

В.С. Захвалинский, д-р физ.-мат. наук, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (Россия, 308007, Белгород, Студенческая ул., 14) (e-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru)

И. М. Усатый, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (Россия, 308007, Белгород, Студенческая ул., 14) (e-mail:718097@bsu.edu.ru)

О. Н. Иванов, д-р физ.-мат. наук, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (Россия, 308007, Белгород, Студенческая ул., 14) (e-mail:ivanov.oleg@bsu.edu.ru)

С. В. Иванчихин, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (Россия, 308007, Белгород, Студенческая ул., 14) (e-mail:632805@bsu.edu.ru)

Т. Б. Никуличева, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (Россия, 308007, Белгород, Студенческая ул., 14) (e-mail:nikulicheva@bsu.edu.ru)

Ф.Ф. Ниязи, д-р хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail:farukhniyazi@yandex.com)

В.М. Емельянов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: emelianov@nt.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАНГАНИТА ПЕРОВСКИТА $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$

Керамический образец манганита перовскита $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ (LSMO) был получен с применением стандартной твердофазной реакции. В соответствии с результатами рентгенофазового анализа было установлено, что образец LSMO имел ромбическую структуру (пространственная группа $R3c$). Параметры решётки исследованного образца: $a = 5.473\text{Å}$, $b = 5.473\text{Å}$, $c = 13.345\text{Å}$.

Исследована температурная зависимость сопротивления керамического образца LSMO в интервале температур 5-310 К в магнитных полях до 5Тл. Измерения температурной зависимости электропроводности были проведены на автоматизированной установке замкнутого цикла Mini Cryogen Free Measurements System (Cryogenic Ltd, UK). В образцах LSMO наблюдалось подавление величины удельного сопротивления внешним магнитным полем (эффект колоссального магнетосопротивления, характерный для многих соединений манганитов перовскитов с переменной валентностью марганца). В рамках феноменологической модели были выявлены механизмы релаксации носителей заряда в различных температурных интервалах. В области высоких температур ($T > 200\text{K}$) наблюдается переход металл – диэлектрик с температурой перехода T_{MI} . В рамках предложенной феноменологической модели были аппроксимированы экспериментальные данные удельного сопротивления и выявлены типы рассеяния в интервале температур $5\text{K} < T < T_{MI}$. В рамках модели были идентифицированы: эффект слабой локализации ($\sim T^{1/2}$), одномагнетонный ($\sim T^3$) и электрон-электронный ($\sim T^2$) процессы рассеяния. Результаты аппроксимации были проанализированы и приведены к соответствующим моделям. Общая картина поведения электросопротивления в окрестности перехода металл – диэлектрик, где наблюдался эффект колоссального магнетосопротивления, имела характерный для большинства керамических манганитов перовскитов вид и была проанализирована с учётом модели двойного обмена.

С использованием модели межгранульного спин-поляризованного туннелирования качественно проанализирован низкотемпературный минимум электросопротивления LSMO. Было показано, что в интервале температур $T = 25 - 80\text{K}$ манганит описывается степенной зависимостью $\sim T^3$, что свидетельствует о полуметаллическом характере проводимости. Также был проанализирован низкотемпературный минимум электросопротивления в рамках модели межгранульного спин-

поляризованного туннелирования. Результаты расчётов были сведены в таблицу, и показано закономерное изменение расчётных параметров по мере увеличения магнитного поля.

Ключевые слова: температурная зависимость, керамика, магнитное поле, электропроводность, магнетосопротивление, манганит перовскит.

Ссылка для цитирования: Исследование электропроводности манганита перовскита $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ / В.С. Захвалинский, И. М. Усатый, О. Н. Иванов, С. В. Иванчихин, Т. Б. Никуличева, Ф.Ф. Ниязи, В.М. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 68–77.

Введение

За последние десятилетия большое количество научной литературы было посвящено исследованию явлений, наблюдавшихся в твёрдых растворах манганитов перовскитов. Остановимся здесь на двух феноменах: эффекте колоссального магнетосопротивления [1, 2] и явлении низкотемпературной слабой локализации электрона [3, 4]. Надо заметить, что появление подобных свойств у манганитов обусловлено прежде всего сложной структурой этих соединений, наличием сильно коррелированной электронной подсистемы, сильного взаимодействия между зарядом и спином электронов и особенностями кристаллической решетки.

Обнаружение явления колоссального магнетосопротивления, представляющего большой интерес с точки зрения как практического использования, так и фундаментальной науки, привлекает внимание исследователей к нанокompозитными материалам, в том числе к таким, как манганит $La_{1-x}A_xMnO_3$ (где A – двухвалентный атом, Ca, Ba, Sr).

Нелегированное соединение $LaMnO_3$ (содержащее в своем составе ионы Mn^{3+}) является антиферромагнитным диэлектриком с температурой Нееля ($T_N \approx 130K$). Если в $LaMnO_3$ происходит замена трехвалентного La двухвалентными атомами $\{Ca, Ba, Sr\}$ и, соответственно, появление ионов Mn^{4+} , то для концен-

трации примеси $0,2 \leq x \leq 0,5$ в области низких температур твёрдый раствор $La_{1-x}A_xMnO_3$ является ферромагнитным металлом. Заметим, что в стронциевой системе область растворимости ограничена значениями $x \leq 0,6$ [5].

Физика легированных манганитов достаточно хорошо описывается моделью двойного обмена Зенера [2, 6]. В рамках модели, предложенной Зенером, вводится концепция о одновременном переходе электрона от иона Mn^{3+} к кислороду и от кислорода к соседнему иону Mn^{4+} . Так называемый «двойной обмен» (DE) всегда связан с ферромагнетизмом в противоположность сверхобмену, в который вовлечены виртуальные электроны, что приводит к антиферромагнетизму.

Тем не менее в общем случае, привлекая только двойной обмен, не удаётся объяснить данные эксперимента для манганитов-перовскитов, и необходим учет решёточно-поляронных эффектов, обусловленных сильным электрон-фононным взаимодействием (связанным с эффектом Яна-Тейлора). С другой стороны, $La_{1-x}A_xMnO_3$ представляет собой систему с доминированием двойного обмена, которая слабо подвержена влиянию электрон-решеточных и кулоновских корреляционных эффектов. При этом для $x \geq 0,1$ спин-упорядоченная фаза практически ферромагнитна.

Если спины ионов марганца не параллельны или в случае, если угол связи

$Mn^{3+} - O - Mn^{4+}$ отличен от 180° , то переход электрона затрудняется и его подвижность падает. В этих материалах существует прямая связь между проводимостью и ферромагнетизмом. Модель двойного обмена качественно описывает ферромагнитное упорядочение и подвижность носителей, которые зависят от относительной ориентации моментов ионов Mn , а вблизи температуры Кюри (T_c) сильно зависят от приложенного магнитного поля. Температура магнитного фазового перехода, при которой одновременно происходит и переход диэлектрик – металл (в некоторых манганитах), может быть увеличена за счет приложенного внешнего магнитного поля. В результате этого электрическое сопротивление вещества может быть уменьшено более чем в 1000 раз при температуре вблизи фазового перехода. Это явление и называется колоссальным магнитосопротивлением [1, 7].

Интересен также тот факт, что в низкотемпературном интервале на зависимости $\rho(T)$ для большинства керамических манганитов перовскитов наблюдается минимум. Данный эффект в низких температурах наблюдается и для других магнитных материалов.

Минимумы, наблюдаемые в магнитных материалах, можно разделить на несколько типов:

1) минимум, связанный с межгранульным спин-поляризованным транспортом [8-10] (для магнитных керамических материалов и гранулированных структур);

2) минимум или рост сопротивления, связанный с возникновением антиферромагнитного обмена между моментами локализованных спинов и носителей тока (эффект Кондо) [11-13].

Также возможен и третий, комбинированный, вариант, когда сосуществуют оба этих механизма.

В настоящей работе исследовались керамические образцы $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$, и, как было показано в работе [14], для поликристаллических манганитов (как и для нашего образца) наиболее подходящей моделью, описывающей низкотемпературный минимум, является межгранульное спин-поляризованное туннелирование электрона. Актуальность этого исследования в первую очередь обусловлена возможностью его практического применения, например при изготовлении приборных структур спинтроники, что в последние годы представляет большой интерес.

В настоящей работе проведён анализ зависимости электросопротивления ρ керамики манганита-перовскита $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ в интервале температур $5K \leq T \leq 310K$ от напряженности магнитного поля в интервале от 0 до 5Тл.

Эксперимент

Керамический образец $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ был получен с применением стандартной твердофазной реакции. Для синтеза использовали исходные материалы La_2O_3 , MnO_2 и $SrCO_3$. Порошок La_2O_3 гигроскопичен, поэтому он подвергался предварительному отжигу. Смеси порошков исходных материалов отжигались на воздухе при температуре $1360^\circ C$ в течение 40 часов с промежуточным измельчением. Полученный порошок прессовался в таблетки под давлением 2000 кг/см^2 , затем таблетки отжигались на воздухе при температуре $1360^\circ C$ в течение 22 часов. В соответствии с результатами рентгенофазового анализа было установлено, что образец $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$

имел ромбоэдрическую структуру (пространственная группа $R3c$). Параметры решётки исследованного образца:

$$a = 5.473\text{Å}, b = 5.473\text{Å}, c = 13.345\text{Å}.$$

Измерения электропроводности были проведены на автоматизированной установке замкнутого цикла (Mini Cryogenic Free Measurements System (Cryogenic Ltd, UK)) в интервале температур 5-310 К и в магнитном поле до 5 Тл.

Результаты и обсуждения

Исследованы температурные зависимости удельного сопротивления керамических образцов $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ в интервале температур 5-310К в магнитных полях до 5Тл.

На рисунке 1 приведены экспериментальные зависимости $\rho(T)$, где в области высоких температур ($T > 200K$) наблюдается переход металл – диэлектрик с температурой перехода T_{MI} .

Приложенное магнитное поле, как видно из рисунка 1, подавляет удельное сопротивление образца, что в литературе

называется эффектом колоссального магнитосопротивления, а температура перехода металл–диэлектрик T_{MI} повышается. Данное поведение образца обусловлено увеличением концентрации ферромагнитных доменов в объёме. Магнитное поле способствует увеличению температуры ферромагнитного упорядочения спинов в манганите и подавляет пространственную разориентацию спинов на ионах марганца. Это является причиной наблюдаемого уменьшения ρ на вой $\rho(T, H)$ в сторону высоких температур относительно соответствующего максимума на зависимости, измеренной при $H = 0$. При низких температурах ($T < 50K$) на зависимости $\rho(T)$ наблюдается четко выраженный минимум ($T = T_{min}$), который с ростом магнитного поля подавляется. Своим происхождением низкотемпературный минимум на зависимости $\rho(T)$ в поликристаллическом манганите $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ обязан межгранульному рассеянию, что будет описано ниже.

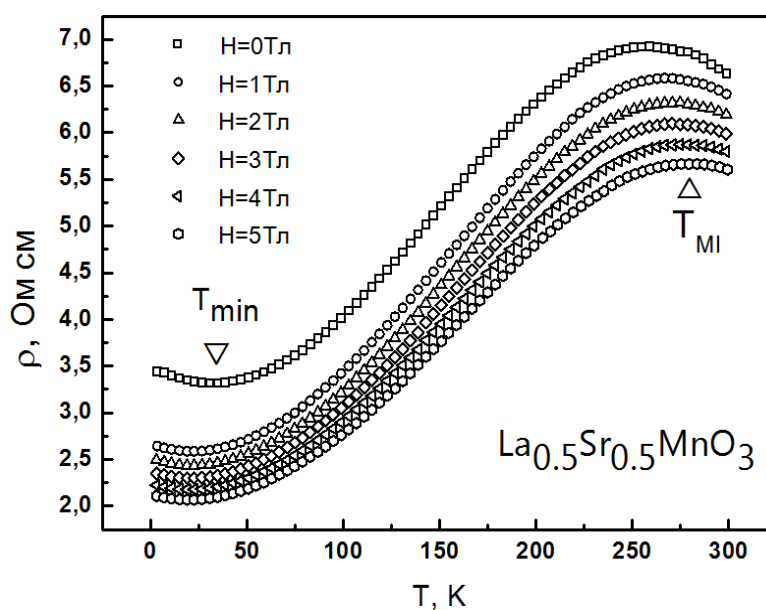


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления образца $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ в магнитных полях от 0 до 5Тл. Стрелками обозначена температура перехода металл – диэлектрик (T_{MI}) и значение низкотемпературного минимума (T_{min})

В литературе имеются многочисленные теоретические работы, посвященные электронному транспорту в манганитах [15]. В соответствии с имеющимися теоретическими моделями [16, 17] процесс релаксации электронов в 3d-ферромагнитных металлах задается эмпирическим выражением

$$\rho = \rho_0 + \rho_m T^m \rho_n T^n, \quad (1)$$

где ρ_0 – не зависящее от температуры остаточное сопротивление, которое определяется процессами рассеяния на примесях, дефектах, границах зерен и доменных стенках [18];

m и n определяют зависящие от температуры механизмы рассеяния.

В качестве основных механизмов релаксационных носителей зарядов в манганитах при $T < T_{MI}$ были отмечены: электрон-электронные [19], одномагнетонные [20], электрон-магнетонные [21] и электрон-фононные [22] процессы рассеивания, описываемые степенной зависимостью $\rho_2 T^2$, $\rho_3 T^3$, $\rho_{4.5} T^{4.5}$ и $\rho_5 T^5$ соответственно. Более того, было показано, что в области низких температур ($T < T_{min}$) поведение удельного сопротивления коррелируется со слабой локализацией электрона, которая описывается $-\rho_{1/2} T^{1/2}$ [3, 4, 23].

Экспериментальные данные $\rho(T)$ в области низких температур ($T < 80K$) хорошо аппроксимировались следующим соотношением:

$$\rho = \rho_{01} - \rho_{1/2} T^{1/2} + \rho_3 T^3. \quad (2)$$

При $T_{min} < T < T_{MI}$ электросопротивление *LSMO* следовало соотношению

$$\rho = \rho_{02} + \rho_2 T^2. \quad (3)$$

Результат аппроксимации экспериментальных данных выражением (2) и (3) приведён на рисунке 2 сплошными красными и темными линиями соответственно (параметры аппроксимации приведены в таблице).

При низких температурах ($T < 80K$) наблюдалось снижение удельного сопротивления, а при ($T = T_{min}$) сопротивление проходило через минимум.

Этот переход представлен на вставке к рисунку 2, где изображена зависимость $\rho(T)$ в интервале температур 5-100K. Из рисунка видно, что с ростом магнитного поля глубина минимума уменьшается, но при этом нет полного подавления даже в магнитном поле 5Тл, что можно увидеть из рисунка 1. Видно, что красные и темные линии аппроксимации достаточно хорошо описывают экспериментальные результаты как в зависимости от температуры, так и в зависимости от магнитного поля.

Следовательно, основными механизмами процессов релаксации носителей заряда керамики $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ в интервале температур $0 < T < T_{MI}$ является эффект слабой локализации ($\sim T^{1/2}$), одномагнетонный ($\sim T^3$) и электрон-электронный ($\sim T^2$) процесс рассеивания.

Все параметры, как видно из таблицы, непрерывно снижаются с увеличением магнитного поля. Параметр ρ_{01} находится в том же порядке, что и ρ_{02} . Уменьшение ρ_0 , которое определяет остаточное сопротивление, может быть связано с увеличением размеров домена (уменьшение суммарной удельной поверхности доменов), за счет наличия магнитного поля спины будут выравниваться в направлении магнитного поля и в результате увеличат магнитный домен, что увеличивает однородность образца. Параметр ρ_2 , вызванный электрон-электронным рассеянием, характеризует сопротивление в ферромагнитной области и также снижается с увеличением приложенного магнитного поля.

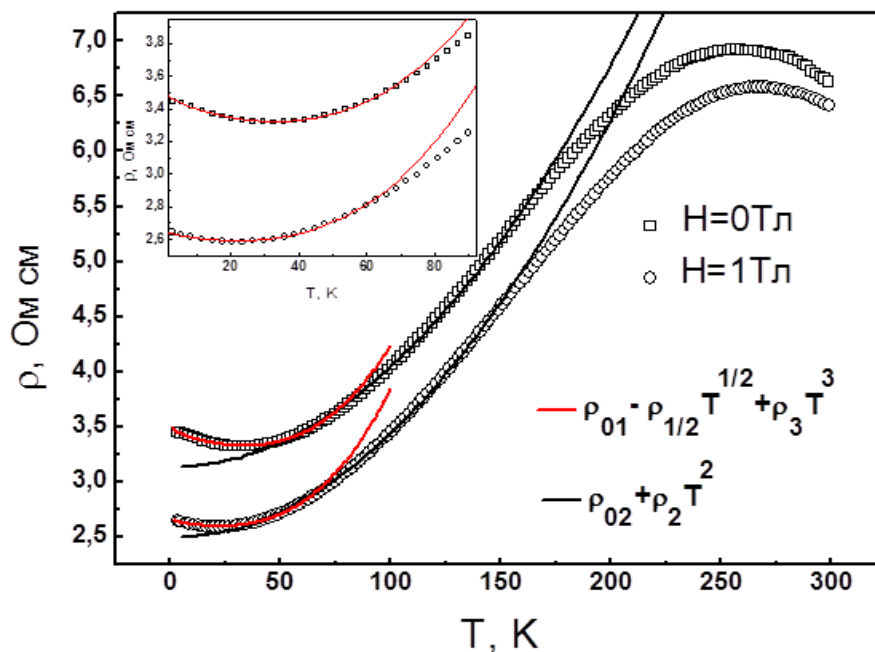


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления образца $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ в магнитных полях 0 и 1Тл. Сплошные темные и красные линии соответствуют уравнению $\rho = \rho_{02} + \rho_2 T^2$ и $\rho = \rho_{01} - \rho_{1/2} T^{1/2} + \rho_3 T^3$ соответственно

Значения параметров аппроксимации, полученных с помощью формул (2) и (3)

$H, \text{Тл}$	$\rho_{01}, \text{Ом} \cdot \text{см}$	$\rho_{02}, \text{Ом} \cdot \text{см}$	$\frac{\rho_1 \cdot 10^{-3}}{2}, \text{Ом} \cdot \text{см}/\text{К}^{1/2}$	$\rho_3 \cdot 10^{-6}, \text{Ом} \cdot \text{см}/\text{К}^3$	$\rho_2 \cdot 10^{-5}, \text{Ом} \cdot \text{см}/\text{К}^2$
0	3.5	3.1	47.9	1.3	9.0
1	2.7	2.5	25.3	1.7	9.6
2	2.5	2.3	23.5	1.6	8.8
3	2.4	2.2	21.2	1.6	8.4
4	2.3	2.1	19.2	1.5	8.1
5	2.1	2.0	17.1	1.4	7.6

Предположительно это происходит потому, что магнитное поле стремится выровнять спины домена в направлении поля, а локализованные спины двух катионов Mn^{+3} и Mn^{+4} вблизи доменных границ стремятся быть параллельными. В результате e_g^- электроны легко переносятся между катионами Mn^{+3} и Mn^{+4} через доменные стенки, а удельное сопротивление с ростом магнитного поля уменьшается.

Существование слабой локализации при низких температурах в поликристаллических манганитах хорошо коррелируется с моделью о межгранульном спинполяризованном транспорте (СПТ) электрона [8-10].

Суть модели заключается в том, что при низких температурах в нулевом магнитном поле магнитные моменты на границах ближайших зерен, между которыми происходит туннельный перенос за-

ряда, ориентированы антипараллельно друг другу.

Такое антиферромагнитное расположение магнитных моментов означает наличие энергетического барьера для носителей заряда на границе между двумя гранулами. Вероятность туннелирования носителей будет определяться взаимным расположением магнитных моментов соседних гранул. С ростом температуры тепловая энергия «размораживает» магнитные моменты соседних гранул, помогая носителям тока перескочить энергетический барьер под действием электрического поля, что приводит к уменьшению сопротивления с ростом температуры, при $T = T_{min}$ сопротивление проходит через минимум [14].

Из таблицы видно, что параметр $\rho_{1/2}$ с ростом магнитного поля уменьшается. Предположительно можно сказать, что внешнее магнитное поле ориентирует намагниченность в гранулах вдоль направления магнитного поля и создает тот же эффект, что и прирост температуры, при этом $\rho_{1/2}$ уменьшается с приложенным магнитным полем, как видно из таблицы. Поэтому можно сделать вывод, что стремление спинов к параллельной конфигурации подавляет различные вклады рассеяния и в результате $\rho_0, \rho_{1/2}, \rho_3, \rho_2$ уменьшается с увеличением магнитного поля [23].

Также стоит отметить, что на низкотемпературном участке ($T = 25 - 80\text{K}$) поведение удельного сопротивления следовало соотношению $\rho \sim T^3$, что является идентификатором проводимости полуметаллического (half-metals) типа [20]. Особенностью полуметаллов является то, что проводимость определяется только спинполяризованными электронами. Этот результат представляет большой интерес,

так как имеется возможность практического использования (при изготовлении элементов спинтроники). Аналогичный результат был получен в работе [20], где исследовался образец $LSMO(x = 0.2, 0.3, 0.4)$ и был установлен полуметаллический характер проводимости при температурах до 30К.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе нами исследована динамика изменения электросопротивления в температурном интервале от 5 до 310К в керамических образцах твёрдого раствора манганита перовскита $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$. С использованием феноменологической модели были аппроксимированы экспериментальные данные удельного сопротивления и выявлены типы рассеяния в интервале температур $5\text{K} < T < T_{M1}$. В рамках модели были идентифицированы: эффект слабой локализации ($\sim T^{1/2}$), одномагнетонный ($\sim T^3$) и электрон-электронный ($\sim T^2$) процессы рассеяния. Результаты аппроксимации были проанализированы и приведены к соответствующим моделям.

Общая картина поведения электросопротивления в окрестности перехода металл – диэлектрик, где наблюдался эффект колоссального магнитосопротивления, имела характерный для большинства керамических манганитов перовскитов вид и была проанализирована с учётом модели двойного обмена. С использованием модели межгранульного спинполяризованного туннелирования качественно проанализирован низкотемпературный минимум электросопротивления манганита. Также был идентифицирован полуметаллический тип проводимости в интервале температур $T = 25 - 80\text{K}$.

Можно сделать вывод, что в манганите $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ проявляется эффект

спин-поляризованного транспорта в области низких температур, что дает возможность практического использования для спинтроники.

Список литературы

1. Siwach P. K., Singh H. K., Srivastava O. N. Low field magnetotransport in manganites // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008. N 20 (27). P. 273201.
2. Локтев В. М., Погорелов Ю. Г. Особенности физических свойств и колоссальное магнитосопротивление манганитов // *Физика низких температур*. 2000. Т. 26, № 3. С. 231-261.
3. Rozenberg E., Auslender M., Felner I., Gorodetsky G. // *J. Appl. Phys.* 2000. N 88. P. 2578.
4. Gopalarao T.R., Ravi S., Pamu D. Electrical transport and magnetic properties of epitaxial $Nd_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ thin films on (001)-oriented $LaAlO_3$ substrate // *Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. Vol. 409. P. 148-154.
5. Tokura Y. // *Rep. Prog. Phys.* 2006. Vol. 69. P. 797.
6. Zener C. // *Phys. Rev.* 1951. Vol. 82. P. 403.
7. Urushibaru A., Moritomo Y., Arima T. // *Phys. Rev.* 1995. B 51. P. 14103.
8. Auslender M. I., Rozenberg E., Kar'kin A. E., Chaudhuri B. K., Gorodetsky G. // *J. Alloy Comp.* 2001. Vol. 326. P. 81.
9. Auslender M., Kar'kin A. E., Rozenberg E., Gorodetsky G. // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89. P. 6639.
10. Гамзатов А. Г., Батдалов А. Б., Мельников О. В., Горбенко О. Ю. // *ФНТ*. 2009. Vol. 35. P. 290.
11. Xu Y., Zhang J., Cao G., Jing C., Cao S. // *Phys. Rev.* 2006. B 73. P. 224410.
12. Lalitha G., Venugopal Reddy P. // *J. Alloy Comp.* 2010. Vol. 494. P. 476.
13. Zhang J., Xu Y., Cao Sh., Zhang Y., Jing C. // *Phys. Rev.* 2005. B 72. P. 054410.
14. Низкотемпературный транспорт в манганите $La_{0.5}Ca_{0.4}Li_{0.1}MnO_3$ в сильных магнитных полях / А. Г. Гамзатов, Т. А. Гаджимурадов, Женвен Ли, Ли Пи, Юэн-Чжан // *ЖЭТФ*. 2016. Т. 149, вып. 1. С. 172-180.
15. Kubo K., Ohata N. // *J. Phys. Soc. Jpn.* 1972. 33, 1, 21.
16. Goodings D.A. // *Phys. Rev.* 1963. 132, 2, 542.
17. Raquet B., Virtet M., Broto J.M., Sondergard E., Cespedes O., Mamy R. // *J. Appl. Phys.* 2002. 91, 10, 8129.
18. Бойков Ю.А., Класон Т., Данилов В.А. // *ФТТ*. 2005. Т. 47. С. 2189.
19. Effect of sodium substitution on the structural, magnetic and magnetocaloric properties of $La_{0.5}Ca_{0.5}MnO_3$ perovskite manganites / A. Mehri, W. Cheikhrouhou-Koubaa, M. Koubaa, A. Cheikhrouhou // *Phys. Procedia* 2. 2009. P. 975-982.
20. Furukawa N. Unconventional one-magnon scattering resistivity in half-metals // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2000. Vol. 69. P. 1954-1957.
21. Intrinsic electrical transport and magnetic properties of $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ and $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ MOCVD thin films and bulk material / G.J. Snyder, R. Hiskes, S. DiCarolis, M.R. Beasley, T.H. Geballe // *Phys. Rev. B* 53. 1996. P. 14434-14444.
22. Ultrasonic anomaly near the charge ordering transition in Sr-doped $Nd_{0.3}La_{0.2}Ca_{0.5-x}Sr_xMnO_3$ manganites / S. Shamsuddin, S.N. Supardan, M.A. Abdel-Baset Ibrahim, A.K. Yahya // *J. Supercond. Nov. Magn.* 27. 2013. P. 1229-1234.
23. Electrical transport studies on the $La_{0.7-x}Pr_xBa_{0.3}MnO_3$ ($x = 0, 0.1$ and 0.2) manganite: double metal-insulator transitions and low-temperature resistivity minimum / A. Tozri, J. Khelifi, H. Baaziz, E. Dhahri, E.K. Hlil // *Mater. Lett.* 2014. Vol. 131. P. 61-63.

Поступила в редакцию 14.01.19

UDC 544.032.4;53.098

V.S. Zakhvalinskii, Doctor of Phisico-Mathematical Sciences, Belgorod State National Research University (Russia, 308007, Belgorod, Student str., 14)
(e-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru)

I. M. Usatyy, Scientist, Belgorod State National Research University (Russia, 308007, Belgorod, Student str., 14) (e-mail: 718097@bsu.edu.ru)

O. N. Ivanov, Doctor of Phisico-Mathematical Sciences, Belgorod State National Research University (Russia, 308007, Belgorod, Student str., 14) (e-mail: ivanov.oleg@bsu.edu.ru)

S.V. Ivanchikhin, Scientist, Belgorod State National Research University (Russia, 308007, Belgorod, Student str., 14) (e-mail: 632805@bsu.edu.ru)

T. B. Nikulicheva, Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Belgorod State National Research University (Russia, 308007, Belgorod, Student str., 14)
(e-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru)

F.F. Niyazi, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya str., 94) (e-mail: farukhniyazi@yandex.com)

V.M. Emelyanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya str., 94) (e-mail: emelianov@nt.ru)

STUDY OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF PEROVSKIT MANGANITE

$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$

A ceramic sample of perovskite manganite $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ (LSMO) was obtained using a conventional solid-phase reaction. In accordance with the results of x-ray phase analysis, it was found that the sample LSMO had a rhombohedral structure (space group $R3c$). The lattice parameters of the studied sample: $a = 5.473 \text{ \AA}$; $b = 5.473 \text{ \AA}$; $c = 13.345 \text{ \AA}$. The temperature dependence of the resistance of ceramic $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ in the temperature range 5–310 K in magnetic fields up to 5T was investigated. Measurements of the temperature dependence of electrical conductivity were carried out on a Mini Cryogen Free Measurements System (Cryogenic Ltd, UK) automated closed loop installation. Within the framework of the phenomenological model, the mechanisms of carrier relaxation for various temperature ranges were identified. It was shown that in the temperature range $T = 25\text{--}80\text{K}$, manganite is described by a power dependence $\sim T^3$, which indicates the half-metallic nature of conductivity. Also, the low-temperature minimum of the electrical resistance was analyzed in the framework of the model of charge carriers tunneling. In samples LSMO, the resistivity was suppressed by an external magnetic field (the effect of colossal magnetoresistance, which is characteristic of many compounds of manganites of varying manganese valence). Within the framework of the phenomenological model, mechanisms of carrier relaxation in various temperature ranges were identified. In the high-temperature region ($T > 200 \text{ K}$), a metal-insulator transition is observed with the transition temperature T_{MI} . Within the framework of the proposed phenomenological model, the experimental data of the resistivity were approximated, and the types of scattering in the temperature range $5\text{K} < T < T_{MI}$ were revealed. Within the framework of the model, the weak localization effect ($\sim T^{1/2}$), one-magnon ($\sim T^3$), and electron-electron ($\sim T^2$) scattering processes were identified. The results of the approximation were analyzed and brought to the corresponding models. The overall picture of the behavior of the electrical resistivity in the vicinity of the metal-dielectric transition where the effect of colossal magnetoresistance was observed was typical for most ceramic manganites of perovskites and was analyzed taking into account the double exchange model. Using the model of intergranular spin-polarized tunneling, the low-temperature minimum of the electrical resistance of the manganite was qualitatively analyzed. It was shown that in the temperature range $T = 25\text{--}80\text{K}$, manganite is described by a power dependence $\sim T^3$, which indicates the semi-metallic nature of conductivity. Also, the low-temperature minimum of the electrical resistance was analyzed in the framework of the model of intergranular spin-polarized tunneling. The results of the calculations were tabulated and a regular change in the calculated parameters is shown as the magnetic field increases.

Key words: temperature dependence, ceramics, magnetic field, perovskite manganite, electrical conductivity, magnetoresistance.

For citation: Zakhvalinskii V.S., Usatyy I. M., Ivanov O. N., Ivanchikhin S.V., Nikulicheva T. B., Niyazi F.F., Emelyanov V.M. Study of the Electrical Conductivity of Perovskite Manganite $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$. Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 68–77 (in Russ.).

Reference

1. Siwach P. K., Singh H. K., Srivastava O. N. Low field magnetotransport in manganites. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, no. 20 (27), p. 273201.
2. Loktev V. M., Pogorelov Ju. G. Osobennosti fizicheskikh svojstv i kolossal'noe magnitosoprotivlenie manganitov. *Fizika nizkih temperatur*, 2000, vol. 26, no. 3, pp. 231-261.
3. Rozenberg E., Auslender M., Felner I., Gorodetsky G. J. *Appl. Phys.*, 2000, no. 88, p. 2578.
4. Gopalarao T.R., Ravi S., Pamu D. Electrical transport and magnetic properties of epitaxial $Nd_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ thin films on (001)-oriented $LaAlO_3$ substrate. *Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 409, pp. 148-154.
5. Tokura Y. *Rep. Prog. Phys.*, 2006, vol. 69, p. 797.
6. Zener C. *Phys. Rev.*, 1951, vol. 82, p. 403.
7. Urushibaru A., Moritomo Y., Arima T. *Phys. Rev.*, 1995, B 51, p. 14103.
8. Auslender M. I., Rozenberg E., Kar'kin A. E., Chaudhuri B. K., Gorodetsky G. J. *Alloy Comp.*, 2001, vol. 326, p. 81.
9. Auslender M., Kar'kin A. E., Rozenberg E., Gorodetsky G. J. *Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, p. 6639.
10. Gamzatov A. G., Batdalov A. B., Mel'nikov O. V., Gorbenko O. Ju. *FNT*, 2009, vol. 35, p. 290.
11. Xu Y., Zhang J., Cao G., Jing C., Cao S. *Phys. Rev.*, 2006, B 73, p. 224410.
12. Lalitha G., Venugopal Reddy P. J. *Alloy Comp.*, 2010, vol. 494, p. 476.
13. Zhang J., Xu Y., Cao Sh., Zhang Y., Jing C. *Phys. Rev.*, 2005, B 72, p. 054410.
14. Gamzatov A. G., Gadzhimuradov T. A., Zhenven Li, Li Pi, JujenChzhan Nizkotemperaturnyj transport v manganite $La_{0.5}Ca_{0.4}Li_{0.1}MnO_3$ v sil'nyh magnitnyh poljah / *ZhJeTF*, 2016, vol. 149, is. 1, pp. 172-180.
15. Kubo K., Ohata N. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1972, 33, 1, 21.
16. Goodings D.A. *Phys. Rev.*, 1963, 132, 2, 542.
17. Raquet B., Virtet M., Broto J.M., Sondergard E., Cespedes O., Mamy R. J. *Appl. Phys.*, 2002, 91, 10, 8129.
18. Bojkov Ju.A., Klason T., Danilov V.A. *FTT*, 2005, vol. 47, p. 2189.
19. Mehri A., Cheikhrouhou-Koubaa W., Koubaa M., Cheikhrouhou A. Effect of sodium substitution on the structural, magnetic and magnetocaloric properties of $La_{0.5}Ca_{0.5}MnO_3$ perovskite manganites. *Phys. Procedia* 2, 2009, pp. 975-982.
20. Furukawa N. Unconventional one-magnon scattering resistivity in half-metals. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2000, vol. 69, pp. 1954-1957.
21. Snyder G.J., Hiskes R., DiCarolis S., Beasley M.R., Geballe T.H. Intrinsic electrical transport and magnetic properties of $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ and $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ MOCVD thin films and bulk material. *Phys. Rev.*, B 53, 1996, pp. 14434-14444.
22. Shamsuddin S., Supardan S.N., Abdel-Baset Ibrahim M.A., Yahya A.K. Supercond J. Ultrasonic anomaly near the charge ordering transition in Sr-doped $Nd_{0.3}La_{0.2}Ca_{0.5-x}Sr_xMnO_3$ manganites. *Nov. Magn.*, 27, 2013, pp. 1229-1234.
23. Tozri A., Khelifi J., Baaziz H., Dhahri E., Hlil E.K. Electrical transport studies on the $La_{0.7-x}Pr_xBa_{0.3}MnO_3$ ($x = 0, 0.1$ and 0.2) manganite: double metal-insulator transitions and low-temperature resistivity minimum. *Mater. Lett.*, 2014, vol. 131, pp. 61-63.