

УДК 537.622 : 548 : 546.714-383

МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ А-КАТИОН-УПОРЯДОЧЕННЫХ МАНГАНИТОВ В ОБЛАСТИ КОМНАТНЫХ ТЕМПЕРАТУР (За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

С. В. Труханов¹, И. О. Троянчук¹, А. В. Труханов², Н. Szymczak³

¹Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, 220072 Минск, ул. П. Бровки 17, Республика Беларусь, (e-mail : truhanov@ifftp.bas-net.by)

²Витебский Государственный Университет им. П.М. Машерова, 210036 Витебск, Московский пр. 33, Республика Беларусь

³Institute of Physics, PAS, 02-668 Warsaw, Lotnikov str. 32/46, Poland

Аннотация

МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ А-КАТИОН-УПОРЯДОЧЕННЫХ МАНГАНИТОВ В ОБЛАСТИ КОМНАТНЫХ ТЕМПЕРАТУР

С. В. Труханов, И. О. Троянчук, А. В. Труханов, Н. Szymczak

Методом двухступенчатого синтеза получены А-катион-упорядоченные манганиты $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$. Исследованы их химический состав, кристаллическая структура, магнитные и магнитотранспортные свойства. Обнаружено, что физические свойства А-катион-упорядоченных манганитов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ значительно отличаются от свойств А-катион-разупорядоченных $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$, и сильно зависят от степени упорядочения катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} . Так, А-катион-разупорядоченный образец характеризуется кубической ($SG = Pm\bar{3}m$) элементарной ячейкой, в то время как А-катион-упорядоченный характеризуется тетрагональной ($SG = P4/mmm$) ячейкой. Катионные состояния в исследуемой системе являются обратимыми. Катион-упорядоченное состояние стабильно после термообработки на воздухе до 1300 °С. Упорядочение катионов приводит к значительному увеличению критических температур фазовых переходов. Так, образец $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ с максимальной степенью порядка является “металлом” ниже $T_{\text{MI}} \sim 311$ К, в то время как для полностью разупорядоченного образца T_{MI} достигает лишь ~ 137 К. Чуть ниже T_{MI} все образцы демонстрируют пик магнитосопротивления, который составляет $\sim 10\%$ и $\sim 65\%$ в поле 9 кЭ для полностью упорядоченного и неупорядоченного образцов, соответственно. Это очень важное качество, пик магнитосопротивления в области комнатных температур, обуславливает потенциальную практическую значимость А-катион-упорядоченных манганитов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$. Полученные магнитные материалы могут быть использованы при разработке датчиков магнитного поля, а также в устройствах хранения информации.

Ключевые слова: Двухступенчатый синтез, упорядочение катионов, манганиты, магнитосопротивление.

Анотація

МАГНІТООПІР А-КАТІОН-ВПОРЯДКОВАНИХ МАНГАНІТІВ
В ОБЛАСТІ КІМНАТНИХ ТЕМПЕРАТУР

С. В. Труханов, І. О. Троянчук, А. В. Труханов, Н. Сzymczak

Методом двоступінчастого синтезу отримані А-катіон-впорядковані манганіти $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$. Досліджено їх хімічний склад, кристалічна структура, магнітні та магнітотранспортні властивості. Виявлено, що фізичні властивості А-катіон-впорядкованих манганітів $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ значно відрізняються від властивостей А-катіон-розупорядкованих $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$, і сильно залежать від ступеню впорядкування катіонів Pr^{3+} і Ba^{2+} . Так, А-катіон-розупорядкований зразок характеризується кубічним ($SG = Pm\bar{3}m$) елементарною коміркою, у той час як А-катіон-впорядкований характеризується тетрагональною ($SG = P4/mmm$) коміркою. Катіонні стани в досліджуваній системі є зворотними. Катіон-впорядкований стан є стабільним після термообробки на повітрі до 1300 °С. Упорядкування катіонів призводить до значного збільшення критичних температур фазових переходів. Так, зразок $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ з максимальним ступенем порядку є “металом” нижче $T_{\text{MI}} \sim 311$ К, у той час як для повністю розупорядкованого зразка T_{MI} досягає лише ~ 137 К. Трохи нижче T_{MI} всі зразки демонструють пік магнітоопору, що становить $\sim 10\%$ і $\sim 65\%$ у полі 9 кЕ для повністю впорядкованого та неупорядкованого зразків відповідно. Це дуже важлива якість, пік магнітоопору в області кімнатних температур, спричиняє потенційну практичну значимість А-катіон-впорядкованих манганітів $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$. Отримані магнітні матеріали можуть бути використані при розробці датчиків магнітного поля, а також у пристроях зберігання інформації.

Ключові слова: двоступінчатий синтез, впорядкування катіонів, манганіти, магнітоопір.

Annotation

MAGNETORESISTANCE OF A-CATION-ORDERED MANGANITES
AT THE ROOM TEMPERATURES

S. V. Trukhanov, I. O. Troyanchuk, A. V. Trukhanov, H. Szymczak

The A-cation-ordered manganites $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ are obtained using two-step synthesis. Their chemical composition, crystal structure, magnetic and magnetotransport properties are investigated. It is revealed that the physical properties of the A-cation-ordered manganites $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ are considerably distinguished from ones of the A-cation-disordered $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$ and strongly depend on the ordering degree of cations Pr^{3+} and Ba^{2+} . So, A-cation-disordered sample is characterized by cubic ($SG = Pm\bar{3}m$) unit cell, while the A-cation-ordered one is characterized by tetragonal ($SG = P4/mmm$) cell. The cation states in this system are reversible. The cation-ordered state is stable after the thermal treatment in air up to 1300 °C. The cation ordering leads to considerable increase of the critical phase transition temperatures. So, the sample $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ with maximum ordering degree is “metal” below $T_{\text{MI}} \sim 311$ K, while for the completely disordered one T_{MI} reaches ~ 137 K. Slightly below T_{MI} all the samples display the magnetoresistance peak, which is $\sim 10\%$ and $\sim 65\%$ in field of 9 kOe for the completely ordered and disordered samples, respectively. This important feature, magnetoresistance peak at the room temperatures, determined the potential practical significance of the A-cation-ordered manganites $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$. The obtained magnetic materials may be used for the elaboration of magnetic field sensors as well as in devices of information storage.

Key words: Two-step synthesis, cation ordering, manganites, magnetoresistance.

Интерес к манганитам $Ln_{1-x}A_xMnO_3$ ($Ln = La, Pr, Nd$; $A = Ca, Sr, Ba$), который не ослабевает до сих пор [1], связан в основном с проблемой понимания природы так называемого “колоссального” магнитосопротивления (КМС). В первой половине 90-х годов прошлого столетия было обнаружено, что система $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ демонстрирует метамагнитный переход во внешнем магнитном поле из антиферромагнитного зарядово-упорядоченного состояния в ферромагнитное зарядово-разупорядоченное, при этом величина электросопротивления падает на несколько порядков [2]. Как показало развитие ситуации в области исследования свойств манганитов, для понимания эффекта магнитосопротивления необходимо учитывать наличие и взаимосвязь нескольких степеней свободы рассматриваемых систем: решеточной, орбитальной, зарядовой и спиновой [3]. Основным фактором определяющим свойства манганитов является величина отношения разновалентных ионов марганца. Из всех манганитов наибольший интерес к себе, в последнее время, привлекают Ва-замещенные. Уникальные физические свойства манганитов типа $LnBaMn_2O_6$ ($Ln = Y$ и редкоземельные ионы) обусловлены упорядочением катионов в А-подрешетке перовскита [4-12]. Главная структурная особенность этих катион-упорядоченных соединений заключается в том, что плоскости MnO_2 чередуются с двумя плоскостями LnO и BaO полностью заполненными одним типом катионов, в результате чего октаэдры MnO_6 искажаются периодически. Катион-упорядоченные соединения могут быть получены методом обратимых топотактических восстановительно-окислительных реакций [9]. Стехиометрические по кислороду соединения $LnBaMn_2O_6$, полученные на воздухе по обычной керамической технологии, являются кубическими со статистическим распределением катионов Ln^{3+} и Ba^{2+} , в то время как анион-дефицитные $LnBaMn_2O_5$ обладают тетрагональной элементарной ячейкой с упорядоченным распределением катионов Ln^{3+} и Ba^{2+} . Плоскости оснований перовскитного кубооктаэдра полностью заполнены одним типом ионов и чередуются вдоль направления $[001]$. Такая кристаллическая структура подобна структуре $YBaCuFeO_5$ [13]. Окисление на воздухе анион-дефицитного со-

единения $LnBaMn_2O_5$ приводит к образованию стехиометрического катион-упорядоченного $LnBaMn_2O_6$, который также является тетрагональным. Такой тип упорядочения катионов увеличивает температуру перехода из металлического ферромагнитного состояния в диэлектрическое парамагнитное в случае Pr^{3+} со ~ 140 до ~ 320 К. Как в первом, так и во втором случае чуть ниже T_C наблюдается эффект магнитосопротивления [10]. Перспективы практического использования таких материалов связаны с тем, что фазовые переходы находятся в области комнатных температур. Для катион-упорядоченных манганитов $PrBaMn_2O_6$ и $NdBaMn_2O_6$ основным магнитным состоянием является антиферромагнитное, А-типа [14]. В соединении $LaBaMn_2O_6$ антиферромагнитная фаза СЕ-типа сосуществует с ферромагнитной.

Исходное соединение, катион-упорядоченный $PrBaMn_2O_6$, было получено методом двухступенчатого синтеза. В начале, полученный на воздухе при 1550 °С по обычной керамической технологии катион-разупорядоченный манганит $Pr_{0.50}Ba_{0.50}MnO_3$ был восстановлен в вакууме при 800 °С в течение 24 часов до фазы “ $O_{2.50}$ ”. Фаза “ $O_{2.50}$ ” характеризуется упорядоченным расположением катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} в плоскостях (001) чередующихся вдоль направления $[001]$. В результате чего элементарная ячейка этой фазы “ $O_{2.50}$ ” удваивается и мы будем обозначать ее как “ O_5 ”. Анион-дефицитный образец $PrBaMn_2O_5$ был окислен на воздухе при 800 °С в течение 5 часов до фазы “ O_6 ”. Затем стехиометрический катион-упорядоченный манганит $PrBaMn_2O_6$ был подвергнут пошаговому отжигу на воздухе в течение 10 часов при 1100 , 1200 и 1300 °С.

Определение химического состава было выполнено методом электронной оже-спектроскопии на электронном сканирующем оже-спектрометре РНІ-660. Микроструктура всех полученных образцов была исследована на сканирующем электронном микроскопе NANOLAB-7. Величина содержания кислорода была установлена методом термогравиметрического анализа. Таким образом, химическая формула исследуемых соединений может быть записана в виде $PrBaMn_2O_{6.00\pm 0.02}$. Рентгенографический анализ был проведен на диф-

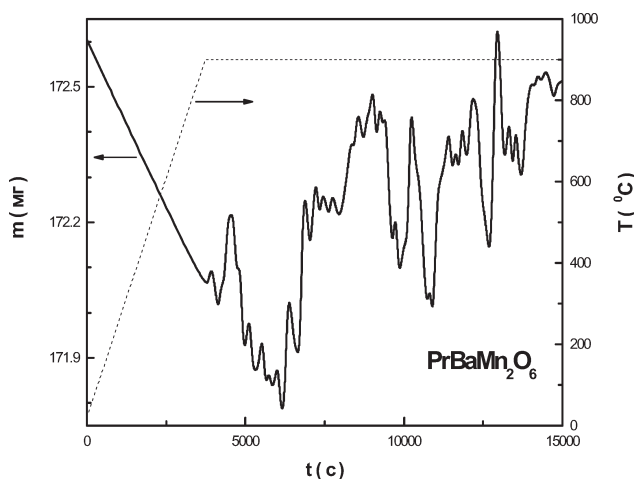


Рис. 1. Результаты термогравиметрического анализа для катион-упорядоченного образца Ba^{2+} ($A = 100\%$).

рактометре ДРОН-3 в K_{α} излучении Cr при комнатной температуре. Степень A -упорядочения катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} была получена для всех соединений $[Pr_g Ba_{1-g}]_P [Pr_{1-g} Ba_g]_B Mn_2O_6$ при рассмотрении интенсивности сверхструктурного дифракционного рефлекса $(0\ 0\ \frac{1}{2})$, где $[]_P$ и $[]_B$ представляют кристаллографические позиции Pr и Ba , а g величина, которая изменяется от 0.5 до 1 для полностью разупорядоченного ($A = 0\%$) и полностью упорядоченного ($A = 100\%$) образцов, соответственно. Измерения магнитной динамической восприимчивости были выполнены используя мост взаимной индукции в интервале температур 77-350 К. Частота магнитного поля составляла 1200 Гц. Температура Кюри (T_C) определялась, как минимум производной от динамической магнитной восприимчивости по температуре $d(\chi)/dT$. Величина удельного электрического сопротивления исследуемых образцов была измерена стандартным четырех-зондовым методом в температурном интервале 77-350 К. Величина магнитосопротивления рассчитывалась исходя из соотношения — $MR = \{[\rho(H) - \rho(0)] / \rho(0)\} * 100\%$, где MR — величина отрицательного изотропного магнитосопротивления, выраженная в процентах, $\rho(H)$ — удельное электросопротивление в магнитном поле 9 кЭ, $\rho(0)$ — электросопротивление в отсутствии магнитного поля. Отжиг на воздухе анион-дефицитной катион-упорядоченной фазы “ O_5 ” при температурах в интервале 300 — 800 °С приводит к образова-

нию стехиометрической фазы “ O_6 ”, при чем упорядоченное расположение катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} в плоскостях (001) сохраняется. Дальнейшая пошаговая термическая обработка на воздухе фазы “ O_6 ” в интервале 900 -1300 °С не изменяет содержание кислорода (рис. 1). Для $PrBaMn_2O_6$ ($A = 100\%$) отжиг при 900 °С привел к изменению массы < 0.06 %.

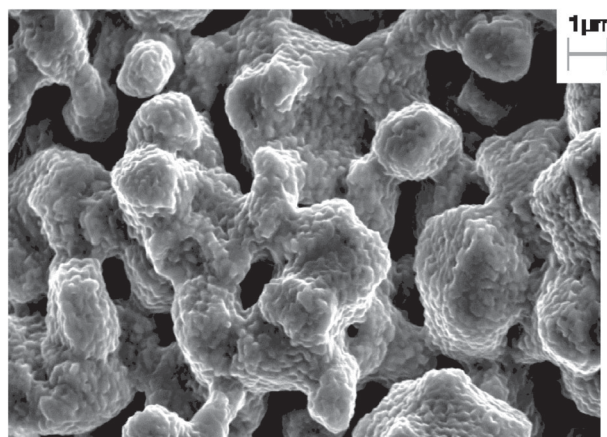


Рис. 2. Фотография результата исследования на сканирующем электронном микроскопе для катион-упорядоченного образца $PrBaMn_2O_6$ ($A = 100\%$).

Исследования методом оже-спектроскопии всех полученных образцов не выявили наличия других химических элементов, кроме Pr , Ba , Mn и O . Соотношение катионов, в пределах погрешности измерения, составляло 1 : 1 : 2 для всех образцов. Исследование морфологии и однородности распределения химических элементов были выполнены методом сканирующей электронной микроскопии. Исходный стехиометрический катион разупорядоченный образец $Pr_{0.50} Ba_{0.50} MnO_3$ характеризуется средним размером гранул $\langle D \rangle \sim 5$ мкм, в то время как все катион-упорядоченные образцы $PrBaMn_2O_6$ вне зависимости от степени упорядочения A состоят из наноразмерных гранул $\langle D \rangle \sim 100$ нм. Наногранулы объединяются в определенную мозаичную структуру, из которой и состоит весь поликристалл. Установлено также, что все полученные образцы обладают однородным распределением химических элементов, соответствующих номинальной химической записи $PrBaMn_2O_6$. Размер гранул в определенной степени формирует свойства кристаллической структуры. С уменьшением размера гранул до нанометро-

вого масштаба уменьшается объем элементарной ячейки, что объясняется увеличением сил поверхностного натяжения по сравнению с силами упругости объемного материала.

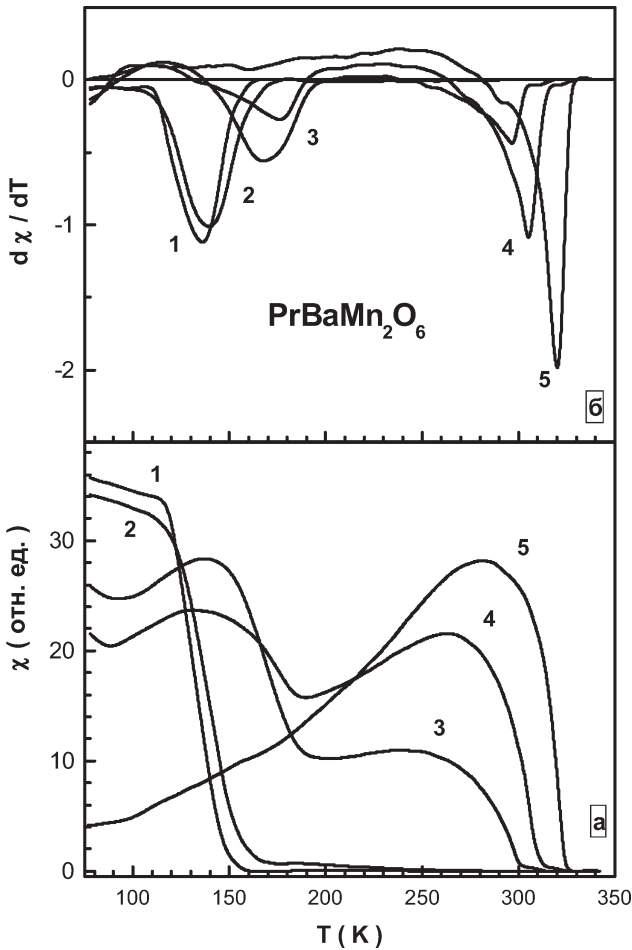


Рис. 3. Зависимость динамической магнитной восприимчивости (а) и ее производной (б) от температуры для катион-упорядоченных образцов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ с различной степенью упорядочения:

1 (исходный $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$), 2 — $A = 0\%$,
3 — $A = 50\%$, 4 — $A = 70\%$, 5 — $A = 100\%$.

При комнатной температуре исходный катион-разупорядоченный образец $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$ является кубическим перовскитом ($Pm\bar{3}m$, $Z = 1$) с параметром элементарной ячейки $a = 3.901 \text{ \AA}$ ($V = 59.37 \text{ \AA}^3$). Наличие кубической симметрии указывает на статистическое распределение катионов в кристаллической структуре. Все катион-упорядоченные образцы $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ демонстрируют тетрагональный тип искажения ($P4/mmm$, $Z = 2$) вызванный упорядочением катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} в плоскостях (001) и, следовательно, удвоением элементарной ячейки вдоль направления

$[001]$. Параметры элементарной ячейки для катион-упорядоченного образца $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$, отожженного на воздухе при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 часов, составляют $a = 3.900 \text{ \AA}$ и $c = 7.775 \text{ \AA}$ ($V = 118.26 \text{ \AA}^3$). Непосредственным доказательством упорядочения катионов является наличие сверхструктурных рефлексов на дифрактограммах, а также результаты ранее выполненных экспериментов по дифракции электронов и электронной микроскопии высокого разрешения [9]. Возникновение упорядочения катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} приводит к уменьшению сопоставимого (на одну формульную единицу) объема элементарной ячейки. Катион-упорядоченные образцы $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ обладают меньшим сопоставимым объемом элементарной ячейки, чем катион-разупорядоченный $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$, при чем его объем зависит от степени упорядочения катионов в А-подрешетке. Степень упорядочения катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} была определена по интенсивности сверхструктурного рефлекса $(0\ 0\ \frac{1}{2})$ относительно исходной кубической ячейки. Интенсивность этого рефлекса для исходного $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$, полученного по обычной керамической технологии, и катион-упорядоченного $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$, отожженного на воздухе при $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 часов, образцов была равна нулю. Степень упорядочения для этих образцов была $A = 0\%$. Катион-упорядоченный образец $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$, отожженный на воздухе при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 часов, обладал максимальной степенью упорядочения $A = 100\%$. Для катион-упорядоченных образцов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$, отожженных на воздухе при 1100 и $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 часов степень упорядочения составляла $A = 70$ и 50% , соответственно. Таким образом, по мере роста температуры отжига упорядоченное состояние разрушалось, переходя в пределе, при $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, в разупорядоченное. Катионные состояния в рассматриваемой системе являются обратимыми.

Исходный катион-разупорядоченный образец $\text{Pr}_{0.50}\text{Ba}_{0.50}\text{MnO}_3$ является ферромагнетиком с температурой Кюри $\sim 140 \text{ K}$ (рис. 3). Упорядочение катионов ведет к резкому увеличению T_C , которое для катион-упорядоченного образца $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ с $A = 100\%$ достигает $\sim 320 \text{ K}$. Образцы с $A = 50$ и 70% обладают

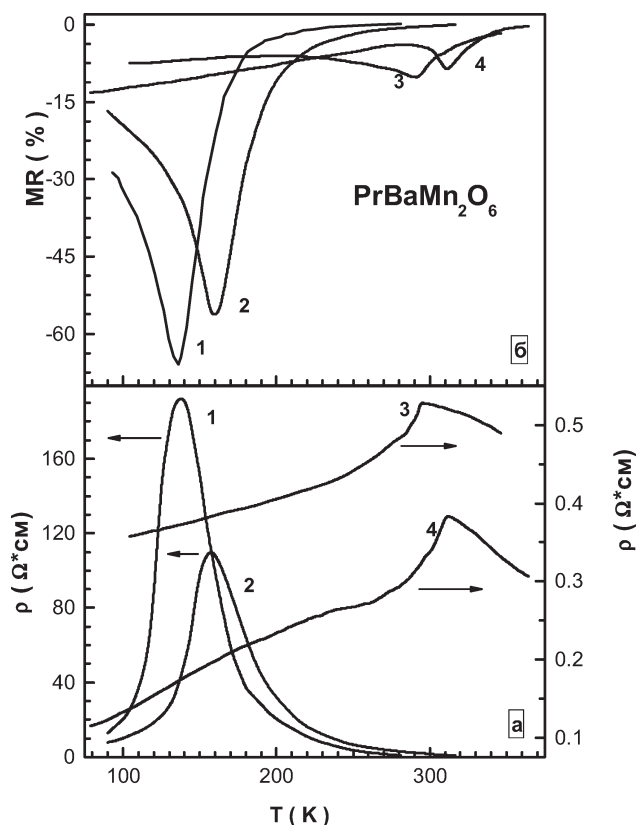


Рис. 4. Температурная зависимость удельного электросопротивления (а) и магнитосопротивления (б) в поле 9 кЭ для катион-упорядоченных образцов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ с различной степенью упорядочения : 1 — $A = 0\%$, 2 — $A = 50\%$, 3 — $A = 70\%$, 4 — $A = 100\%$.

T_C равной ~ 166 и ~ 306 К, соответственно. Кроме этого два последних образца демонстрируют аномалии в районе ~ 180 К, связанные с низкотемпературной ферромагнитной фазой. Таким образом, пошаговый отжиг катион-упорядоченных образцов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ ведет к разрушению высокотемпературной ферромагнитной фазы одновременно со степенью упорядочения катионов и возвращает магнитные свойства в исходное состояние. Все образцы демонстрируют переход метал-диэлектрик чуть ниже T_C и пик магнитосопротивления (рис. 4). С уменьшением степени упорядочения катионов температура переходов уменьшается, а величина удельного электросопротивления, также как и магнитосопротивления возрастает. Для полностью катион-упорядоченного образца $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ ($A = 100\%$) пик магнитосопротивления при ~ 311 К достигает $\sim 10\%$, а для полностью катион-разупорядоченного $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ ($A = 0\%$) — $\sim 66\%$ при

~ 137 К. Это очень важное качество, пик магнитосопротивления выше комнатной температуры, обуславливает потенциальную практическую значимость катион-упорядоченных манганитов $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$. Согласно эмпирическим правилам Гуденафа-Канамори [15, 16], чем ближе средний угол связи $\langle \text{Mn}-\text{O}-\text{Mn} \rangle$ к 180° , тем выше интенсивность обменных взаимодействий. Локальное распределение углов связи $\text{Mn}-\text{O}-\text{Mn}$ в значительной степени определяется характером размещения катионов в А-подрешетке. Статистическое распределение катионов приводит к сильным локальным искажениям в распределении углов связи $\text{Mn}-\text{O}-\text{Mn}$ и, как следствие, к ослаблению обменных взаимодействий. Поэтому для катион-разупорядоченного образца наблюдается низкая $T_C \approx 140$ К. Упорядочение катионов Pr^{3+} и Ba^{2+} в А-подрешетке приводит к двум следствиям : 1) возрастает периодичность в распределении углов связи $\text{Mn}-\text{O}-\text{Mn}$ и 2) уменьшается средняя длина связи $\langle \text{Mn}-\text{O} \rangle$, как результат уменьшения объема элементарной ячейки. Эти следствия значительно увеличивают температуру Кюри, как видно из эксперимента, до ~ 320 К. Промежуточные упорядоченные состояния дают промежуточные значения T_C , при чем с уменьшением степени упорядочения температура Кюри уменьшается. С увеличением степени упорядочения критическая температура перехода метал-диэлектрик также возрастает. Смещается и пик магнитосопротивления. Наблюдается определенная корреляция между спиновыми и зарядовыми состояниями [17]. Причина возникновения катион-упорядоченного состояния в Ва-замещенных манганитах понятна далеко не полностью. Выполненная работа была частично профинансирована Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (Проект № Ф06Р-078) и стипендией Президента Республики Беларусь.

Литература

1. Dörr K. Ferromagnetic manganites: spin-polarized conduction versus competing interactions. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2006. — V. 39. — R125-R150.
2. Tokura Y., Tomioka Y. Colossal magnetoresistive manganites. // J. Magn. Magn. Mater. — 1999. — V. 200. — P. 1-23.

3. Локтев В.М., Погорелов Ю.Г. Особенности физических свойств и колоссальное магнитосопротивление манганитов. // ФНТ. — 2000. — Т. 26, № 3. — С. 231-261.
4. Synthesis and properties of $\text{YBaMn}_2\text{O}_{5+\delta}$. / T.P. Beales, M. Molgg, J. Jutson, C.M. Friend. // Phys. Stat. Sol. (a). — 1997. — V. 161. — P. 271-282.
5. Order-disorder phenomena in new $\text{LaBaMn}_2\text{O}_{6-x}$ CMR perovskites. Crystal and magnetic structure. / F. Millange, V. Caignaert, B. Domenges et al. // Chem. Mater. — 1998. — V. 10. — P. 1974-1983.
6. Effect of oxygen content on the magnetic and transport properties of $\text{Pr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{MnO}_{3-\gamma}$. / I.O. Troyanchuk, S.V. Trukhanov, H. Szymczak, K. Bärner. // J. Phys.: Condens. Matter. — 2000. — V. 12. — L155-L158.
7. Comparative study of the magnetic and electrical properties of $\text{Pr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_{3-\delta}$ manganites depending on the preparation conditions. / S.V. Trukhanov, I.O. Troyanchuk, I.M. Fita et al. // J. Magn. Magn. Mater. — 2001. — V. 237. — P. 276-282.
8. Successive phase transitions in a metal-ordered manganite perovskite YBaMn_2O_6 . / T. Nakajima, H. Kageyama, Y. Ueda. // J. Phys. Chem. Solids. — 2002. — V. 63. — P. 913-916.
9. Magnetic and electrical properties of $\text{LBaMn}_2\text{O}_{6-\gamma}$ (L = Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb) manganites / S.V. Trukhanov, I.O. Troyanchuk, M. Hervieu et al. // Phys. Rev. B. -2002. — V. 66. — P. 184424-10.
10. Труханов С.В. Исследование стабильности упорядоченных манганитов. // ЖЭТФ. — 2005. — Т. 128, № 3. — С. 597-606.
11. Study of A-site ordered $\text{PrBaMn}_2\text{O}_{6-\delta}$ manganites depending on the treatment conditions. / S.V. Trukhanov, L.S. Lobanovski, M.V. Bushinsky et al. // J. Phys.: Condens. Matter. — 2005. — V. 17. — P. 6495-6506.
12. Thermal stability of A-site ordered $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ manganites. / S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, H. Szymczak et al. J. Phys. Chem. Solids. — 2006. — V. 67. — P. 675-681.
13. $\text{YBaCuFeO}_{5+\delta}$: A novel oxygen-deficient perovskite with a layer structure. / L. Er-Rakho, C. Michel, Ph. Lacorre, B. Raveau. // J. Solid State Chem. — 1988. — V. 73. — P. 531-535.
14. A-site randomness effect on structural and physical properties of Ba-based perovskite manganites. / T. Nakajima, H. Yoshizawa, Y. Ueda. // J. Phys. Soc. Jpn. -2004. — V. 73. — P. 2283-2291.
15. Goodenough J.B. Theory of the role of covalence in the perovskite-type manganites $[\text{LaM(II)}]\text{MnO}_3$. // Phys. Rev. — 1955. — V. 100, № 2. — P. 564-573.
16. Relationship between crystal symmetry and magnetic properties of ionic compounds containing Mn^{3+} . / J.B. Goodenough, A. Wold, R.J. Arnett, N. Menyuk. // Phys. Rev. — 1961. — V. 124, № 2. — P. 373-384.
17. Influence of oxygen vacancies on the magnetic and electrical properties of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-x/2}$ manganites. / S.V. Trukhanov, L.S. Lobanovski, M.V. Bushinsky et al. // Eur. Phys. J. B. — 2004. — V. 42. — P. 51-61.