

## Эффект невязимности при распространении ультразвука в монокристалле $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$

© Х.Г. Богданова, А.Р. Булатов, В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Капралов, М.И. Куркин\*, А.А. Потапов, В.В. Николаев\*, В.Е. Леонтьев

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Российской академии наук, 420029 Казань, Россия

\* Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук, 620219 Екатеринбург, Россия

E-mail: [acustica@kfti.knc.ru](mailto:acustica@kfti.knc.ru)

(Поступила в Редакцию 23 мая 2005 г.)

В результате экспериментального исследования температурной зависимости параметров ультразвуковых волн на частоте 770 МГц в интервале  $T = 285\text{--}330\text{ К}$  в монокристалле  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  обнаружено различие в скоростях ультразвуковых волн, распространяющихся в образце в противоположных направлениях (эффект невязимности). Наиболее вероятной причиной такой акустической невязимности является существование в данном температурном интервале структурных и магнитных многофазных состояний и образование структурных микроскопических неоднородностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-02-16087), Президиума РАН и гранта Президента РФ МК-3752.2004.2.

PACS: 43.35.Cg, 75.47.Lx, 62.65.+k

Под эффектами невязимности обычно понимают различие в параметрах волн, прошедших через образец, при распространении падающей волны в двух противоположных направлениях. Такими параметрами могут быть поляризация, затухание, а также скорость распространения. Различные проявления эффекта невязимности при распространении электромагнитных волн оптического диапазона были достаточно полно исследованы в последние годы, особенно в связи с возможным применением в кольцевых лазерах бегущей волны, оптических затворах и в качестве метода исследования внутреннего строения вещества [1–3]. В частности, в работах [2,3] был теоретически рассмотрен и экспериментально обнаружен новый механизм электромагнитной невязимности в многослойных системах с гиротропными слоями, который обусловлен одновременным наличием пространственного градиента одного из параметров среды по направлению волны и естественной или наведенной гиротропии.

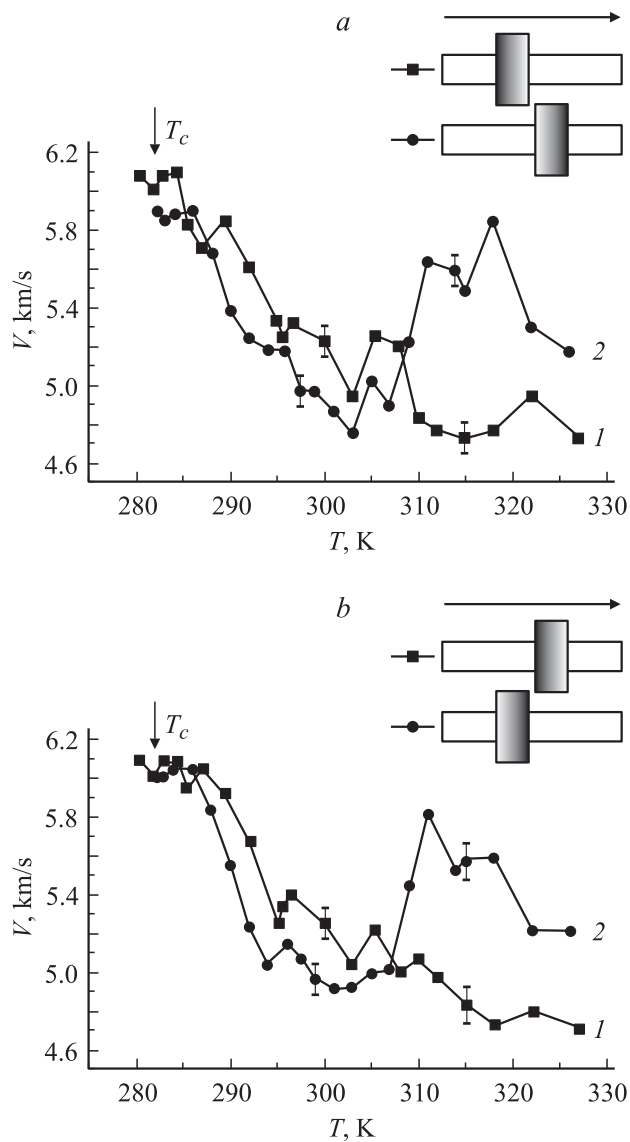
Эффекты невязимности в акустике также обсуждались [4], хотя и не столь подробно, как для электромагнитных волн. Теоретические работы в основном касались только условий распространения волн в приложенном магнитном поле (акустические аналоги эффектов Фарадея и Фогга) [4]. Поскольку эффекты невязимности волн имеют различную природу, нам представлялось актуальным исследовать возможность их проявления при распространении акустических волн в условиях, близких к экспериментам с электромагнитными волнами.

Для лантан-стронциевых манганитов системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  при значении  $0.17 < x < 0.18$  в широком температурном интервале сосуществуют две структурные фазы (орторомбическая и ромбоэдрическая) в условиях магнитного двухфазного состояния (антиферро-

и ферромагнитных фаз), что приводит к образованию структурных микроскопических неоднородностей [5,6]. Поскольку такие неоднородности были зафиксированы ультразвуковыми методами, это послужило основанием для изучения эффекта акустической невязимности в монокристалле лантан-стронциевого манганита с  $x = 0.175$ . Предполагалось, что микроскопические структурные и магнитные неоднородности могут значительно влиять на характер распространения ультразвука с длиной волны порядка нескольких микрометров, используемого в наших экспериментах.

Исследования проводились на монокристалле  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$ , выращенном в МЭИ в группе А.М. Балбашова методом зонной плавки оптическим пучком. Ультразвуковые волны в виде коротких импульсов длительностью  $\tau_i = 0.5\text{--}1\ \mu\text{s}$  распространялись вдоль оси [112] образца, имеющего вид прямоугольного параллелепипеда размером  $4.85 \times 8.2 \times 7.9\ \text{mm}$ . Торцы образца были плоскопараллельными с точностью до нескольких угловых секунд. Импульсы генерировались и детектировались пьезопреобразователями из ниобата лития. Скорость измерялась по времени прихода на детектор импульса, прошедшего через систему пьезопреобразователь–образец–пьезопреобразователь, в температурном интервале 150–330 К.

В результате измерений было обнаружено различие в скоростях акустических волн, распространяющихся в противоположных направлениях в кристалле манганита (рисунок, *a*). Чтобы связать различие в скоростях именно с распространением в манганите, образец был переклеен относительно преобразователей, что позволило изменить направление импульсов в манганите, сохранив его для пьезопреобразователей. Из рисунков, *a, b*



Скорость распространения ультразвуковых импульсов при прямой (1) и обратной (2) ориентациях исследуемого образца. *a* — до переключения образца, *b* — после переключения образца относительно преобразователей.

следует, что различие в акустических скоростях имеет место только в манганите в температурном интервале  $330 \geq T \geq 285$  К. Как видно из рисунка, в интервалах  $T = 305-330$  и  $385-305$  К изменения скоростей ультразвуковых волн имеют противоположный знак. Первый из них ( $T = 305-330$  К) соответствует температурному интервалу структурного перехода и смешанному ромбоэдрическому-орторомбическому состоянию, а второй — переходу из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние. Наличие структурной и магнитной двухфазности, как установлено в работах [5,6], и приводит к возникновению структурных и магнитных неоднородностей, имеющих в основном слоистый характер. Их размеры по порядку величины сравнимы в нашем случае с длиной ультразвуковой волны. На границах таких

неоднородностей, трактуемых как упругие домены [7], возникают упругие напряжения, и это может являться причиной локальных изменений параметров анизотропии. В этих условиях ультразвуковая волна будет многократно отражаться и преломляться на каждой из границ упругих доменов и испытывать линейное и циркулярное двулучепреломление внутри доменов. Вследствие различия углов падения и отражения на границах доменов и неодинаковой гиротропии отдельных доменов, как показано в [4], может возникать асимметрия волновых векторов ультразвуковой волны, распространяющейся в прямом и обратном направлениях в образце.

На наш взгляд, такое значительное изменение скорости ультразвука, достигающее  $\Delta V \approx 8-16\%$ , особенно в отсутствие намагниченности в интервале  $T = 305-330$  К, может возникать за счет многократных трансформаций ультразвуковой волны на границах микроскопических неоднородностей, а изменение знака  $\Delta V$  вблизи  $T = 305$  К обусловлено трансформацией неоднородностей от структурных к магнитным. Наблюдающиеся в этом же температурном интервале значительные изменения поглощения частично также определяются вращением плоскости поляризации ультразвуковой волны. Таким образом, в условиях пространственной дисперсии и многократных отражений от границ упругих доменов возникает эффект невязимности для акустических волн.

Обнаруженный эффект невязимности обсуждается далее на основе специальной схемы симметричного анализа антиферромагнитных структур, развитой в [4].

Манганиты состава  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  имеют перовскитную кристаллическую структуру, но идеальная структура кубического перовскита встречается очень редко. Обычно наблюдается смесь фаз с тетрагональными, (орто)ромбическими и ромбоэдрическими (тригональными) искажениями [5]. Все указанные искаженные перовскитные структуры обладают центром симметрии, и поэтому в них не могут существовать эффекты невязимности. Однако ситуация может измениться, если в упомянутых искаженных фазах устанавливается антиферромагнитный порядок. Дело в том, что антиферромагнетизм в таких структурах соответствует специальному классу магнетиков, в которых положения магнитных атомов не совпадают с положением центра симметрии (см., например, [8]). Поскольку в таких структурах действие центра симметрии приводит к изменению знака определенных компонент векторов антиферромагнетизма, магнитная симметрия может уже не накладывать запрета на существование невязимности. Заметим, что подобные элементы симметрии, связанные с перестановкой магнитных подрешеток, часто называют нечетными.

Подробный анализ магнитных структур с использованием четностей элементов кристаллохимической симметрии содержится в [4]. Для нас представляют интерес только пространственная инверсия  $\bar{1}(\pm)$  и оси второго порядка  $2(\pm)$ , с наличием которых может быть связано появление (или запрет) эффектов невязимности.

В ромбоэдрических манганитах магнитные атомы (Mn) занимают четырехкратные позиции 4с, поэтому обменные антиферромагнитные структуры таких кристаллов формируются четырьмя подрешетками и описываются тремя векторами антиферромагнетизма. Обозначим их, следуя [4] (стр. 225), через  $\mathbf{L}_a$ ,  $\mathbf{L}_b$ ,  $\mathbf{L}_c$  и отметим, что они (с учетом их четности) обладают разными трансформационными свойствами при действии генераторов группы кристаллохимической симметрии. Кроме того, каждый из них полностью характеризует в обменном приближении соответствующее основное магнитное состояние (взаимное расположение магнитных моментов в позициях 4с является параметром порядка). Под действием пространственной инверсии векторы  $\mathbf{L}_b$  и  $\mathbf{L}_c$  меняют знак, оказываются центроантисимметричными (здесь инверсия нечетная:  $\bar{1} = \bar{1}(-)$ ), и поэтому принципы симметрии не накладывают запрета на существование эффекта невязимности в таких структурных фазах манганита. Более того, когда параметром магнитного порядка служит  $\mathbf{L}_a$  (а он в рассматриваемом случае центросимметричен:  $\bar{1} = \bar{1}(+)$ ), невязимность допускается симметрией из-за специфического вида магнитоупругого взаимодействия, которое содержит произведение соответствующих компонент сразу двух векторов антиферромагнетизма разной четности:  $\mathbf{L}_{ai}\mathbf{L}_{bj}$  или  $\mathbf{L}_{ai}\mathbf{L}_{cj}$  ( $i, j = x, y, z$ ). Поскольку исходная антиферромагнитная структура характеризуется центросимметричным вектором, ее искажения за счет упругих деформаций, создаваемых ультразвуковой волной, описываются центроантисимметричными векторами  $\mathbf{L}_b$  и  $\mathbf{L}_c$ . Вследствие этого существование эффекта невязимности становится возможным.

Теперь рассмотрим орторомбическую фазу, в которой атомы Mn занимают, согласно [4] (стр. 136), также четырехкратные позиции, но 4b, а не 4с. Магнитное упорядочение в такой системе описывается также тремя векторами антиферромагнетизма  $\mathbf{L}_a$ ,  $\mathbf{L}_b$ ,  $\mathbf{L}_c$ , как и в предыдущем случае, но операция инверсии является четной для всех  $\mathbf{L}$ :  $\bar{1}(+)\mathbf{L}_{a,b,c} = +\mathbf{L}_{a,b,c}$ . Зато нечетными элементами оказываются некоторые из осей симметрии второго порядка. Так,  $2_y(-)\mathbf{L}_a = -2_y\mathbf{L}_a$ ,  $2_z(-)\mathbf{L}_b = -2_z\mathbf{L}_b$ ,  $2_x(-)\mathbf{L}_c = -2_x\mathbf{L}_c$ . В наборе генераторов группы кристаллохимической симметрии рассматриваемых однопозиционных антиферромагнетиков всегда существует не меньше одного нечетного элемента симметрии (случаю, когда все такие элементы четны, соответствует ферромагнитная обменная структура). Это означает, что при антиферромагнитном упорядочении такого типа симметрия допускает существование эффекта невязимности для направления волнового вектора, лежащего в плоскости, перпендикулярной нечетной оси симметрии.

Представленные экспериментальные данные достаточно убедительно, с нашей точки зрения, демонстрирует существование эффекта акустической невязимности в исследованном образце лантан-стронциевого манганита. С одной стороны, это удивительно, потому что перовскитная структура манганитов относится к числу

высокосимметричных. С другой стороны, в последнее время в манганитах открыто столько необычных эффектов (коллоасальное магнитосопротивление, зарядовое и орбитальное упорядочение, сильные изотопические зависимости, фазовое расслоение и др.), что обнаружение еще одного эффекта кажется закономерным. Однако, учитывая слабость магнитоупругого взаимодействия, следует признать, что наблюдаемое различие скоростей ( $\Delta V \approx 8-16\%$ ) при распространении ультразвуковых импульсов в противоположных направлениях оказалось даже сильнее, чем можно было ожидать.

Мы надеемся, что на основе эффектов невязимности удастся разработать методики экспериментального изучения фазового расслоения, которое сейчас интенсивно обсуждается в литературе, посвященной манганитам (см., например, [9]).

Авторы благодарят Е.А. Турова и В.В. Меньшенина за полезные критические замечания при обсуждении данной работы.

## Список литературы

- [1] И.А. Андропова, Г.Б. Малыкин. УФН **172**, 8, 849 (2002).
- [2] А.А. Геворгян. Письма в ЖТФ **29**, 19, 60 (2003).
- [3] Е.Ф. Венгер, В.Б. Попов, Б.К. Сердега, В.В. Шинкар. Опт. и спектр. **89**, 5, 810 (2000).
- [4] Е.А. Туров, А.В. Колчанов, В.В. Меньшенин, И.Ф. Мирсаев, В.В. Николаев. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. Физматлит, М. (2001). 560 с.
- [5] T.W. Darling, A. Migloli, E.G. Moshopoulou, S.A. Trugman, J.J. Neumeier, J.L. Sarrao, A.R. Bishop, J.D. Thompson. Phys. Rev. B **57**, 9, 5093 (1998).
- [6] Х.Г. Богданова, А.Р. Булатов, В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Капралов, А.А. Потапов. Письма в ЖЭТФ **78**, 5, 753 (2003).
- [7] D.I. Khomskii, K.I. Kugel. Phys. Rev. B **67**, 13, 134401 (2003).
- [8] Е.А. Туров, В.В. Николаев. УФН **175**, 5, 457 (2005).
- [9] M.B. Salamon, M. Jamin. Rev. Mod. Phys. **73**, 3, 583 (2001).