

Природа магнитоупругих аномалий в $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ при подавлении зарядового упорядочения магнитным полем

© Ю.Ф. Попов, А.М. Кадомцева, Г.П. Воробьев, К.И. Камилов, Я.С. Штофич,
В.Ю. Иванов*, А.А. Мухин*, 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,
105835 Москва, Россия

E-mail: popov@plms.msu.su

(Поступила в Редакцию 15 декабря 2002 г.)

Исследовались магнитные и магнитоупругие свойства монокристаллов $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ в импульсных магнитных полях до 250 кОе, магнитные и кинетические свойства этих кристаллов в слабых статических магнитных полях, а также их тепловое расширение. Показано, что в этих кристаллах наблюдаются разнообразные аномалии исследуемых свойств, обусловленные переходом из антиферромагнитного полупроводникового состояния в ферромагнитное металлическое при подавлении зарядового упорядочения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-02-16500 и 00-15-96695).

В последнее десятилетие наблюдается огромный интерес к исследованию замещенных манганитов $\text{R}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (R — редкоземельный ион, A — Sr, Ca), обусловленный в первую очередь обнаружением в этих соединениях эффекта колоссального магнитосопротивления. Проводимые исследования выявили ряд новых интересных явлений в указанных материалах, связанных с локализацией носителей тока и зарядовым упорядочением ионов $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$, орбитальным упорядочением ионов Mn^{3+} , индуцированными магнитным полем структурными фазовыми переходами и фазовыми переходами полупроводник–металл.

Наличие спинового, зарядового и орбитального упорядочения, характерного, в частности, для редкоземельных манганитов, приводит к появлению в системе $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ богатых фазовых диаграмм [1].

Для этой системы наблюдается спиновое, зарядовое и орбитальное упорядочение *CE*-, *A*- и *C*-типов [1].

Особый интерес представляет состав с $x = 0.5$, для которого кулоновское взаимодействие электронов приводит к их локализации и зарядовому упорядочению. Последнее может подавляться магнитным полем, так как при ориентации спинов полем увеличивается подвижность носителей тока и подавляется тенденция к их локализации. Именно при подавлении зарядового упорядочения наблюдается возрастание магнитосопротивления.

Как видно из фазовой диаграммы [1], *CE*-тип зарядово-упорядоченного антиферромагнитного состояния наблюдается только вблизи состава $x = 0.5$ и сосуществует с *A*-типом антиферромагнитного состояния, а также с ферромагнитным состоянием [1,2].

Согласно фазовой диаграмме, для $x = 0.5$ при 250 К наблюдается ферромагнитное упорядочение, а при по-

нижении температуры вблизи $T_{CO} = 140$ К происходит зарядовое антиферромагнитное упорядочение.

Монокристаллы $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ были выращены методом зонной плавки с оптическим нагревом.

На рис. 1 приведены температурные зависимости намагниченности и сопротивления для этих монокри-

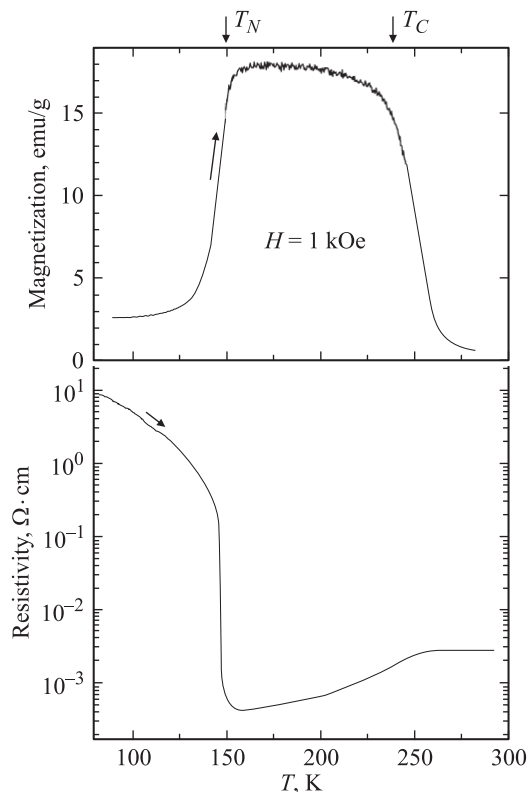


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности и электросопротивления монокристаллов $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$.

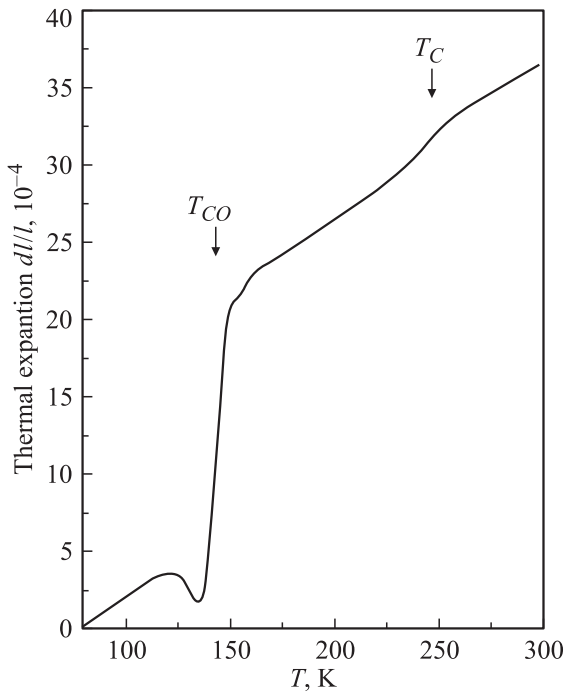


Рис. 2. Температурная зависимость теплового расширения $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$.

сталлов, обнаруживающие аномалии вблизи T_C и T_{CO} . На полученных монокристаллах было измерено также тепловое расширение dl/l вдоль направления магнитного момента в отсутствие магнитного поля (рис. 2). Как видно из рис. 2, с повышением температуры вблизи температуры зарядового упорядочения $T_{CO} = 140$ К наблюдается резкий положительный скачок до $2 \cdot 10^{-3}$, ассоциирующийся с переходом из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние. Сильное тепловое расширение кристалла объясняется, по-видимому, тем, что в этом составе, согласно [3], сосуществуют три фазы с различными объемами элементарных ячеек, причем в ферромагнитном состоянии объем элементарной ячейки является максимальным ($V_{\text{НТО}} = 159.4 \text{ \AA}^3$). Наименьшим объемом обладает антиферромагнитная фаза А-типа ($V_{\text{ЛТО}} = 158.65 \text{ \AA}^3$), причем обе фазы (и ферромагнитная, и антиферромагнитная А-типа) принадлежат к орторомбической симметрии. Основной фазой в области низких температур является зарядово-упорядоченная антиферромагнитная моноклинная фаза СЕ-типа, которая имеет объем ячейки $V_{\text{ЛТМ}} = 159.1 \text{ \AA}^3$. Наблюдаемая аномалия теплового расширения связана, по-видимому, со структурным фазовым переходом от моноклинной симметрии к орторомбической. Отметим, что на рис. 2 фазовому переходу, сопровождающемуся резким возрастанием размеров кристалла, предшествует отрицательный скачок dl/l до $2 \cdot 10^{-4}$, который, возможно, связан с частичным изменением соотношения антиферромагнитных фаз А- и СЕ-типа. Вблизи температуры ферромагнитного упорядочения ($T_C = 250$ К) наблюдалась лишь незначительная аномалия теплового расширения.

Для монокристалла $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ измерялись также намагниченность и магнитострикция в сильных импульсных магнитных полях до 250 кОе в интервале температур 10–300 К.

Как видно из рис. 3, на кривых намагниченности, полученных при температурах ниже $T_{CO} = 140$ К в критическом магнитном поле, разрушающем зарядовое упорядочение, наблюдаются скачки, обусловленные, очевидно, фазовым переходом из антиферромагнитного полупроводникового в ферромагнитное металлическое состояние. Видно, что этот переход сопровождается значительным гистерезисом по полю. По значениям пороговых полей была построена фазовая $H-T$ -диаграмма, обнаруживающая широкую область сосуществования различных фаз (рис. 4). При температурах выше температуры зарядового упорядочения вплоть до температуры $T_C = 250$ К скачки намагниченности на кривых исчезают, поскольку кристалл в отсутствие магнитного поля становится ферромагнетиком (рис. 3).

Обращает на себя тот факт, что на рис. 3 при низких температурах ниже 50 К в слабых магнитных полях наблюдается отличный от нуля магнитный момент, хотя кристалл, казалось бы, находится в антиферромагнитном состоянии. Этот небольшой момент связан, по-видимому, с существованием при низких температурах наряду с антиферромагнитной фазой примеси ферромагнитной фазы. С повышением температуры примесный ферромагнитный момент сохраняется вплоть до 50 К, а при дальнейшем повышении температуры исчезает (см. вставку на рис. 3).

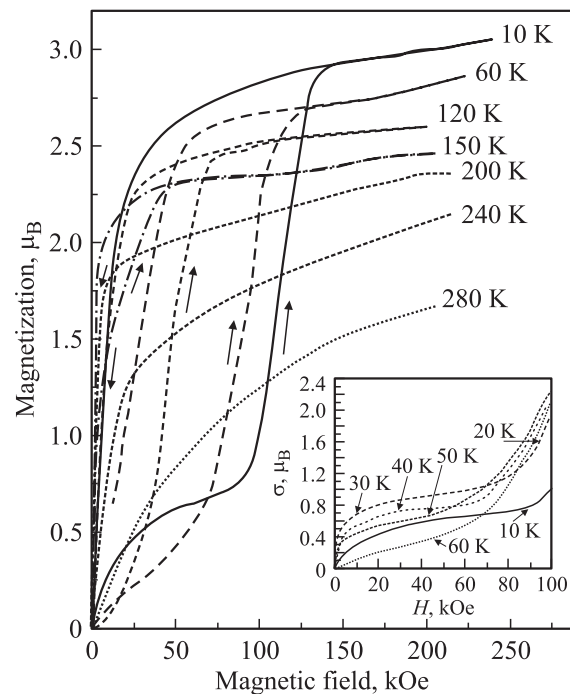


Рис. 3. Изотермы намагниченности монокристалла $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$. На вставке приведен начальный ход намагниченности при температурах 10–60 К.

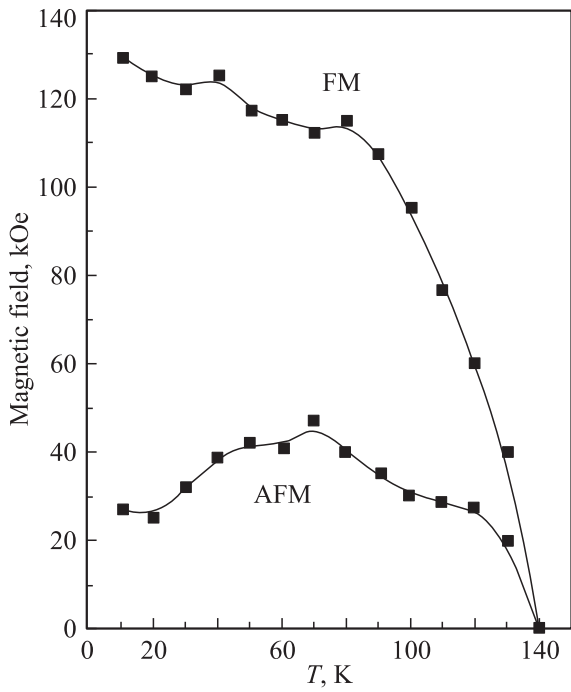


Рис. 4. Фазовая $H-T$ -диаграмма $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$.

Изменение величины первоначального магнитного момента с изменением температуры и поля указывает, по-видимому, на то, что соотношение сосуществующих в $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ фаз может меняться под влиянием внешних условий.

Отметим также, что в сильном магнитном поле в ферромагнитном состоянии значение магнитного момента не превышало $3\mu_B$, что меньше теоретически предсказанного $3.5\mu_B$. Данный факт, возможно, связан с тем, что в ферромагнитном состоянии может присутствовать примесь антиферромагнитной фазы А-типа, приводящая к уменьшению суммарного магнитного момента.

На исследованных кристаллах в тех же условиях измерялась магнитострикция. На рис. 5 приведены изотермы зависимости продольной магнитострикции вдоль направления магнитного момента. Видно, что при температуре 10 К магнитострикция в полях $H < H_{CR} = 100$ кОе мала, с ростом поля до H_{CR} наблюдается отрицательный скачок магнитострикции до $-6 \cdot 10^{-4}$, связанный, очевидно, с изменением соотношения различных фаз, имеющих разные объемы. С повышением температуры от 50 К вплоть до T_{CO} на фоне отрицательной магнитострикции появляется резкое возрастание магнитострикции. Далее при повышении температуры в интервале $T_{CO} < T < T_C$ магнитострикция оставалась положительной, затем резко уменьшалась по величине, меняла знак и носила обменный характер.

Ранее [3] измерения магнитострикции $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ проводились только на поликристаллических образцах в интервале температур 50–250 К, при этом магнитострикция имела положительный знак и связывалась

со структурным фазовым переходом. Наблюдаемая нами отрицательная магнитострикция, предшествующая появлению положительной, может быть связана с тем, что, как указывалось выше, для состава $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ сосуществуют три фазы и в процессе перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние может изменяться соотношение фаз, имеющих разные объемы. С этим коррелирует также наличие отрицательного пика на температурной зависимости теплового расширения, предшествующее положительному скачку (рис. 2), а также примесный магнитный момент, который наблюдается при низких температурах (рис. 3).

Таким образом, вся совокупность наблюдаемых аномалий может быть объяснена, если учесть, что существует две тенденции при изменении температуры и поля. Первая тенденция связана с предпочтением появления в магнитном поле ферромагнитного состояния при подавлении зарядово-упорядоченного состояния. Вторая тенденция, возможно, обусловлена тем, что при учете в свободной энергии упругого и магнитоупругого вклада орторомбическая фаза А-типа является более предпочтительной, чем моноклинная антиферромагнитная фаза CE -типа. Смена знака магнитострикции при изменении величины поля и температуры, наблюдаемая в нашем эксперименте, может быть связана с тем, что первая тенденция вызывает положительную магнитострикцию, а вторая — отрицательную. Сложный характер наблюдаемых аномалий магнитострикции определяется тем, что магнитное поле индуцирует наряду с фазовым переходом металл–полупроводник также структурный фазовый переход.

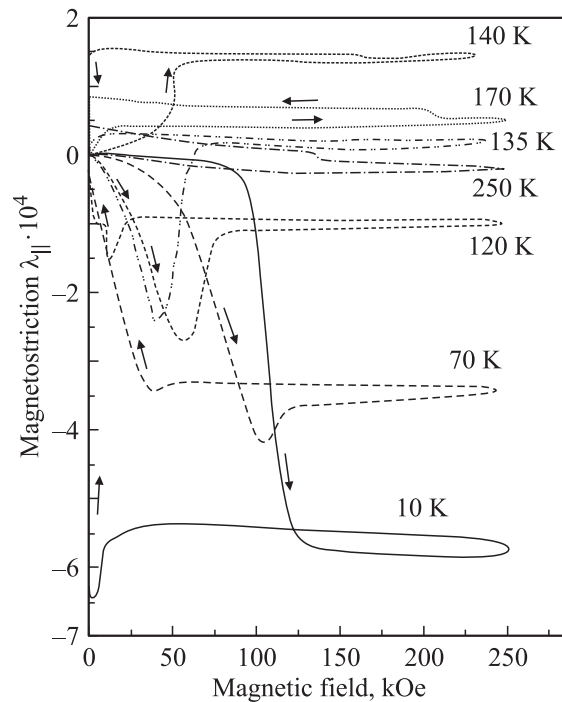


Рис. 5. Изотермы продольной магнитострикции монокристалла $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$.

Список литературы

- [1] R. Kajimoto, H. Yoshizawa, H. Kawano, H. Kuwahara, Y. Tokura, K. Ohoyama, M. Ohashi. *Phys. Rev. B* **60**, 13, 9506 (1999).
- [2] C. Ritter, R. Mahendiran, M.R. Ibarra, L. Morellon, A. Maignan, B. Raveau, C.N.R. Rao. *Phys. Rev. B* **61**, 14, R9229 (2000).
- [3] R. Mahendiran, M.R. Ibarra, A. Maignan, F. Millange, A. Arulraj, R. Mahesh, C.N.R. Rao. *Phys. Rev. Lett.* **82**, 10, 2191 (1999).