

# Индукцированные сильным магнитным полем фазовые переходы в электронно-легированных манганитах

© А.М. Кадомцева, Ю.Ф. Попов, Г.П. Воробьев, К.И. Камиллов, А.А. Мухин\*, В.Ю. Иванов\*, А.М. Балбашов\*\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия

\* Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
119991 Москва, Россия

\*\* Московский энергетический институт,  
111250 Москва, Россия

E-mail: popov@plms.phys.msu.ru

(Поступила в Редакцию 25 октября 2005 г.)

В окончательной редакции 27 февраля 2006 г.)

Проведено исследование магнитных и магнитоупругих свойств в сильных магнитных полях монокристаллов электронно-легированных редкоземельных манганитов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . Обнаружены индуцированные сильным магнитным полем фазовые переходы из антиферромагнитной фазы *A*-типа в антиферромагнитную фазу *C*-типа для состава  $x = 0.65$ . Аналогичный фазовый переход наблюдался и для состава  $x = 0.8$ , где предположительно происходит переход из антиферромагнитной фазы *C*-типа в антиферромагнитную фазу *G*-типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 03-02-16445-а).

PACS: 71.27.+a, 71.30.+h

Огромный интерес, проявляемый в последнее время к исследованию манганитов системы  $R_{1-x}A_x\text{MnO}_3$ , ( $R$  — редкоземельные ионы, а  $A$ -ионы —  $\text{Ca}^{2+}$  или  $\text{Sr}^{2+}$ ), обусловлен необычной взаимосвязью их магнитных, кинетических и структурных свойств, проявляющихся в существовании эффекта колоссального магнитосопротивления, а также разнообразных магнитных и структурных фазовых превращений, связанных с зарядовым и орбитальным упорядочением [1]. Разнообразие свойств замещенных манганитов в значительной степени определяется конкуренцией сверхобмена и двойного обмена, а также эффектом Яна–Теллера.

Наиболее изученной для манганитов является область дырочного легирования  $x < 0.5$ , где наблюдался эффект колоссального магнитосопротивления. При этом следует отметить, что область электронного легирования  $0.5 < x < 1$  все еще исследована недостаточно. Уточненная фазовая  $T$ - $x$ -диаграмма для области электронного легирования монокристаллов системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  получена сравнительно недавно [2] (рис. 1). Согласно фазовой диаграмме, наблюдаются различные типы антиферромагнитного упорядочения: *A* (ферромагнитно-упорядоченные спины в  $ab$ -плоскости с антиферромагнитным обменом вдоль оси  $c$ ), *C* (ферромагнитные цепочки вдоль оси  $c$ , взаимодействие между которыми антиферромагнитное) и *G* (упорядочение спинов типа „шахматный“ порядок).

Стоит отметить, что полученные ранее в [3–5] подробные теоретические выкладки для обменных взаимодействий в различных магнитных фазах в случае электронного легирования указывают на то, что магнитное поле должно влиять на орбитальное упорядочение и приводить к существенным изменениям в магнитной

структуре. Однако ранее таких переходов в экспериментальных работах обнаружено не было. Исходя из результатов работ [3–5], нами было сделано предположение в том, что влияние магнитного поля будет наиболее заметным при концентрациях, находящихся вблизи границ магнитных фаз.

Для возможного обнаружения новых индуцированных полем фазовых переходов были проведены комплексные исследования магнитных и магнитоупругих свойств монокристаллов электронно-легированных манганитов си-

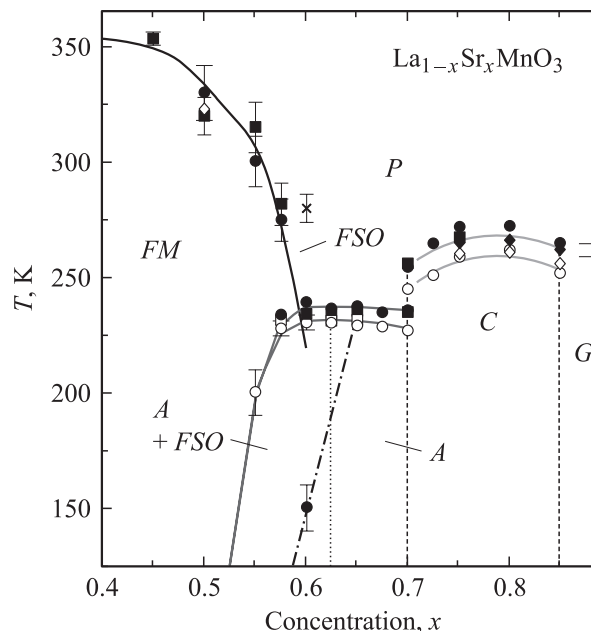
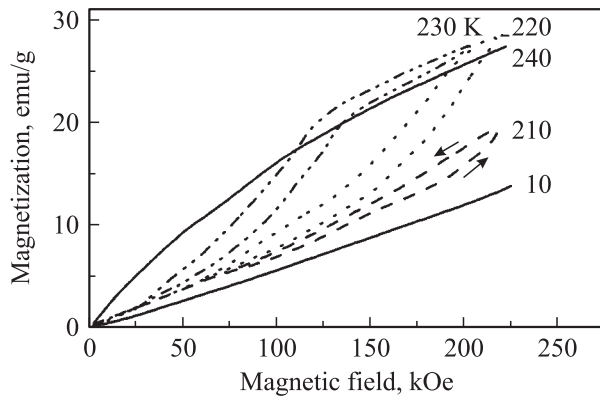
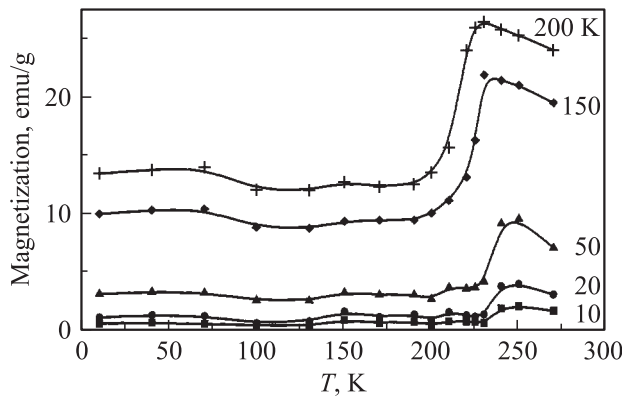


Рис. 1. Фазовая  $T$ - $x$ -диаграмма системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ .



**Рис. 2.** Кривые намагничивания, полученные в сильных магнитных полях для монокристалла  $\text{La}_{0.35}\text{Sr}_{0.65}\text{MnO}_3$ .



**Рис. 3.** Температурная зависимость намагниченности монокристалла  $\text{La}_{0.35}\text{Sr}_{0.65}\text{MnO}_3$  при фиксированных магнитных полях.

системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  в сильных импульсных магнитных полях до 250 кОе в температурном интервале 10–300 К. Монокристаллы системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  для наших измерений были получены методом зонной плавки с радиационным нагревом. Для измерений намагниченности применялся индукционный метод с использованием дифференциальных катушек, а для измерений магнитострикции — метод контактного пьезоэлектрического датчика.

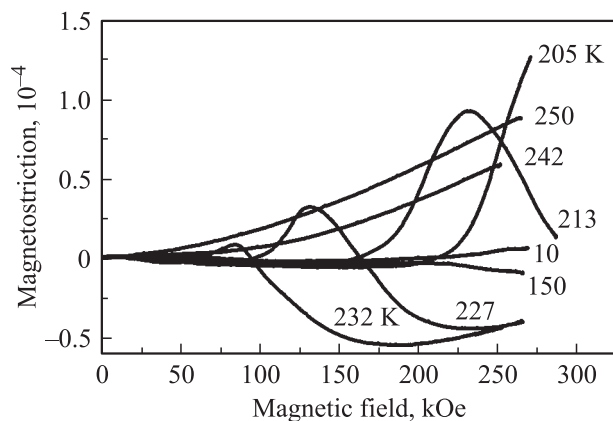
Исследованы монокристаллы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.6, 0.65, 0.75, 0.8$ ), которые находятся вблизи границ различных магнитных фаз. Измерения кривых намагничивания и продольной магнитострикции проводились вдоль оси  $c$  монокристаллов.

На рис. 2 представлены кривые намагничивания, полученные для состава  $x = 0.65$ , который в отсутствие внешнего магнитного поля ниже  $T_N = 230$  К находится, согласно [2], в фазе А-типа — вблизи границы перехода от антиферромагнитной фазы А-типа в антиферромагнитную фазу С-типа. Как видно, при температурах 210–240 К наблюдаются аномалии намагниченности, связанные, по-видимому, с подавлением антиферромагнитного упорядочения. Из кривых видно, что при

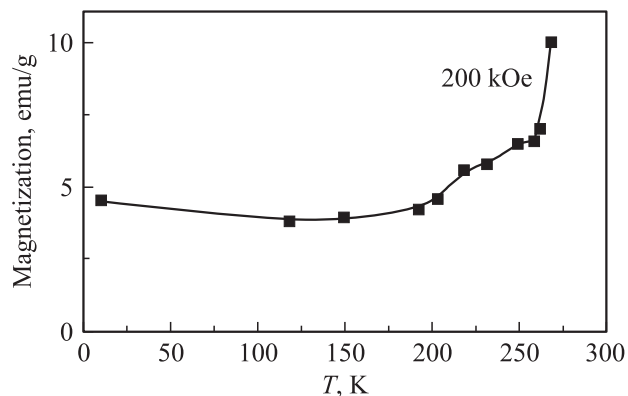
уменьшении температуры ниже 210 К магнитного поля 200 кОе недостаточно для подавления антиферромагнитного упорядочения. Наблюдаемый гистерезис указывает на фазовый переход первого рода, что согласуется с данными работы [2]. Из измерений в сильных магнитных полях построена температурная зависимость магнитного момента для состава  $x = 0.65$  в фиксированных магнитных полях (рис. 3), полученная в ходе нагрева образца, из которой была определена температура магнитного упорядочения, которая оказалась в согласии с фазовой диаграммой, равной 230 К в отсутствие магнитного поля, и смещается в сильном поле в сторону меньших температур.

Для установления корреляций между магнитными и магнитоупругими свойствами манганитов была измерена магнитострикция монокристалла  $\text{La}_{0.35}\text{Sr}_{0.65}\text{MnO}_3$ . Из графиков (рис. 4) видно, что магнитострикция практически монотонно зависит от поля и мало меняется в полях до 200 кОе в интервале температур от 10 К до 200 К. Далее с повышением температуры наблюдается сложный характер зависимости магнитострикции. В интервале температур 213–240 К наблюдаются максимумы на кривых магнитострикции, которые сменяются спадом при высоких полях. Смена знака магнитострикции, по-видимому, связана с двумя процессами. Положительные скачки магнитострикции мы ассоциируем с новым фазовым переходом, при котором происходит переход из антиферромагнитной фазы А-типа в антиферромагнитную фазу С-типа, как это было предсказано теоретически в работе [4]. Отрицательные аномалии магнитострикции в согласии с магнитными измерениями связаны с подавлением антиферромагнитного упорядочения и переходом в ферромагнитное состояние.

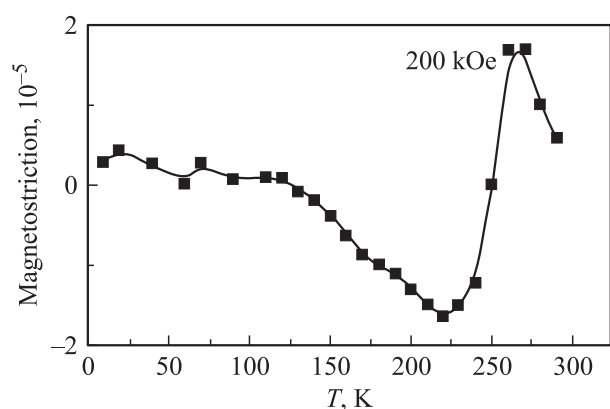
Согласно нашим предположениям, следующим составом, для которого могли наблюдаться переходы из С-фазы в G-фазу, являлся монокристалл с концентрацией  $\text{Sr}^{2+}$ , равной 0.8, который в отсутствие магнитного поля остается в С-фазе. Для монокристалла состава  $\text{La}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{MnO}_3$  были проведены подобные измерения кривых намагничивания и магнитострикции.



**Рис. 4.** Зависимость магнитострикции при различных температурах для монокристалла  $\text{La}_{0.35}\text{Sr}_{0.65}\text{MnO}_3$ .



**Рис. 5.** Температурная зависимость намагниченности монокристалла  $\text{La}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{MnO}_3$  в фиксированном магнитном поле 200 kOe.



**Рис. 6.** Температурная зависимость магнитострикции монокристалла  $\text{La}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{MnO}_3$  в фиксированном магнитном поле 200 kOe.

При построении зависимости магнитного момента в фиксированном поле (рис. 5) наблюдается заметный рост и последующий резкий скачок при дальнейшем повышении температуры, который, по-видимому, связан с подавлением антиферромагнитного упорядочения. Наличие двухступенчатого перехода говорит о том, что помимо подавления антиферромагнитного упорядочения наблюдается еще один фазовый переход. При измерениях магнитострикции в фиксированных полях (рис. 6)  $\text{La}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{MnO}_3$  наблюдалось уменьшение магнитострикции с последующим возрастанием отрицательной величины магнитострикции. При дальнейшем росте температур магнитострикция начинает уменьшаться и меняет знак вблизи 240 K, достигая затем положительной величины  $1.7 \times 10^{-5}$  при 260 K. Отрицательную магнитостриксию мы связываем с возможным индуцированным переходом из антиферромагнитной фазы *C*-типа в антиферромагнитную фазу *G*-типа, которая обладает скошенной структурой и большим магнитным моментом, чем фаза *C*-типа [5], тогда как последующий высокотемпературный переход, сопровождающий-

ся возрастанием положительной магнитострикции, по-видимому, связан с подавлением антиферромагнитного упорядочения *C*-типа.

Отметим, что для составов с концентрацией  $x = 0.75$  и 0.85 таких аномалий уже не наблюдалось, что подтверждает наше предположение о влиянии магнитного поля на смещение границ магнитных фаз описанных нами переходов только для концентраций вблизи границ антиферромагнитных фаз. Отметим, что исследования вдоль различных кристаллографических осей не являлись необходимыми в связи с обменной природой наблюдаемого эффекта — смещением магнитным полем границы между антиферромагнитными фазами.

Таким образом, при исследовании электронно-легированных манганитов системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  нами впервые наблюдались аномалии магнитных и магнитоупругих свойств при новых уникальных фазовых переходах, связанных со смещением магнитным полем границы между различными антиферромагнитными фазами.

## Список литературы

- [1] Y. Tokura, Y. Tomioka. *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 1 (1999).
- [2] J. Hemberger, A. Krimmel, T. Kurz, H. Krug von Nidda, V. Ivanov, A. Mukhin, A. Balbashov, A. Loidl. *Phys. Rev. B* **66**, 094410 (2002).
- [3] G. Venkateswara Pai. *Phys. Rev. B* **63**, 064431 (2001).
- [4] С.М. Дунаевский. *ФТТ* **46**, 193 (2004).
- [5] С.М. Дунаевский, В.В. Дериглазов. *ФТТ* **46**, 2184 (2004).