

С. Е. Никитин<sup>1,2</sup>, С. И. Попков<sup>2</sup>, М. И. Петров<sup>2</sup>, К. Ю. Терентьев<sup>2</sup>  
С. В. Семенов<sup>1,2</sup>, К. А. Шайхутдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет  
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Академгородок, 50, строение 38, Красноярск, 660036, Россия

nikitin.stas.92@mail.ru, dir@iph.krasn.ru, smp@iph.krasn.ru, gistapoz@mail.ru  
svsemenov@iph.krasn.ru, smp@iph.krasn.ru

## ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАНГАНИТА $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ \*

Представлены результаты исследования магнетосопротивления на двухслойном монокристаллическом манганите лантана  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  при пропускании транспортного тока вдоль оси  $c$  ( $j \parallel c$ ) и приложении внешнего магнитного поля  $H \parallel j$  и  $H \perp j$ . В монокристалле  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  в случае, когда  $H \perp j$ , помимо присущего всем замещенным манганитам лантана отрицательного магнетосопротивления в температурном диапазоне  $T < 60$  К, обнаружен эффект положительного магнетосопротивления. Механизм возникновения данного эффекта принципиально отличается от эффекта колоссального магнетосопротивления, присущего всем манганитам лантана. Мы считаем, что появление положительного магнетосопротивления вызвано спин-зависимым туннелированием носителей между марганец-кислородными бислоями, при данной конфигурации «магнитное поле – ток», и может быть объяснено особенностями магнитной структуры данных составов.

*Ключевые слова:* манганиты лантана, положительное магнетосопротивление.

Двухслойные манганиты лантана известны как материалы, обладающие богатыми фазовыми диаграммами, включающими области с зарядовым и орбитальным упорядочением, а также различными формами магнитного порядка. Большой интерес в изучении манганитов обусловлен открытием в них эффекта колоссального магнетосопротивления (КМС) [1].

Одной из самых перспективных систем для исследования физических свойств двухслойных манганитов является состав

$\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$  [2]. Это соединение со смешанной валентностью можно представить как твердый раствор, состоящий из диэлектрических составов  $\text{La}_2\text{SrMn}_2\text{O}_7$  и  $\text{Sr}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ . Их формальные валентности  $(\text{La}^{3+})_2(\text{Sr}^{2+})(\text{Mn}^{3+})_2(\text{O}^{2-})_7$  и  $(\text{Sr}^{2+})_3(\text{Mn}^{4+})_2(\text{O}^{2-})_7$  дают в сумме состав с валентностью  $(\text{La}^{3+})_{2-2x}(\text{Sr}^{2+})_{1+2x}(\text{Mn}^{3+})_{2-2x}(\text{Mn}^{4+})_{2x}(\text{O}^{2-})_7$ . В данной работе исследовался состав с  $x = 0,3$ . Монокристалл  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  испытывает переход в ферромагнитное (ФМ) состояние при температуре  $T_c = 110$  К, сопровождаю-

---

\* Материалы, приведенные в данной статье, были доложены на X Сибирском молодежном семинаре по высокотемпературной сверхпроводимости и физике наноструктур «ОКНО-2014».

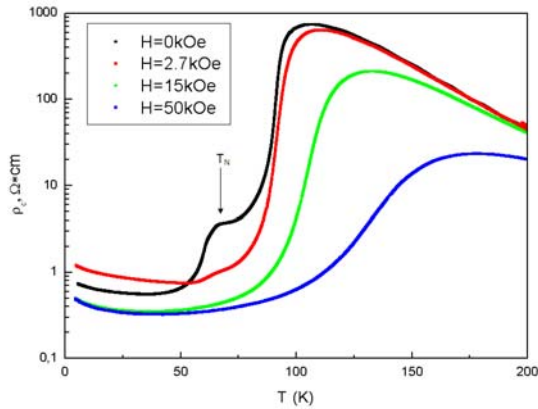
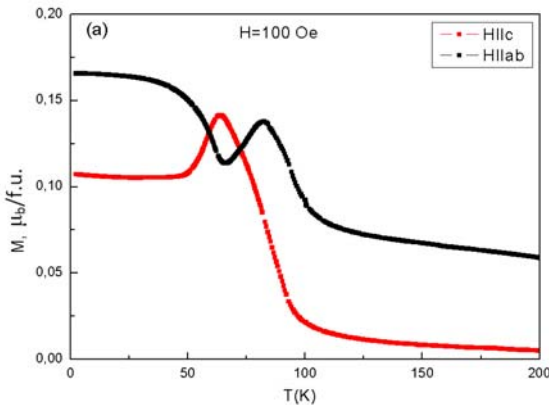
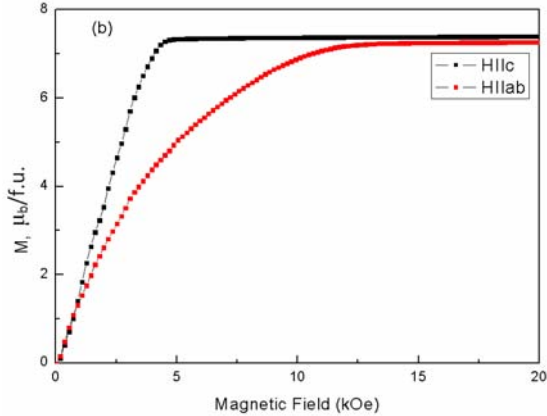


Рис. 1. Зависимость электросопротивления  $\rho_c$  от температуры  $T$  при различных магнитных полях  $H \parallel ab$  образца  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$



а



б

Рис. 2. Зависимость намагниченности  $M$  образца  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  при геометрии  $H \parallel c$  и  $H \parallel ab$ :  
а – от температуры  $T$  в поле  $H = 100$  Э;  
б – от магнитного поля  $H$  при температуре  $T = 2$  К

щийся линейным сжатием решетки вдоль  $c$ -оси [3]. В ФМ состоянии кристалл  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  имеет легкую ось намагничивания, вдоль кристаллографического направления  $c$  [2].

Транспортные свойства данного состава исследовались в ряде работ [4; 5]. Согласно этим данным, известно, что при температуре ФМ упорядочения образец испытывает переход металл-диэлектрик. Другой особенностью слоистых манганитов является резкая анизотропия электросопротивления. Так, электросопротивление вдоль оси  $c$  на несколько порядков превосходит электросопротивление в  $ab$ -плоскости. На монокристаллах  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  проводились измерения магнетосопротивления, однако не было исследований влияния направления приложения магнитного поля на магнитотранспортные характеристики.

Целью данной работы является исследование магнитотранспортных и магнитных свойств состава  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  при приложении магнитного поля вдоль и перпендикулярно кристаллографической оси  $c$ .

В работе методом оптической зонной плавки был синтезирован монокристалл состава  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ . Рост проходил в атмосфере кислорода, скорость роста – 5 мм/ч, вращение стержней – 30 об./мин.

Измерения магнитотранспортных и магнитных свойств проводились на установке РРМС-9QD и с помощью вибрационного магнитометра со сверхпроводящим соленоидом [6].

Измерения удельного электросопротивления проводились четырехзондовым методом вдоль оси  $c$  ( $\rho_c$ ) кристалла. Учитывая тот факт, что анизотропия электросопротивления между направлением  $c$  и плоскостью  $ab$  составляет около 3-х порядков, токовые и потенциальные контакты наносились на верхнюю и нижнюю плоскости исследуемого образца, стандартные размеры которого составляли  $4 \times 2,5 \times 0,3$  мм. Контакты наносились при помощи двухкомпонентного клея Epotek H20E. При измерениях электросопротивления магнитное поле прикладывалось параллельно плоскости  $ab$  или направлению  $c$  ( $H \parallel ab$  и  $H \parallel c$ ) кристалла.

На рис. 1 представлена полученная зависимость  $\rho_c(T)$  для исследуемого образца  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ . Как видно из представленного графика, образец демонстрирует классический для манганитов переход металл-диэлектрик при температуре  $T_c = 110$  К, сопровождающийся ФМ упорядочением в бислоях [3]. При отсутствии магнитного поля при температуре  $T_{c2} = 65$  К на графике

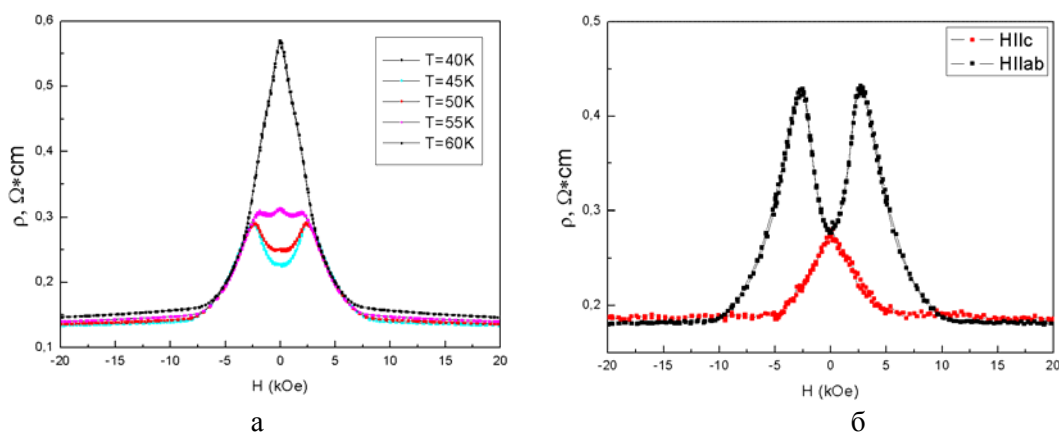


Рис. 3. Зависимость электросопротивления  $\rho_c$  образца  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ :

*a* – от магнитного поля  $H \parallel ab$  при температуре  $T = 40\text{--}60$  К;

*б* – от магнитного поля  $H \parallel ab$ ,  $H \parallel c$  при температуре  $T = 4,2$  К

зависимости  $\rho_c(T)$  имеется локальный максимум, температура которого совпадает с максимумом на зависимости  $M_c(T)$   $H = 100$  Э (рис. 2) и минимумом на зависимости  $M_{ab}(T)$   $H = 100$  Э и соответствует возникновению скошенного АФМ упорядочения в части образца [3]. Возникновение подобной особенности на зависимости  $\rho_c(T)$  является распространенным эффектом, который наблюдается при изучении электропроводности в слоистых структурах и описано в работе [7]. Включение магнитного поля подавляет дополнительный максимум, и он полностью исчезает при приложении поля 15 кЭ. Как видно из сравнения зависимостей  $\rho_c(T)$ , полученных при различных величинах приложенного магнитного поля  $H \parallel ab$ , при температурах  $T < T_c$  в поле  $H = 2$  кЭ сопротивление образца превышает сопротивление, измеренное без приложения внешнего магнитного поля. Дальнейшее увеличение магнитного поля ведет к падению электросопротивления. Для того чтобы более подробно изучить данную особенность, были измерены зависимости  $\rho_c(H)$  в диапазоне температур  $T = 2\text{--}80$  К. Как видно из рис. 3, *a*, электросопротивление образца увеличивается при приложении магнитного поля вплоть до критического поля  $H_c \sim 3$  кЭ, далее идет смена знака эффекта, и мы наблюдаем классический для манганитов эффект отрицательного магнетосопротивления, вплоть до  $H = 15$  кЭ, когда наступает насыщение. Показательным является тот факт, что эффект положительного магнетосопротивления не наблюдается при приложении магнитного поля вдоль оси  $c$ , о чем свидетельствует рис. 3, *б*.

Для обсуждения наблюдаемого эффекта рассмотрим магнитную структуру монокристалла  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}\text{Mn}_2\text{O}_7$  при  $T < T_{c2}$ . Согласно работе [3] в исходном составе связи в бислоях всегда ферромагнитны в плоскости  $ab$ , однако магнитное упорядочение вдоль оси  $c$  между бислоями может быть как антиферромагнитным, так и ферромагнитным, скошенным вдоль направления  $c$ . В общем случае в образце реализуется состояние, при котором сосуществуют АФМ и скошенная ФМ фазы.

Рассмотрим процесс намагничивания исходного состава при приложении магнитного поля  $H \parallel c$  при  $T < T_{c2}$  (рис. 2, *б*). В данном случае происходит подворот скошенных спинов ионов марганца в ФМ фазе образца (изначальный угол скоса  $\theta \sim 10^\circ$  [3]), а также выстраивание магнитных моментов АФМ фазы, лежащих в плоскости  $ab$ , вдоль направления поля, вследствие чего происходит падение электросопротивления  $\rho_c$ , так как интеграл переноса, согласно механизму двойного обмена  $t \sim \cos(\theta/2)$  [8] ( $\theta$  – угол между соответствующими спинами ионов Mn). При достижении поля 5 кЭ, когда все спины выстраиваются вдоль направления  $c$ , намагниченность достигает максимального значения  $M_{\text{sat}} = 7,8$  мб/у.с.; электросопротивление достигает минимального значения, на котором продолжает оставаться при дальнейшем увеличении магнитного поля.

При приложении поля вдоль плоскости  $ab$  картина намагничивания значительно отличается. В полях до  $H_c = 3$  кЭ происходит упорядочение моментов ферромагнитных бислоев в плоскость  $ab$ , причем данный

процесс сопровождается ростом электросопротивления, так как угол между соответствующими спинами ионов  $Mn^{3+}-Mn^{4+}$  увеличивается [3]. При превышении поля  $H_c = 3$  кЭ все моменты ФМ бислоев оказываются выстроены в плоскости  $ab$  и дальнейшее приложение магнитного поля приводит к окончательному подвороту спинов в плоскости  $ab$  вдоль направления магнитного поля  $H$ , угол между соответствующими спинами  $Mn^{3+}-Mn^{4+}$  уменьшается, что, в свою очередь, приводит к падению электросопротивления. В поле 15 кЭ, когда все магнитные моменты оказываются выстроены по направлению приложения магнитного поля, сопротивление достигает своего минимального значения, так как угол между спинами  $Mn^{3+}-Mn^{4+}$  оказывается равен 0. Величина электросопротивления в насыщении совпадает как в случае  $H \parallel c$ , так и в случае  $H \parallel ab$  (рис. 3, б).

Таким образом, в работе проведены исследования зависимостей магнетосопротивления монокристалла  $La_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$  в широком температурном диапазоне в зависимости от направления приложения внешнего магнитного поля. Был обнаружен эффект положительного магнетосопротивления в области слабых магнитных полей  $H < 15$  кЭ, при приложении магнитного поля вдоль плоскости  $ab$  кристалла. Причина возникновения наблюдаемого эффекта, по всей видимости, связана со сложной скошенной магнитной структурой образца, состоящей из двух магнитных фаз, образующихся при различных температурах.

## Список литературы

1. Moritomo Y. et al. Giant magnetoresistance of manganese oxides with a layered perovskite structure // Letters to Nature. 1996. Vol. 380. P. 141–144.
2. Kimura T., Tokura Y. Layered magnetic manganites // Annual review of materials science. 2000. T. 30, № 1. С. 451–474.
3. Argyriou D. N. et al. Lattice effects and magnetic structure in the layered colossal magnetoresistance manganite  $La_{2-2x}Sr_{1+2x}Mn_2O_7$ ,  $x = 0.3$  // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59, № 13. P. 8695.
4. Kimura T. et al. Pressure-enhanced inter-plane tunneling magnetoresistance in a layered manganite crystal // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 79, № 19. P. 3720.
5. Arumugam S. et al. Effect of uniaxial pressure on charge transport in the layered manganite  $La_{1.25}Sr_{1.75}Mn_2O_7$  // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 21. P. 212412.
6. Balaev A. D. et al. Automated magnetometer with superconducting solenoid // Instrum. Exp. Tech. 1985. Vol. 26, № 3.
7. Lavrov A. N. et al. Competition and co-existence of antiferromagnetism and superconductivity in  $RBa_2Cu_3O_{6+x}$  ( $R = Lu, Y$ ) single crystals // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79, № 21. P. 214523.
8. Anderson P. W., Hasegawa H. Considerations on double exchange // Phys. Rev. 1955. Vol. 100, № 2. P. 675.

Материал поступил в редколлегию 03.02.2015

S. E. Nikitin<sup>1</sup>, S. I. Popkov<sup>1,2</sup>, M. I. Petrov<sup>2</sup>, K. Yu. Terent'ev<sup>2</sup>  
S. V. Semenov<sup>1,2</sup>, K. A. Shaikhutdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University  
79 Svobodnyi Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Physics of SB RAS  
Akademgorodok, 50, building 38, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

nikitin.stas.92@mail.ru, dir@iph.krasn.ru, smp@iph.krasn.ru, gistapoz@mail.ru  
svsemenov@iph.krasn.ru, smp@iph.krasn.ru

## FEATURES OF MAGNETORESISTANCE IN THE BILAYER SINGLE CRYSTAL MANGANITE $La_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$

We investigate magnetoresistance of single-crystal bilayer lanthanum manganite  $La_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$  at a transport current flowing along the crystal  $c$  axis and in external magnetic fields applied parallel to the crystal  $c$  axis or  $ab$  plane. It is demonstrated that the  $La_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$  manganite exhibits the positive magnetoresistance effect in the magnetic field applied in the  $ab$  plane of the sample at the temperatures  $T < 60$  K. The mechanism of this effect is shown to be fundamentally different from the colossal magnetoresistance effect typical of lanthanum manganites. The positive magnetoresistance originates from spin-dependent tunneling of carriers between the manganese-oxygen bilayers and can be explained by features of the magnetic structure of the investigated compounds.

*Keywords:* manganite, positive magnetoresistance.