

Аномалии магнитных и магнитоупругих свойств монокристаллов $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ в сильных магнитных полях

© Ю.Ф. Попов, А.М. Кадомцева, 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 Российской академии наук,
117942 Москва, Россия

** Московский энергетический институт,
111250 Москва, Россия

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

(Поступила в Редакцию 9 марта 2004 г.)

Впервые на основе измерений магнитных и магнитоупругих свойств монокристаллов $\text{Nd}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$, $\text{Nd}_{0.55}\text{Ca}_{0.45}\text{MnO}_3$, $\text{Nd}_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{MnO}_3$ установлены корреляции наблюдаемых аномалий намагниченности и магнитоупругости, связанных с подавлением сильным магнитным полем антиферромагнитной фазы и зарядового упорядочения и переходом в ферромагнитное состояние. Построены фазовые H – T -диаграммы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-02-16445).

Неослабевающий интерес к исследованию свойств редкоземельных манганитов связан не только с обнаружением в них эффекта колоссального магнито-сопротивления [1], но и с тем, что эти соединения обладают рядом уникальных свойств (в том числе зарядовое, орбитальное и спиновое упорядочение) и богатыми T – x -фазовыми диаграммами из-за различия толеранс-фактора и магнитного состояния редкоземельного иона.

В отличие от системы $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, в которой составы находились в ферромагнитном металлическом состоянии до $x = 0.47$, в $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ферромагнитное состояние сохраняется до $x = 0.35$ [2], а при $0.4 \leq x \leq 0.5$ наблюдается антиферромагнитное (температура Нееля $T_N = 160$ К) зарядово-упорядоченное состояние (температура зарядового упорядочения $T_{CO} = 160$ К) [3]. Приложение сильного магнитного поля может подавить зарядовое и антиферромагнитное состояние и вызвать фазовый переход в ферромагнитное состояние.

В [3–5] для поликристаллических образцов $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.4, 0.45, 0.5$) на кривых намагничивания наблюдались аномалии в сильных магнитных полях ≈ 100 кОе, индуцирующих фазовый переход в ферромагнитное состояние, и были построены фазовые T – H -диаграммы. Представляло интерес проверить результаты этих измерений на монокристаллах $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, а также изучить их магнитоупругие свойства в сильных магнитных полях, так как эти сведения в литературе отсутствуют. Предполагается, что между аномалиями магнитных и магнитоупругих свойств должна существовать четкая корреляция, однако измерения магнитоупругости для монокристаллов системы $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ до сих пор не проводились.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерения магнитных и магнитоупругих свойств монокристаллов $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.3, 0.4, 0.45, 0.5$) проводились в интервале температур 10–280 К в импульсных магнитных полях до 250 кОе, тепловое расширение измерялось в интервале температур 78–300 К. Монокристаллы были выращены методом бестигельной зонной плавки с оптическим нагревом.

Как указывалось в работе [2], $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ является ферромагнетиком при $T \leq T_C = 120$ К (T_C — температура Кюри) и зарядово-упорядоченным парамагнетиком при $T_C \leq T \leq T_{CO} = 240$ К. При проведении исследований магнитных свойств монокристаллов нами не наблюдалось проявлений зарядового упорядочения.

На рис. 1 приведены кривые намагничивания для монокристалла $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$. Видно, что этот состав при температурах ниже T_C является ферромагнетиком и величина его намагниченности растет с понижением температуры из-за подмагничивания ионов Nd-подсистемы обменным полем Mn-подсистемы, что особенно сильно проявляется ниже 50 К [2]. Как указывалось в работах [2–4,6], для монокристаллов $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.4, 0.45, 0.5$) при температуре $T_{CO} = 250$ К имеет место зарядовое упорядочение, а при понижении температуры до $T_N = 160$ К — антиферромагнитное упорядочение. При измерении теплового расширения для всех трех составов наблюдалась аномалия при температуре зарядового упорядочения $T_{CO} = 235$ К (рис. 2). Различие величин и знаков этой аномалии для разных составов (отрицательная 10^{-4} для $x = 0.45$ и положительная 10^{-3} для $x = 0.4$ и 0.5) связано с тем, что измерения

проводились вдоль различных кристаллографических направлений: вдоль c -оси для $x = 0.4, 0.5$ и вдоль b -оси для $x = 0.45$. Для монокристаллов $Nd_{1-x}Ca_xMnO_3$ ($x = 0.4, 0.45, 0.5$) с целью изучения индуцированных магнитным полем фазовых переходов исследовались магнитные и магнитоупругие свойства в сильных импульсных магнитных полях до 250 кОе.

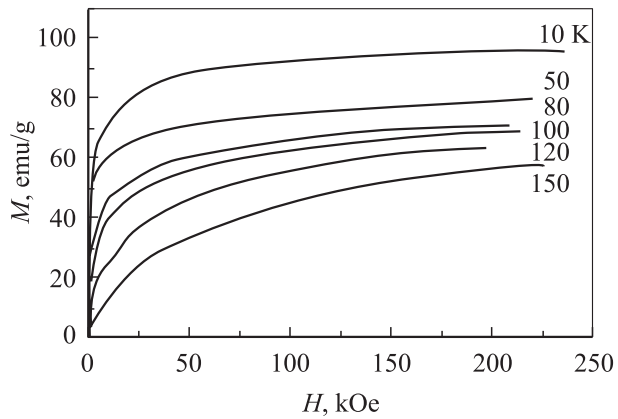


Рис. 1. Кривые намагничивания для монокристалла $Nd_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$.

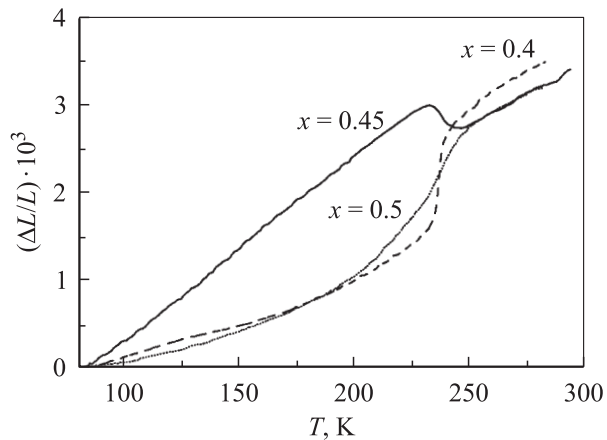


Рис. 2. Тепловое расширение монокристаллов $Nd_{1-x}Ca_xMnO_3$.

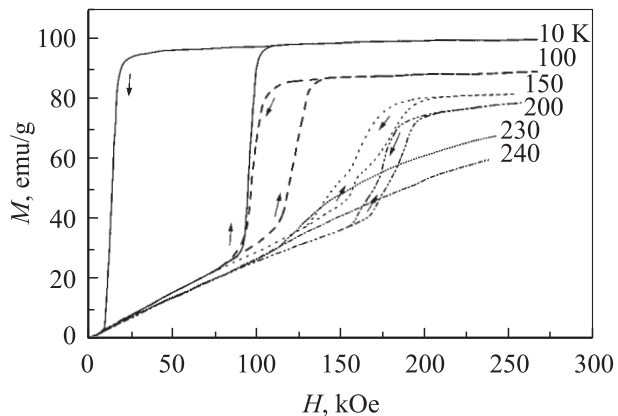


Рис. 3. Кривые намагничивания для монокристалла $Nd_{0.55}Ca_{0.45}MnO_3$.

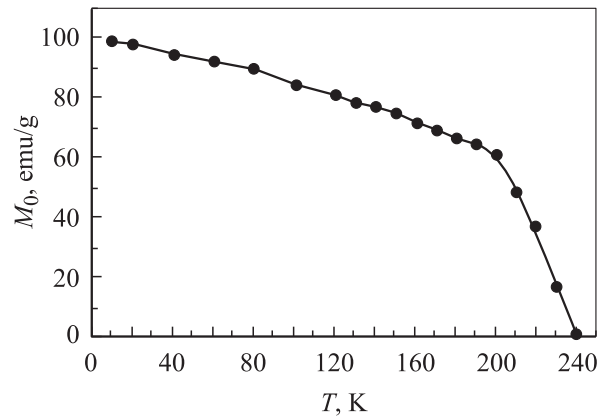


Рис. 4. Температурная зависимость индуцированной магнитным полем намагниченности $Nd_{0.55}Ca_{0.45}MnO_3$ при экстраполяции к нулевому полю.

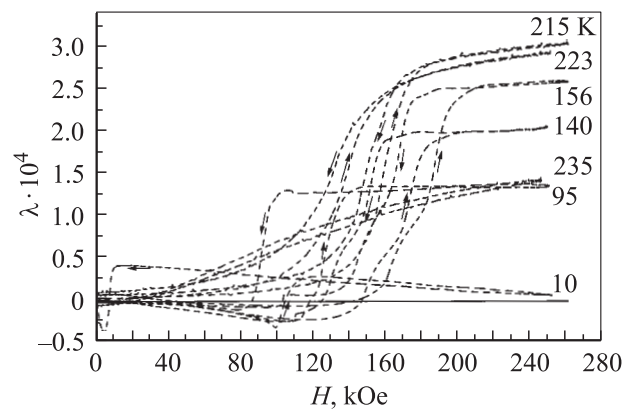


Рис. 5. Кривые магнитоэлектричества для монокристалла $Nd_{0.55}Ca_{0.45}MnO_3$.

Из рис. 3, на котором приведены кривые намагничивания для кристалла с $x = 0.45$, измеренные при различных температурах, видно, что для этого состава в слабом магнитном поле спонтанная намагниченность отсутствует. При увеличении магнитного поля до $H_{Cr} \approx 100$ кОе возникали резкие скачки намагниченности, связанные, очевидно, с фазовым переходом в ферромагнитное состояние. Температурная зависимость индуцированной магнитным полем намагниченности, полученная экстраполяцией изотерм намагниченности к нулевому полю, приведена на рис. 4. Видно, что намагниченность с ростом температуры убывает, обращаясь в нуль при температуре зарядового упорядочения, когда на кривых намагничивания исчезают скачки (рис. 3).

Для установления корреляции между аномалиями магнитных и магнитоупругих свойств при изучаемых фазовых переходах проводились измерения магнитоэлектричества в сильных магнитных полях. На рис. 5 приведены зависимости магнитоэлектричества от величины поля для состава с $x = 0.45$ при различных температурах. Как видно из рис. 5, при температурах от 10 К до темпе-

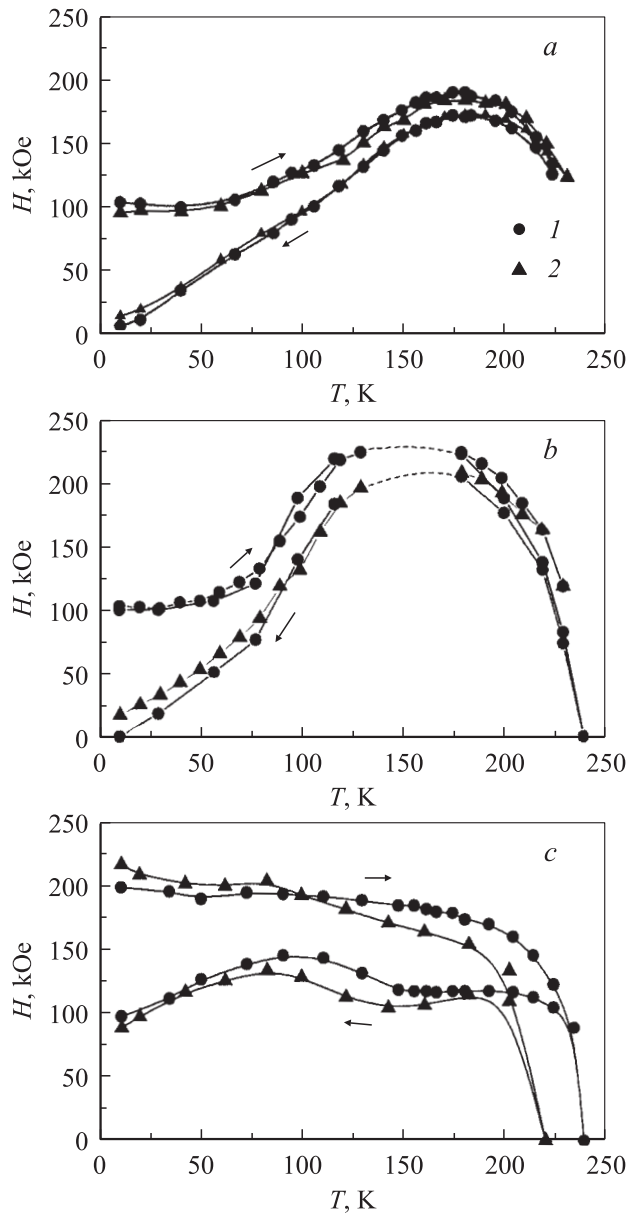


Рис. 6. Фазовые $H-T$ -диаграммы для монокристаллов $Nd_{1-x}Ca_xMnO_3$, полученные из измерений намагниченности (1) и магнитострикции (2). $x = 0.45$ (a), 0.4 (b) и 0.5 (c).

ратуры антиферромагнитного упорядочения $T_N = 160$ К на фоне сравнительно небольшой отрицательной магнитострикции, наблюдаемой в слабых магнитных полях, при пороговом поле возникает положительный скачок магнитострикции, связанный с переходом в ферромагнитное состояние. С повышением температуры отрицательная магнитострикция уменьшается и обращается практически в нуль вблизи $T_N = 160$ К. При дальнейшем повышении температуры вплоть до $T_{CO} = 235$ К наблюдается только положительный скачок магнитострикции, которая достигает максимального значения $3 \cdot 10^{-4}$ при 215 К и обращается в нуль при 235 К вблизи температуры зарядового упорядочения.

На основе проведенного измерения магнитострикции можно предположить, что, по-видимому, магнитострикционные деформации, связанные с подавлением антиферромагнитного и зарядового упорядочения, различаются знаком ($\lambda < 0$ при $T < T_N$ и $\lambda > 0$ при $T_N < T < T_{CO}$). По значениям пороговых полей, индуцирующих фазовый переход в ферромагнитное состояние кристалла $Nd_{0.55}Ca_{0.45}MnO_3$, определенных на основании измерений намагниченности и магнитострикции при различных температурах, были построены фазовые $H-T$ -диаграммы, которые приведены на рис. 6, a и хорошо согласуются друг с другом. Как видно из рис. 6, a, значения пороговых полей при возрастании и убывании температуры сильно различаются, обнаруживая гистерезис, что характерно для фазовых переходов первого рода. Наблюдаемые для системы $Nd_{0.55}Ca_{0.45}MnO_3$ переходы в ферромагнитное состояние связаны, очевидно, с подавлением магнитным полем антиферромагнитного зарядового упорядочения.

Аналогичные измерения кривых намагничивания магнитострикции в сильных магнитных полях были проведены на составах с $x = 0.4$ и 0.5 , для которых также наблюдались аномалии при индуцированном магнитным полем фазовом переходе в ферромагнитное состояние. Фазовые $H-T$ -диаграммы для этих составов приведены на рис. 6, b и c.

Следует отметить, что скачки намагниченности и магнитострикции при фазовом переходе в ферромагнитное состояние становятся менее резкими вблизи T_N , что затрудняет определение критических полей. Особенно сильно это проявляется для состава с $x = 0.4$ (критические поля в интервале температур 130–180 К в этом случае показаны штриховыми участками на рис. 6, b).

Таким образом, приведенное исследование позволило установить для монокристаллов $Nd_{1-x}Ca_xMnO_3$ с $x = 0.4, 0.45, 0.5$ корреляцию между изменением магнитных и магнитоупругих свойств при индуцированных магнитным полем фазовых переходах, связанных с подавлением антиферромагнитного и зарядового упорядочения и переходом в ферромагнитное металлическое состояние.

Список литературы

- [1] Y. Tokura, Y. Tomioka. *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 1 (1999).
- [2] F. Dupont, F. Milange, S. de Brion, A. Janossy, G. Chouteau. *Phys. Rev. B* **64**, 220 403 (2001).
- [3] M. Tokunaga, N. Miura, Y. Tomioka, Y. Tokura. *Phys. Rev. B* **57**, 5259 (1998).
- [4] F. Millange, S. de Brion, G. Chouteau. *Phys. Rev. B* **62**, 5619 (2000).
- [5] M. Respaud, A. Llobet, C. Frontera, C. Ritter, J.M. Broto, H. Rakoto, M. Goiran, J.L. Garcia-Munoz. *Phys. Rev. B* **61**, 9014 (2000).
- [6] T. Vogt, A.K. Cheetham, R. Mahendiran, R. Mahesh, C.N.R. Rao. *Phys. Rev. B* **54**, 15 303 (1996).