. doi.org/10.1088/0022-3727/46/17/175302.
10. Joseph Joly, V. L. Effect of R on the magnetic transition temperature of  $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$  / V. L. Joseph Joly, P. A. Joy, S. K. Date // *Solid State Com.* – 2002. – Vol. 121, N 4. – P. 219–222. doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2.
11. Colossal magnetoresistance without  $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$  double exchange in the stoichiometric pyrochlore  $\text{Ti}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$  / M. A. Subramanian [et al.] // *Science.* – 1996. – Vol. 273, N 5271. – P. 81–84. doi.org/10.1126/science.273.5271.81.
12. Giant frequency dependence of dynamic freezing in nanocrystalline ferromagnetic  $\text{LaCo}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$  / R. Mahendiran [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 68, N 10. – P. 104402. doi.org/10.1103/physrevb.68.104402.
13. Goodenough, J. B. Theory of the Role of Covalence in the Perovskite-Type Manganites  $[\text{La}, \text{M}(\text{II})]\text{MnO}_3$  / J. B. Goodenough // *Phys. Rev.* – 1955. – Vol. 100, N 2. – P. 564–573. doi.org/10.1103/physrev.100.564.

## References

1. Raccah P., Goodenough J. B. First-Order Localized-Electron  $\rightleftharpoons$  Collective-Electron Transition in  $\text{LaCoO}_3$ . *Physical Review*, 1967, vol. 155, no. 3, pp. 932–943. doi.org/10.1103/physrev.155.932.
2. Señaris-Rodríguez M. A., Goodenough J. B. Magnetic and Transport Properties of the System  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$  ( $0 < x \leq 0.50$ ). *Journal of Solid State Chemistry*, 1995, vol. 118, no. 2, pp. 323–336. doi.org/10.1006/jssc.1995.1351.
3. Zhou J.-S., Goodenough J. B. Paramagnetic phase in single-crystal  $\text{LaMnO}_3$ . *Physical Review B*, 1999, vol. 60, no. 22, pp. 15002–15004. doi.org/10.1103/physrevb.60.r15002.
4. Tokura Y. Critical features of colossal magnetoresistive manganites. *Reports on Progress in Physics*, 2006, vol. 69, no. 3, pp. 797–851. doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/r06.
5. Troyanchuk I. O., Khalyavin D. D., Lynn J. W., Erwin R. W., Huang Q., Szymczak H., Szymczak R., Baran M. Magnetic phase diagrams of the  $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$  (Ln=Eu, Nd, Y) systems. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 1, pp. 360–367. doi.org/10.1063/1.373668.
6. Burnus T., Hu Z., Hsieh H. H., Joly V. L. J., Joy P. A., Haverkort M. W., Hua Wu, Tanaka A., Lin H.-J., Chen C. T., Tjeng L. H. Local electronic structure and magnetic properties of  $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$  studied by *x*-ray absorption and magnetic circular dichroism spectroscopy. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 12, pp. 125124. doi.org/10.1103/physrevb.77.125124.
7. Vasiliev A. N., Volkova O. S., Lobanovskii L. S., Troyanchuk I. O., Hu Z., Tjeng L. H., Khomskii D. I., Lin H.-J., Chen C. T., Tristan N., Kretzschmar F., Klingeler R., Büchner B. Valence states and metamagnetic phase transition in partially *B*-site-disordered perovskite  $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ . *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 10, pp. 104442. doi.org/10.1103/physrevb.77.104442.
8. Yuqiao Guo, Lei Shi, Shiming Zhou, Jiyin Zhao, Wenjie Liu. Near room-temperature magnetoresistance effect in double perovskite  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ . *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 102, no. 22, pp. 222401. doi.org/10.1063/1.4808437.
9. Yuqiao Guo, Lei Shi, Shiming Zhou, Jiyin Zhao, Cailin Wang, Wenjie Liu, Shiqiang Wei. Tunable exchange bias effect in Sr-doped double perovskite  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ . *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, no. 17, pp. 175302. doi.org/10.1088/0022-3727/46/17/175302.
10. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K. Effect of R on the magnetic transition temperature of  $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ . *Solid State Communications*, 2002, vol. 121, no. 4, pp. 219–222. doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2.
11. Subramanian M. A., Toby B. H., Ramirez A. P., Marshall W. J., Sleight A. W., Kwei G. H. Colossal magnetoresistance without  $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$  double exchange in the stoichiometric pyrochlore  $\text{Ti}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ . *Science*, 1996, vol. 273, no. 5271, pp. 81–84. doi.org/10.1126/science.273.5271.81.
12. Mahendiran R., Bréard Y., Hervieu M., Raveau B., Schiffer P. Giant frequency dependence of dynamic freezing in nanocrystalline ferromagnetic  $\text{LaCo}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ . *Physical Review B*, 2003, vol. 68, no. 10, pp. 104402. doi.org/10.1103/physrevb.68.104402.
13. Goodenough J. B. Theory of the Role of Covalence in the Perovskite-Type Manganites  $[\text{La}, \text{M}(\text{II})]\text{MnO}_3$ . *Physical Review*, 1955, vol. 100, no. 2, pp. 564–573. doi.org/10.1103/physrev.100.564.

### Информация об авторах

*Троянчук Игорь Олегович* – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: troyan@physics.by.

*Бушинский Максим Владиславович* – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: byshinsky@physics.by.

*Чобот Геннадий Михайлович* – канд. физ.-мат. наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

*Никитин Александр Владимирович* – мл. науч. сотрудник, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shyrik\_n@tut.by.

### Для цитирования

Магнитные фазовые превращения в перовскитах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.2$ ) / И. О. Троянчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 25–31.

### Information about the authors

*Troyanchuk Igor Olegovich* – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory, Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: troyan@physics.by.

*Bushinsky Maksim Vladislavovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher, Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: byshinsky@physics.by.

*Chobot Henadz Mikhailovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

*Nikitin Alajaksandr Vladimirovich* – Junior researcher, Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shyrik\_n@tut.by.

### For citation

Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Chobot G. M., Nikitin A. V. Magnetic phase transitions in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.2$ ) perovskites. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 25–31 (in Russian).