



DOI: 10.5862/JPM.248.2

УДК: 538.955

П.Ю. Ванина<sup>1</sup>, А.А. Набережнов<sup>1,2</sup>,  
В.И. Нижанковский<sup>3</sup>, Р.Ф. Мамин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Российская Федерация;

<sup>3</sup> Международная лаборатория сильных магнитных полей  
и низких температур, г. Вроцлав, Польша;

<sup>4</sup> Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского  
Казанского научного центра РАН, Российская Федерация

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛАНТАН-СТРОНЦИЕВЫХ МАНГАНИТОВ

Получены температурные зависимости намагниченности  $M(T)$  для мультиферроиков – монокристаллов лантан-стронциевых манганитов  $\text{La}_{0,875}\text{Sr}_{0,125}\text{MnO}_3$  (LSMO-0,125) и  $\text{La}_{0,93}\text{Sr}_{0,07}\text{MnO}_3$  (LSMO-0,07). Определена температура фазового перехода для LSMO-0,07 ( $T_C = 125,8$  (1,5) К), а также температуры двух фазовых переходов ( $T_{C1} = 181,2$  (1,5) К и  $T_{C2} = 157,6$  (1,5) К) для LSMO-0,125. Показано, что фазовые переходы (ФП) при  $T_C$  и  $T_{C1}$  являются ФП второго рода, а ФП при  $T_{C2}$  – первого рода. Из зависимостей  $M(T)$  определены значения магнитных моментов:  $\mu_1 = 2,47(1)$   $\mu_B/\text{Mn}$  и  $\mu_2 = 2,82(1)$   $\mu_B/\text{Mn}$  для LSMO-0,125 и LSMO-0,07 соответственно.

ЛАНТАН-СТРОНЦИЕВЫЙ МАНГАНИТ, МУЛЬТИФЕРРОИК, ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД, МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ, НАМАГНИЧЕННОСТЬ.

### Введение

В конце XX века была обнаружена очень интересная корреляция между индуцированной легированием электропроводностью и ферромагнетизмом для первоначально диэлектрических марганецсодержащих перовскитов  $\text{LaMnO}_3$ , так называемых манганитов, в которых редкоземельный металл замещался щелочноземельным. Исходные трехкомпонентные композиты  $\text{LaMnO}_3$  и  $\text{AMnO}_3$ , где А = Са, Sr или Ва, представляют собой антиферромагнетики, у которых магнитные моменты локализованы на узлах, занимаемых ионами марганца. В случае же четырехкомпонентной стехиометрии вида  $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  с промежуточными составами (с различными значениями  $x$ ) композит становится не только сильным ферромагнетиком, но и проявляет проводимость металлического типа, наблюдаемую ниже

температуры Кюри [1]. Кроме того, данное соединение является материалом с чрезвычайно высокими значениями диэлектрической проницаемости (до  $10^7$ ) и магнетоэлектрического эффекта (до  $10^5$  %), причем уже при комнатной температуре [2].

Структура кубического перовскита  $\text{LaMnO}_3$  представляет собой трехмерный каркас, состоящий из правильных октаэдров  $\text{MnO}_6$ , объединенных кислородными вершинами [3, 4]. В данной структуре  $\text{La}^{3+}$ , больший по размеру катион, расположен в центре куба, образованного кислородными октаэдрами, а меньший по размеру  $\text{Mn}^{3+}$  находится в центре октаэдра. С другой стороны, структура  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с ростом содержания катиона стронция изменяется от орторомбической до ромбоэдрической [5], а в промежуточной области концентраций (при  $x = 0,10 - 0,15$ ) наблюдается необыч-

ное поляронно-упорядоченное состояние. Данное состояние, согласно нейтронографическим данным [6], связано с упорядоченным расположением разновалентных ионов  $Mn^{3+}/Mn^{4+}$  в чередующихся плоскостях (001) и возникновением соответствующей сверхструктуры.

Структура  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  (LSMO- $x$ ) далека от кубического перовскита. Согласно работе [7], данная структура имеет два типа искажений, которые обусловлены

несоответствием размеров катионов размерам соответствующего свободного пространства (первый тип);

эффектом Яна-Теллера (ЯТ) (второй тип) [4, 8].

Эффект ЯТ заключается в уменьшении энергии подобной вырожденной системы ввиду понижения симметрии, снимающей вырождение с электронных уровней.

В соответствии с предположением автора работы [7], второй тип искажений вызван тем, что ион  $Mn^{3+}$  в кубическом кристаллическом поле вырожден по  $d$ -орбиталям, т. е. такое поле расщепляет атомный  $d$ -уровень на двух- и трехкратно вырожденные уровни  $e_g$  и  $t_{2g}$ . Поскольку первый уровень лежит выше второго, уровень  $t_{2g}$  занимает полностью четырема электронами  $d$ -уровня  $Mn^{3+}$ , а уровень  $e_g$  оказывается заполненным лишь частично.

Лантан-стронциевый манганит претерпевает два структурных перехода, однако данные о них сильно различаются. Согласно результатам, полученным авторами работ [5, 9, 10], в LSMO-0,125 высокотемпературный структурный переход происходит при  $T = 270$  К из одной орторомбической структуры в другую с появлением кооперативных искажений второго типа. При дальнейшем понижении температуры при  $T = 150$  К происходит обратный переход к первоначальной структуре с подавлением данных искажений. В то же время из результатов работ [6, 11, 12] следует, что первый переход происходит из орторомбической фазы ( $Pbnm$ ) в моноклинную ( $P2_1/c$ ); а второй – из моноклинной в триклинную ( $P1$ ) [13]. Так например, в высокотемпературной парамагнитной фазе, согласно данным работы [14], LSMO-0,125 принадлежит

орторомбической пространственной группе  $Pnma$  и имеет параметры  $a = 5,5624(6)$  Å,  $b = 7,7360(6)$  Å,  $c = 5,5478(6)$  Å, а по результатам работы [15] данная фаза в LSMO-0,2 принадлежит к ромбоэдрической пространственной группе  $R\bar{3}c$  и имеет следующие параметры ячейки:  $a \approx 5,5$  Å,  $c \approx 1,34$  Å,  $\gamma = 120^\circ$ .

Кристаллы  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$  стали модельным объектом для исследований колоссального магнитосопротивления [16], которое часто связывают с зарядовым и фазовым разделением и перколяцией нанобластей, имеющих металлический тип проводимости [17]. Было предсказано, что эти неоднородные состояния могут появляться даже выше температуры Кюри [17].

Наличие необычных магнетоемкостных свойств открывает возможности практического использования манганитов такого типа. Например, в работе [2] авторы предложили для достижения высоких значений диэлектрической проницаемости и магнетоемкостного эффекта воздействовать на свойства зарядовых неоднородностей в допированных манганитах LSMO- $x$ . Были обнаружены чрезвычайно высокие значения диэлектрической проницаемости (до  $10^7$  в частотном интервале 0,1 – 1 кГц) и магнетоемкостного эффекта (до  $10^5$  %), причем уже при комнатной температуре. Авторы [2] предполагают, что это может быть следствием сильного взаимодействия между зарядовыми, спиновыми и решеточными степенями свободы, приводящего к зарядовому и фазовому разделению в режиме перед порогом перколяции [17].

Несмотря на обширные исследования в данной области, микроскопическое происхождение подобного поведения до сих пор не найдено. Одной из наиболее успешных попыток можно считать исследование, выполненное авторами [5], в котором была построена полная фазовая диаграмма  $T - x$  для LSMO- $x$  с концентрацией  $x$  от 0 до 0,45 и в широком диапазоне температур (4,2 – 1050 К), а также проведены детальные исследования электрических и магнитных свойств монокристаллов LSMO- $x$  в указанном диапазоне концентраций. Температурные исследования свойств LSMO-0,07

и LSMO-0,125 [5] показали, что данные соединения претерпевают разнообразные магнитные и структурные превращения, в число которых входят появление антиферромагнитного и ферромагнитного упорядочения, структурные переходы между сильно- и слабо-искаженной орторомбическими фазами, переход в ромбоэдрическую фазу, а также переход в состояние поляронного упорядочения. Согласно [6], поляронная фаза представляет собой такое упорядоченное расположение ионов  $Mn^{3+}$  и  $Mn^{4+}$ , при котором один из двух чередующихся атомных слоев плоскости (001) содержит только ионы  $Mn^{3+}$ , как в чистом LMO, а другой — оба типа ионов, т. е. дырки [5].

Тем не менее остаются неясными температуры данных переходов, магнитные моменты материалов, род фазовых переходов (ФП), а также практический эффект приложения сильного магнитного поля.

Целью данной работы было получение информации о температурной эволюции магнитных свойств составов LSMO-0,07 и LSMO-0,125 в области температур 4 – 240 К, т. е. именно там, где и наблюдаются необычные макроскопические свойства этих материалов.

### Экспериментальная часть

Исследования проводились на вибрационном магнетометре в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures), г. Вроцлав, Польша. Вес монокристаллических образцов составил 121,95 мг для LSMO-0,125 и 152,8 мг для LSMO-0,07 соответственно. Магнитное поле прикладывалось вдоль оси  $c$ ; измерительное поле составляло 0,2 Тл. Температурные зависимости намагниченности образцов были получены в температурном интервале 4 – 240 К.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлена температурная зависимость намагниченности для образца LSMO-0,07 при охлаждении. Нетрудно заметить, что кривая изменяет свой характер в районе температуры 130 К, что, согласно фазовой диаграмме, полученной в работе

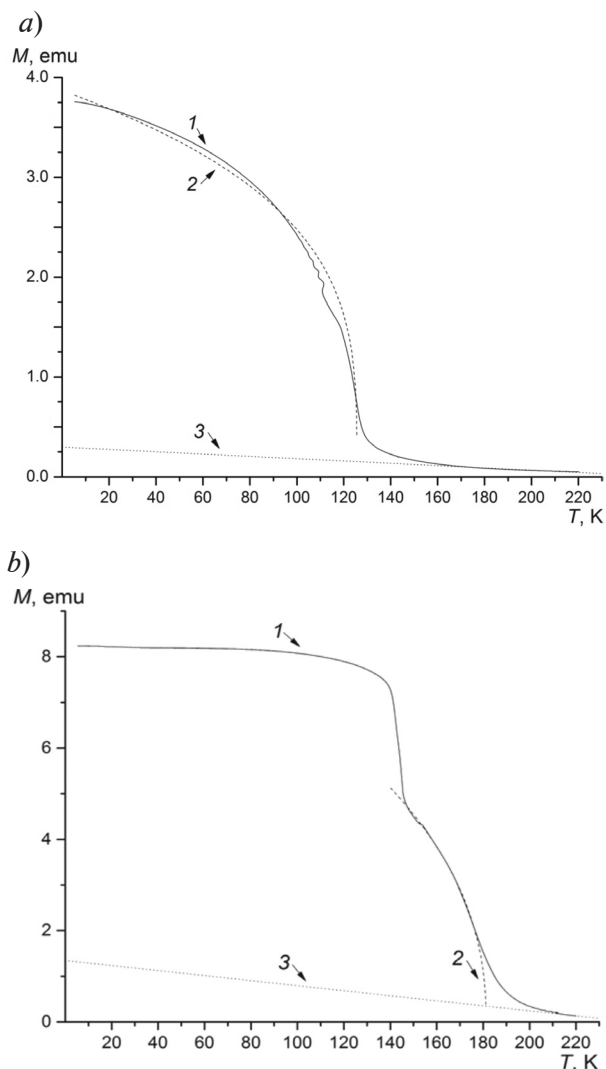


Рис. 1. Экспериментальные температурные зависимости намагниченности для образцов составов LSMO-0,07 (*a*) и LSMO-0,125 (*b*) при охлаждении (1) и их аппроксимации в высокотемпературной (2) и низкотемпературной (3) областях

[5], соответствует точке магнитного ФП из высокотемпературной парамагнитной фазы в низкотемпературную неколлинеарную, с появлением спонтанной и остаточной намагниченности. Это свидетельствует о том, что магнитная структура является не чисто антиферромагнитной, а слабоферромагнитной [5].

В таком случае представим температурную зависимость намагниченности  $M(T)$  в виде следующей степенной функции:

$$(T_C - T)^\beta, \quad (1)$$

где  $T_C$  – температура фазового перехода,  $\beta$  – критический индекс.

Из анализа данных на рис. 1, *a* следует, что такое описание (кривая 2) достаточно хорошо совпадает с экспериментальной кривой. Для параметров функции (1) были получены следующие значения:  $T_C = 125,8(1,5)$  К,  $\beta = 0,280(8)$ . Температуру ФП мы также определяли, используя следующую процедуру: зависимость  $M(T)$  в парамагнитной фазе аппроксимировали прямой в область низких температур (прямая 3 на рис. 1, *a*) и находили точку пересечения с аппроксимирующей кривой (см. формулу (1)). Полученное значение температуры в пределах  $\pm 0,5$  К совпало со значением  $T_C$ , приведенным выше.

На рис. 1, *b* представлена температурная зависимость намагниченности  $M(T)$  для образца LSMO-0,125 при охлаждении. Хорошо видно, что на кривой наблюдаются две аномалии: первая – около 180 К, вторая – вблизи 157 К, причем ниже этой температуры функция  $M(T)$  резко возрастает, а затем в области ниже 100 К практически не изменяется. Таким образом, можно заключить, что в образце LSMO-0,125 наблюдаются два магнитных фазовых перехода. В области температур 150 – 190 К зависимость  $M(T)$  была также аппроксимирована функцией (1) и получены следующие параметры:  $T_{C1} = 181,2(1,5)$  К и  $\beta_1 = 0,440(13)$ , что достаточно близко к значению критического индекса 0,5 для теории среднего поля. Величина  $T_{C1}$ , полученная из точки пересечения прямой 3 (линейная аппроксимация  $M(T)$  парамагнитной фазы в область низких температур) и кривой 2 (степенная зависимость намагниченности с параметрами  $T_{C1}$  и  $\beta_1$ ), аналогично случаю с образцом LSMO-0,07, оказалась близка (с большей точностью, чем 0,5 К) к величине  $T_{C1} = 181,2$  К, определенной из формулы (1). Это значение температуры хорошо согласуется с результатом, полученным в работе [5].

Второй ФП мы аппроксимировали ступенчатой функцией с  $T_{C2} = 157,6$  (1,5) К. По-видимому, этот переход соответствует переходу в поляронную фазу или фазу по-

ляронного упорядочения [5, 6].

Таким образом, исходя из характера температурных зависимостей  $M(T)$  и значений критических индексов, полученных для образцов LSMO-0,07 и LSMO-0,125, можно предположить, что в первом образце ФП при 125,8 К и во втором при 181,2 К являются фазовыми переходами второго рода, а ФП во втором образце (LSMO-0,125) при 157,6 К – фазовым переходом первого рода.

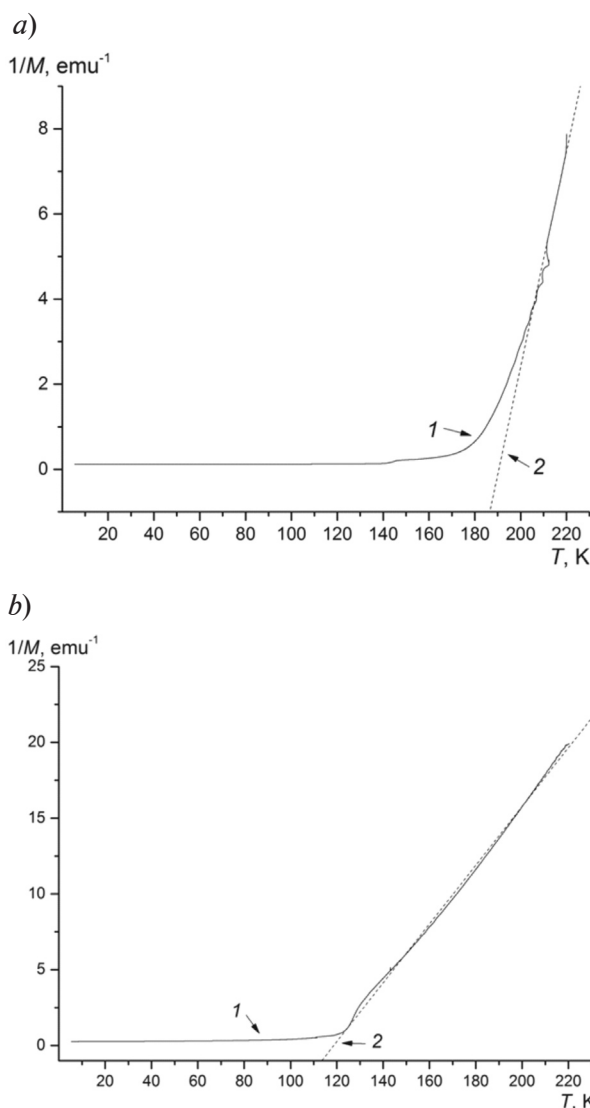


Рис. 2. Экспериментальные температурные зависимости обратной намагниченности ( $1/M$ ) для образцов LSMO-0,0125 (*a*) и LSMO-0,07 (*b*) и их аппроксимации в высокотемпературной области (2)

На заключительном этапе работы нами были построены температурные зависимости обратной намагниченности  $1/M$  для обоих образцов (рис. 2), из наклона которых в парамагнитной фазе (высокотемпературные области) мы оценивали величины магнитных моментов ионов марганца в обоих образцах.

Для оценки величин магнитных моментов в обоих составах была использована следующая формула:

$$\frac{1}{M} = \frac{k_B T}{N \mu^2 B}, \quad (2)$$

где  $\mu$  (в магнетонах Бора  $\mu_B$ ) – магнитный момент;  $M$  – намагниченность;  $B$ , Э – приложенное измерительное магнитное поле;  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $N$  – количество магнитных атомов в единице объема.

На экспериментальных кривых  $I$  в области высоких температур были определены наклоны зависимостей  $M^{-1}(T)$  (прямые 2 на рис. 2), и после подстановки в формулу (2) были вычислены значения магнитных моментов для обоих соединений. Они оказались следующими:  $\mu_1 = 2,47(1) \mu_B/\text{Mn}$  и  $\mu_2 = 2,82(1) \mu_B/\text{Mn}$  для LSMO-0,125 и LSMO-0,07 соответственно.

## Заключение

Исследована температурная эволюция намагниченности в монокристаллах составов  $\text{La}_{0,875}\text{Sr}_{0,125}\text{MnO}_3$  и  $\text{La}_{0,93}\text{Sr}_{0,07}\text{MnO}_3$  и показано, что в LSMO-0,07 наблюдается один магнитный ФП при  $T_C = 125,8(1,5) \text{ K}$ , а в LSMO-0,125 – два магнитных ФП при  $T_{C1} = 181,2(1,5) \text{ K}$  и  $T_{C2} = 157,6(1,5) \text{ K}$ .

Найдены значения критических индексов  $\beta = 0,280(8)$  для  $\text{La}_{0,93}\text{Sr}_{0,07}\text{MnO}_3$  и  $\beta_1 = 0,440(13)$  для  $\text{La}_{0,875}\text{Sr}_{0,125}\text{MnO}_3$ .

На основе полученных экспериментальных данных и значений критических индексов сделано заключение, что ФП при температурах  $T_C$  и  $T_{C1}$  относятся к фазовым переходам второго рода, а ФП в LSMO-0,125 при  $T_{C2}$  является фазовым переходом первого рода.

Получены оценки магнитных моментов, которые имеют следующие значения:  $\mu_1 = 2,47(1) \mu_B/\text{Mn}$  и  $\mu_2 = 2,82(1) \mu_B/\text{Mn}$  для LSMO-0,125 и LSMO-0,07 соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00136 «Структура и свойства самоорганизованных и композитных мезоструктурированных сегнето- и пьезоэлектриков и мультифункциональных материалов»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Локтев В.М., Погорелов Ю.М. Особенности физических свойств и колоссальное магнитосопротивление манганитов // Физика низких температур. 2000. Т. 26. Вып. 3. С. 231–261.
- [2] Мамин Р.Ф., Игами Т., Мартон Ж. и др. Гигантская диэлектрическая восприимчивость и магнитоемкостный эффект в манганитах при комнатной температуре // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. Вып. 10. С. 731–735.
- [3] Wollan E.O., Koehler W.C. Neutron diffraction study of the magnetic properties of the series of perovskite-type compounds  $[(1-x)\text{La}, x\text{Ca}]\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. No. 2. Pp. 545–563.
- [4] Фесенко Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. М.: Атомиздат, 1972. 248 с.
- [5] Мухин А.А., Иванов В.Ю., Травкин В.Д. и др. Магнитные и структурные переходы в  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ : фазовая  $T-x$  диаграмма // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 68. Вып. 4. С. 331–336.
- [6] Yamada Y., Himoto O., Nohdo S., et al. Polaron ordering in low-doping  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. No. 5. Pp. 904–907.
- [7] Нагаев Э.Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитным сопротивлением // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 8. С. 833–858.
- [8] Кугель К.И., Хомский Д.И. Эффект Яна – Теллера и магнетизм: соединения переходных металлов // Успехи физических наук. 1982. Т. 136. № 4. С. 621–664.
- [9] Kawano H., Kajimoto R., Kubota M., et al. Ferromagnetism-induced reentrant structural transition and phase diagram of the lightly doped insulator  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x \leq 0.17$ ) // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53. No. 22. Pp. R14709–R14713.
- [10] Nojiri H., Keneko K., Motokawa M., et al. Two ferromagnetic phases in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x \sim 1/8$ ) // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. No. 6. Pp. R4142–R4148.
- [11] Geck J., Wochner P., Bruns D., et al. Rearrangement of the orbital-ordered state at the metal insulator transition  $\text{La}_{7/8}\text{Sr}_{1/8}\text{MnO}_3$  // Phys.

Rev. B. 2004. Vol. 69. No. 10. P. 104413.

[12] **Cox D.E., Iglesias T., Moshopoulou E.** Vertical boundary at  $x \approx 0.11$  in the structural phase diagram of the  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  system ( $0.08 \leq x \leq 0.125$ ) // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64. No. 2. P. 024431.

[13] **Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А. и др.** Высокочастотные ультразвуковые исследования структурного фазового перехода в монокристалле  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$  // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып.3. С. 496–498.

[14] **Li H.-F., Su Y., Xiao Y.G., et al.** Crystal and magnetic structure of single crystal  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$

( $x \approx 1/8$ ) // Europ. Phys. J. B. 2009. Vol. 67. No. 2. Pp. 149–157.

[15] **Monot-Lafez I., Dominiczak M., Giovannelli F., et al.** Correlation between structural defects and properties in large La-Sr-Mn-O single crystals // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. No. 5. P. 053502.

[16] **Ivanov V.Yu., Travkin V.D., Mukhin A.A., et al.** Magnetic, dielectric, and transport properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  at submillimeter wavelengths // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. No. 11. Pp. 7180–7182.

[17] **Dagotto E., Hotta T., Moreo A.** Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation // Phys. Rep. 2001. Vol. 344. No. 1–3. Pp. 1–153.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВАНИНА Полина Юрьевна** – инженер кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
p.yu.vanina@gmail.com

**НАБЕРЕЖНОВ Александр Алексеевич** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН и старший научный сотрудник кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. 194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
alex.naberezhnov@mail.ioffe.ru

**НИЖАНКОВСКИЙ Виктор Игнатьевич** – научный сотрудник Международной лаборатории сильных магнитных полей и высоких температур, г. Вроцлав, Польша. 53-421, Poland, Wroclaw, Gajowicka, 95  
nizhan@ml.pan.wroc.pl

**МАМИН Ринат Файзрахманович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики перспективных материалов Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН, г. Казань, Российская Федерация. 420029, Российская Федерация, г. Казань, Сибирский тракт ул., 10/7  
mamin@kfti.knc.ru

### *Vanina P.Yu., Naberezhnov A.A., Nizhankovskii V.I., Mamin R.F.* TEMPERATURE EVOLUTION OF LANTHANUM-STRONTIUM MANGANITES MAGNETIC PROPERTIES.

The temperature dependences of the magnetization  $M(T)$  for multiferroic single crystal lanthanum-strontium manganites  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$  (LSMO-0.125) and  $\text{La}_{0.93}\text{Sr}_{0.07}\text{MnO}_3$  (LSMO-0.07) have been obtained. It was shown that the phase transitions (PT) in LSMO-0.07 at  $T_C = 125.8(1,5)$  K and in LSMO-0.125 at  $T_{C1} = 181.2(1,5)$  K belonged to the second order type. The phase transition in LSMO-0.125 at  $T_{C2} = 157.6(1,5)$  K is the first order PT. From the  $M^{-1}(T)$  curves the values of the magnetic moments were determined. They were equal to  $\mu_1 = 2.47(1) \mu_B/\text{Mn}$  and  $\mu_2 = 2.82(1) \mu_B/\text{Mn}$  for LSMO-0.125 and LSMO-0.07 respectively.

LANTHANUM-STRONTIUM MANGANITE, MULTIFERROIC, PHASE TRANSITION, MAGNETIC MOMENT, MAGNETIZATION.

## REFERENCES

- [1] **V.M. Loktev, Yu.G. Pogorelov**, Peculiar physical properties and the colossal magnetoresistance of manganites (Review), *Low Temperature Physics*. 26 (3) (2000) 171–193.
- [2] **R.F. Mamin, T. Igami, G. Marton, et al.**, Giant dielectric susceptibility and magnetocapacitance effect in manganites at room temperature, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 2007. 86 (10) (2008) 643–646.
- [3] **E.O. Wollan, W.C. Koehler**, Neutron diffraction study of the magnetic properties of the series of perovskite-type compounds  $[(1-x)\text{La}(x)\text{Ca}]\text{MnO}_3$ , *Phys. Rev.* 100 (2) (1955) Pp. 545–563.
- [4] **E.G. Fesenko**, [The family of perovskite and ferroelectricity], Moscow, Atomizdat, 1972.
- [5] **A.A. Mukhin, V.Yu. Ivanov, V.D. Travkin, et al.**, Magnetic and structural transitions in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ : Phase  $T - x$  diagram, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 68(4) (1998) 356–362.
- [6] **Y. Yamada, O. Himo, S. Nohdo, et al.**, Polaron ordering in low-doping  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ , *Phys. Rev. Lett.* 77 (5) (1996) 904–907.
- [7] **E.L. Nagaev**, Lanthanum manganite and other magnetic conductors with a giant magnetic resistance, *UFN*. 166 (8) (1996) 833–858.
- [8] **K.I. Kugel, D.I. Homskii**, The Jahn-Teller effect and magnetism: transition metal compounds, *Physics-Uspokhi*. 25 (1982) 231–256.
- [9] **H. Kawano, R. Kajimoto, M. Kubota, et al.**, Ferromagnetism-induced reentrant structural transition and phase diagram of the lightly doped insulator  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x \leq 0.17$ ), *Phys. Rev. B*. 53(22) (1996) R14709–R14713.
- [10] **H. Nojiri, K. Keneko, M. Motokawa, et al.**, Two ferromagnetic phases in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x \sim 1/8$ ), *Phys. Rev. B*. 60 (6) (1999) Pp. 4142–4148.
- [11] **J. Geck, P. Wochner, D. Bruns, et al.**, Rearrangement of the orbital-ordered state at the metal insulator transition  $\text{La}_{7/8}\text{Sr}_{1/8}\text{MnO}_3$ , *Phys. Rev. B*. 69 (10) (2004) 104413.
- [12] **D.E. Cox, T. Iglesias, E. Moshopoulou**, Vertical boundary at  $x \approx 0.11$  in the structural phase diagram of the  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  system ( $0.08 \leq x \leq 0.125$ ), *Phys. Rev. B*. 64 (2) (2001) 024431.
- [13] **Kh.G. Bogdanova, A.R. Bulatov, V.A. Golenischev-Kutuzov, et al.**, High-frequency ultrasound structural phase transition in a single crystal  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ , *Physics of the Solid State*. 49 (3) (2007) 519–522.
- [14] **H.-F. Li, Y. Su, Y.G. Xiao, et al.**, Crystal and magnetic structure of single crystal  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x \approx 1/8$ ), *The European Physical Journal B*. 2009. 67(2) (2009) 149–157.
- [15] **I. Monot-Lafez, M. Dominiczak, F. Giovannelli, et al.**, Correlation between structural defects and properties in large La-Sr-Mn-O single crystals, *Journal of Applied Physics*. 101 (5) (2007) 053502.
- [16] **V.Yu. Ivanov, V.D. Travkin, A.A. Mukhin, et al.**, Magnetic, dielectric, and transport properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  at submillimeter wavelengths, *Journal of Applied Physics*. 83 (11) (1998) 7180–7182.
- [17] **E. Dagotto, T. Hotta, A. Moreo**, Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation, *Phys. Rep.* 344 (1–3) (2001) 1–153.

## THE AUTHORS

**VANINA Polina Yu.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
p.yu.vanina@gmail.com

**NABEREZHNOV Aleksandr A.**

*Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences*  
26, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
alex.nabereznov@mail.ioffe.ru

**NIZHANKOVSKII Viktor I.**

*International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures*  
95, Gajowicka, Wroclaw, 53-421, Poland  
nizhan@ml.pan.wroc.pl

**MAMIN Rinat F.**

*Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences*  
10/7, Sibirsky tract, Kazan, 420029, Russian Federation  
mamin@kfti.knc.ru