

05

## Аномалия магнитной восприимчивости монокристалла манганита $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$

© В.Т. Довгий, А.И. Линник, В.И. Каменев, В.К. Прокопенко,  
В.И. Михайлов, В.А. Хохлов, А.М. Кадомцева,  
Т.А. Линник, Н.В. Давыдейко, Г.Г. Левченко

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАНУ,  
Украина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия

E-mail: panch@mail.fti.ac.donetsk.ua

Поступило в Редакцию 19 мая 2008 г.

Обнаружены хаотические осцилляции магнитной восприимчивости в монокристалле манганита  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ . Осцилляции наблюдаются в температурном диапазоне сосуществования ферромагнитной и антиферромагнитной фаз манганита данного состава. Установлена зависимость амплитуды осцилляций от напряженности подмагничивающего поля. Появление осцилляций восприимчивости связывается с магнитными образованиями (переходными областями), которые могут существовать на границе раздела ферро-антиферромагнитной фаз.

Развитие нового направления микроэлектроники — спинтроники требует разработки и использования новых материалов, в которых процессы переноса заряда определяются их магнитным состоянием. В этом отношении редкоземельные манганиты со структурой перовскита типа  $\text{R}_{1-x}\text{M}_x\text{MnO}_3$  (где R — трехвалентные ионы La, Pr, Nd и других редкоземельных элементов, M — двухвалентные ионы Sr, Ca, Ba) являются перспективными материалами. Природа наблюдаемого в них колоссального магнитосопротивления (КМС) до конца не установлена. Эти системы демонстрируют богатые фазовые диаграммы с разнообразными типами структурного, магнитного, зарядового и орбитального упорядочения [1], в которых наблюдается уникальная взаимосвязь электронных, магнитных и структурных свойств.

В связи с этим целью данной работы являлось исследование поведения магнитно-неоднородного состояния, с которым связывают явление КМС, при воздействии переменного и постоянного магнитного поля.

PACS: 75.30.Cr, 71.30.+h, 75.30.Gw

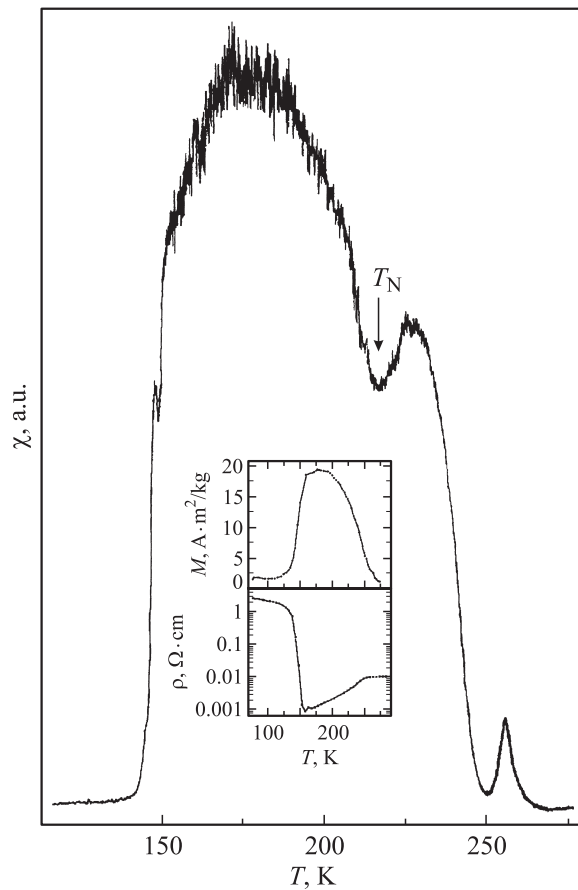
В настоящей работе проведены исследования кристаллической структуры, магнитных и транспортных свойств кристаллов состава  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ . Особое внимание было уделено исследованию низкочастотной магнитной восприимчивости  $\chi$  в температурном диапазоне 77–300 К с использованием оригинальной индуктивно-частотной установки (изучены ориентационные и полевые зависимости  $\chi(T)$ ), что позволило получить дополнительные сведения об их магнитно-неоднородном состоянии.

Монокристаллические образцы состава  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  выращены методом плавающей зоны с радиационным нагревом. Рентгенографические исследования показали, что исследуемый образец обладает орторомбической кристаллической структурой  $P_{nma}$  с параметрами  $a = 0.54780$  nm;  $b = 0.54308$  nm;  $c = 0.76116$  nm.

Измерение намагниченности проводили на вибрационном магнитометре; электропроводность определяли четырехзондовым методом. Магнитную восприимчивость измеряли модуляционным методом на индуктивно-частотной установке (рабочая частота автодина  $\sim 5$  MHz) при основной частоте модуляции 330 Hz, амплитуду модулирующего поля  $H_{mod}$  изменяли в пределах  $80 \div 800$  A/m. Образцы помещались в выносную индуктивность автодина, которая находилась в температурной ячейке. Воздействие внешнего переменного магнитного поля (с частотой 330 Hz) приводит к изменению магнитного состояния образца, что является модулирующим сигналом для высокочастотной несущей автодина. Амплитуда этой модуляции пропорциональна магнитной восприимчивости исследуемого вещества ( $A \propto \chi$ ), поэтому ход кривой  $A = f(T)$  эквивалентен ходу температурной зависимости восприимчивости ( $\chi = f(T)$ ). В данной работе исследованы восприимчивость  $\chi$ , удельная намагниченность  $M$  и удельное сопротивление  $\rho$  монокристалла состава  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ .

Магниторезистивный эффект  $\Delta\rho/\rho_0$  в данном образце носил обычный характер и составил для магнитного поля 400 kA/m 13.5% (магнитное поле параллельно измерительному току). Соответствующая этому значению  $\Delta\rho/\rho_0$  температура магниторезистивного пика  $T_p$  составила 248 К.

На рис. 1 приведены температурные зависимости восприимчивости  $\chi$  (модулирующее поле  $H_{mod}$  амплитудой 800 A/m направлено примерно перпендикулярно оси  $c$  кристалла), а также (на вставке) удельной намагниченности  $M$  (измерена в магнитном поле 80 kA/m) и удельного



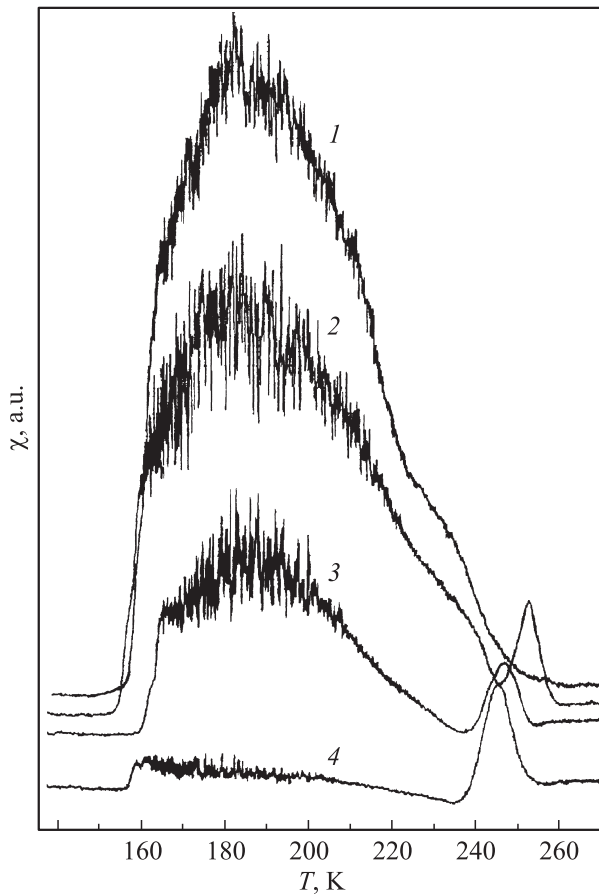
**Рис. 1.** Температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\chi$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ . На вставке — температурная зависимость удельной намагниченности  $M$  и удельного сопротивления  $\rho$ .

сопротивления  $\rho$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ . Видно, что большие значения  $\chi$  имеют место в области температур  $150 \text{ K} \leq T \leq 260 \text{ K}$ , что, согласно фазовой диаграмме [1], соответствует области ферромагнитного металла FM/M. При  $T < 150 \text{ K}$  образец находится в состоянии антиферромагнитного изолятора AFM/ICE типа, где наблюдается зарядовое и орбитальное упорядочение ионов  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  [1,2]. На

вставке рис. 1 показано, что в этой области температур удельное сопротивление  $\rho$  образца велико, а намагниченность  $M$  минимальна, что хорошо коррелирует с фазовой диаграммой и температурной зависимостью  $\chi$ . В области ферромагнитного упорядочения с металлическим типом проводимости наблюдаются максимальные значения  $M$  и  $\chi$  и минимальные величины  $\rho$ , что соответствует исчезновению зарядового и орбитального упорядочения и появлению большого числа свободных носителей тока. Температурные зависимости намагниченности, электросопротивления, восприимчивости демонстрируют фазовый переход первого рода ( $T \approx 150$  К) из антиферромагнитного изолирующего AFM/I в ферромагнитное металлическое FM/M состояние. Поскольку примененная нами методика фактически фиксирует колебания ферромагнитного момента под воздействием переменного магнитного поля, то для наблюдения максимальных значений  $\chi$  необходимы два условия: достаточная величина магнитного момента и малое значение поля магнитной анизотропии. Именно это и наблюдается в области  $150 \text{ К} \leq T \leq 260 \text{ К}$ . При  $T > 260 \text{ К}$  имеет место область парамагнитного изолятора и магнитная восприимчивость снова минимальна.

В температурном диапазоне 150–220 К обнаружены осцилляции магнитной восприимчивости. Из данных нейтронографических исследований [3] известно, что в этом температурном диапазоне сосуществуют две фазы: ферромагнитная и антиферромагнитная A-типа (примерно 20%), для которой точка Нееля ( $T_N$ ) составляет  $\sim 220$  К. Из рис. 1 видно, что при этой температуре наблюдается аномалия на кривой  $\chi(T)$ . Выше данной температуры до точки Кюри ( $T_C \approx 260$  К) существует только ферромагнитная фаза, и  $\chi$  постепенно падает до 0. Но главным обстоятельством является то, что выше  $T_N$  осцилляции восприимчивости не наблюдаются.

Изменение направления модулирующего поля на перпендикулярное (т.е. параллельно оси  $c$  кристалла) практически не изменило характера зависимости  $\chi(T)$  исследуемого монокристалла, хотя можно отметить, что амплитуда огибающей  $\chi(T)$  уменьшилась примерно вдвое (на графиках максимальные величины  $\chi$  приведены к одинаковым значениям). На рис. 2 для нового направления модулирующего поля представлена зависимость  $\chi(T)$ , полученная при той же амплитуде модулирующего поля, что и на рис. 1 ( $H_{mod} = 800$  А/м), для различных значений постоянного подмагничивающего поля. Направление поля примерно параллельно оси  $c$  кристалла. Так же как и на рис. 1, в области ферромагнитного упорядочения  $150 \leq T \leq 260$  К наблюдаются



**Рис. 2.** Температурные зависимости восприимчивости  $\chi$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  при постоянном подмагничивающем поле, Oe: 1 — 0; 2 — 100; 3 — 300; 4 — 1000.

максимальные значения восприимчивости, а в температурном диапазоне 150–220 К также наблюдаются осцилляции восприимчивости.

Обратим внимание на два обстоятельства.

1. Осцилляции восприимчивости наблюдаются только в температурном диапазоне 150–220 К для различных ориентаций магнитного поля (постоянного и переменного), где сосуществуют фазы FM/M и AFM/I

А-типа. В области существования только FM-фазы  $220 \leq T \leq 260$  К осцилляции  $\chi$  не наблюдаются.

2. С увеличением постоянного поля величина пика  $\chi(T)$  уменьшается, но амплитуда осцилляций увеличивается (см. кривые 1, 2, 3) и только в поле  $\approx 1000$  Ое уменьшается и амплитуда осцилляций (кривая 4).

Что касается влияния напряженности постоянного подмагничивающего поля, то уменьшение амплитуды огибающей  $\chi(T)$  с его увеличением неудивительно, так как это поле играет роль поля анизотропии, от величины которого зависит величина  $\chi$ . В то же время увеличение амплитуды осцилляций с увеличением поля подмагничивания является необычным.

Как уже отмечалось, главным фактором, определяющим появление хаотических осцилляций  $\chi$ , является сильная магнитная неоднородность образца: одновременное сосуществование ферромагнитной и антиферромагнитной фаз в температурном диапазоне 150–220 К. Если предположить, что между этими фазами есть переходные области (подобные доменным границам между доменами в ферромагнетике), то именно эти области будут наиболее чувствительными к воздействию магнитных полей. С другой стороны, эти области испытывают сильное влияние близлежащих антиферромагнитных участков, которые индуцируют локальные поля анизотропии, случайно ориентированные в пространстве. Под воздействием  $H_{mod}$  эти участки выходят из равновесия, а релаксация идет случайным образом, что и вызывает хаотические осцилляции  $\chi$ . При увеличении внешнего подмагничивания легко намагничивающаяся ферромагнитная фаза способствует увеличению объема переходных областей и соответственно — увеличению амплитуды осцилляций. Однако когда внешнее поле превышает 1000 Ое, происходит „замораживание“ как собственно ферромагнитной фазы, так и переходных участков, что и приводит к уменьшению как амплитуды огибающей  $\chi$ , так и амплитуды осцилляций.

Обращает на себя внимание также наличие пика восприимчивости в районе точки Кюри, который имеет как ориентационную (наблюдается без поля смещения при ориентации  $H_{mod}$  перпендикулярно оси  $c$ ), так и полевую зависимость. Как видно из рис. 2, при  $H = 0$  (кривая 1) пика восприимчивости в области  $T_C$  нет. При  $H \neq 0$  в районе  $T_C$  появляется пик, который по мере увеличения подмагничивания смещается в область низких температур.

Появление пика восприимчивости в районе точки Кюри является характерным для примененной нами методики записи  $\chi(T)$ , особенно

когда речь идет о начальной восприимчивости (т.е. в отсутствие постоянного магнитного поля). Следует только найти правильную ориентацию модулирующего поля, чтобы минимизировать влияние поля анизотропии на возбуждение магнитных моментов, и в нашем случае это происходит при ориентации  $H_{mod} \perp c$ -оси. Однако наложение постоянного магнитного поля должно гасить этот пик, поскольку это поле начинает играть роль поля анизотропии. Тот факт, что для изучаемого образца наложение постоянного поля не только не гасит упомянутый пик, но, напротив, усиливает его и сдвигает в область низких температур, свидетельствует о том, что FM-фаза, которая существует в диапазоне  $220 \leq T \leq 260$  К, является сильно неоднородной и чувствительной к магнитному полю в области фазового перехода „ферромагнитное состояние  $\leftrightarrow$  парамагнитное состояние“. Как уже упоминалось, при температуре  $T_N = 220$  К происходит разрушение антиферромагнитной фазы А-типа, однако элементы этой фазы (кластеры), имеющие ближний ферромагнитный порядок (в плоскости  $a-b$ ), продолжая существовать выше  $T_N$ , могут испытывать некоторое упорядочение под влиянием намагниченной внешним полем ферромагнитной фазы. Это упорядочение усиливает синхронный отклик системы на модулирующее поле, вызывая появление пика  $\chi$  вблизи  $T_C$ . С увеличением внешнего подмагничивания увеличивается коллинеарность ферромагнитного упорядочения, а само упорядочение начинается с более низких температур.

Совокупность экспериментов позволяет сделать предположение, что осцилляции магнитной восприимчивости могут быть связаны с переходными областями между ферромагнитной и антиферромагнитной фазами и/или с нарушением магнитного порядка в антиферромагнитных „кластерах“ при изменении температуры.

## Список литературы

- [1] *Kajimoto R., Yoshizawa H., Kawano H., Kuwahara H., Tokura Y., Ohoyama K., Ohashi M.* // Phys. Rev. B. 1999-I. V. 60. N 13. P. 9506.
- [2] *Mahendiran R., Ibarra M.R., Maignan A., Millang F., Luraj A.A., Mahesh R., Raveau B., Rao C.N.R.* // Phys. Rev. Let. 1999. V. 82. N 10. P. 2191.
- [3] *Ritter C., Mahendiran R., Ibarra M.R., Morellon L., Maignan A., Raveau B., Rao C.N.R.* // Phys. Rev. B. 2000-II. V. 61. N 14. P. R9229.