

05,06

Формирование субмикронных частично упорядоченных доменных структур в сегнетоэлектрических и магнитных материалах

© Х.Г. Богданова¹, А.Р. Булатов², А.В. Голенищев-Кутузов², В.А. Голенищев-Кутузов²,
Р.И. Калимуллин², А.А. Потапов²

¹ Казанский физико-технический институт Казанского научного центра РАН,
Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия

E-mail: aapot@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 5 апреля 2011 г.)

Изучены процессы формирования доменов и частично упорядоченных периодических доменных структур в сегнетоэлектрических и магнитных оксидах металлов переходных групп. На примере монокристаллов ниобата лития и лантан-стронциевых манганитов рассмотрены физические особенности возникновения субмикронных периодических доменных структур и возможности их использования для управления параметрами высокочастотных акустических волн.

Работа поддержана РФФИ № 08-02-00434-а.

1. Введение

В наши дни периодические доменные структуры (ПДС) находят все большее применение в устройствах генерации и управления параметрами когерентных оптических и ультразвуковых пучков [1]. Главным преимуществом структур с ПДС является их большая оптическая или акустическая нелинейность, связанная с изменением знаков тензоров диэлектрической или магнитной проницаемости, пьезоэлектрического эффекта и ряда других линейных и нелинейных коэффициентов. В связи с переходом на более короткие длины оптических и акустических волн, возникли большие проблемы с формированием доменов в субмикронном и особенно в наноразмерном диапазонах классическими методами. Вследствие этого в последние годы возник интерес к возможности использования доменов, расположенных не полностью упорядоченно [2–5]. Такие структуры возникают в начальном процессе формирования ПДС в условиях сильного неравновесного пространственного воздействия на образцы, создающего локальные переключения поляризации, например остросфокусированными лазерными или электронными пучками [2–4]. Другим способом формирования частично упорядоченных ПДС являются температурные интервалы фазовых магнитных или структурных переходов из неупорядоченного в упорядоченное состояние. Оба способа формирования подобных ПДС совсем недавно получили экспериментальное подтверждение [5,6]. Привлекательность обоих методов состоит в том, что размеры доменов в подобных процессах могут варьироваться от нано- до микрометров.

Специфика динамики роста доменных структур в общем виде может быть представлена как процесс зарождения первичных иглообразных доменов вблизи

одной из поверхностей и дальнейшем их прорастанием в объем кристалла [2]. Путем изменения интенсивности и времени внешнего воздействия можно регулировать как размеры доменов, так и их взаиморасположение. Например, такие нанодомены могут образовывать самоорганизующиеся кластеры в виде одно-, двух- и даже трехмерных структур, которые можно отнести к классу нелинейных фотонных и фононных кристаллов. Несомненно, что такие кристаллы позволят создавать новые виды устройств нелинейной оптики и акустики.

На данный момент наиболее продвинутыми в этом направлении являются исследования по неколлинеарной генерации второй гармоники (ВГ) лазерного излучения в кристаллах LiNbO_3 , $\text{SrBaNb}_2\text{O}_6$, BaTiO_3 , KTiOPO_4 [3–5]. В частности, в кристаллах $\text{SrBaNb}_2\text{O}_6$ возникновение неколлинеарной ВГ происходило вблизи температуры фазового перехода из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу при одновременном приложении поляризующего электрического поля, а в других кристаллах только при структурированном лазерном облучении также в электрическом поле.

Целью нашей работы было изучение возможностей формирования субмикронных ПДС в кристаллах ниобата лития и манганитах. Подобно тому как это было сделано в большинстве предыдущих исследований на частично упорядоченных структурах, для изучения мы также использовали генерацию неколлинеарной ВГ акустических волн.

2. Экспериментальные результаты

Мы провели исследования особенностей распространения высокочастотных акустических волн ($f = 100\text{--}800\text{ MHz}$) в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и магнетиках состава $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.175$), содержащих

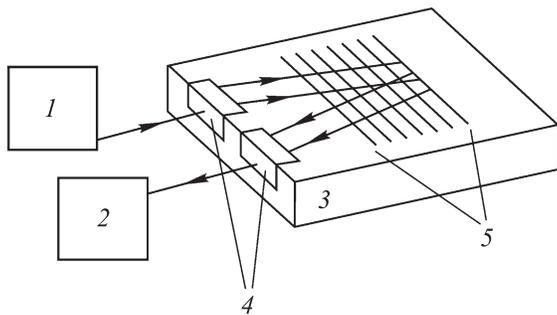


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки по генерации второй гармоники ПАВ в обратном направлении. 1 — генератор, 2 — приемник, 3 — образец ниобата лития, 4 — угольные преобразователи, 5 — ПДС.

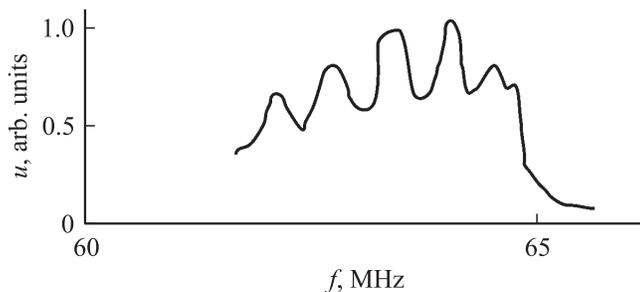


Рис. 2. Генерация второй гармоники ПАВ.

упорядоченные доменные структуры [7,8]. В первом случае ПДС формировались при облучении образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ лазерными импульсами в приложенном электрическом поле, несколько меньшем коэрцитивного поля. В последнее время нами был разработан подобный способ формирования ПДС, содержащим домены с размерами $\sim 5\text{--}100\ \mu\text{m}$. Путем использования методов оптической и акустической дифракции, был установлен размытый максимум в концентрации доменов с размерами порядка $30\text{--}60\ \mu\text{m}$.

Возникновение неколлинеарной ВГ поверхностной акустической волны было обнаружено при исследовании прохождения интенсивных ($10^{-5} < u < 10^{-4}$) поверхностных акустических волн через периодическую доменную структуру, сформированную в ниобате лития (рис. 1). При фиксированной частоте генератора в интервале $32\text{--}35\ \text{MHz}$ и перестройке частоты супергетеродинного приемника были обнаружены помимо сигналов на основной частоте также сигналы акустических импульсов в интервале $60\text{--}65\ \text{MHz}$, т.е. на частоте, соответствующей ВГ генерируемых акустических импульсов (рис. 2). При этом в зависимости интенсивности на основной частоте $I(\omega)$ от величины переменного напряжения на преобразователе $u(\omega)$ (рис. 3) наблюдается нелинейное уменьшение $I(\omega)$, что связано с нелинейным увеличением интенсивности сигнала ВГ $I(2\omega)$.

Точно такое же поведение интенсивности наблюдалось и при генерации ВГ на частотах, удовлетворяющих более высоким резонансам: $f = 63\ \text{MHz}$, $2f = 126\ \text{MHz}$ и далее на всех высших гармониках.

Интенсивность $I(2\omega)$ имеет квадратичную зависимость относительно $I(\omega)$, что и наблюдается на рис. 3. Некоторое падение интенсивности $I(\omega)$ с ростом $u(\omega)$ можно объяснить нелинейным увеличением интенсивности ВГ и, следовательно, возрастанием перекачки энергии от первой во вторую гармонику. Эти результаты по генерации неколлинеарной ВГ отличаются от ранее наблюдавшейся нами [7] коллинеарной гармоники на структуре ПДС.

Влияние упорядоченных доменных структур не ограничивается генерацией ВГ. Примером тому является модовая трансформация акустической волны в ман-

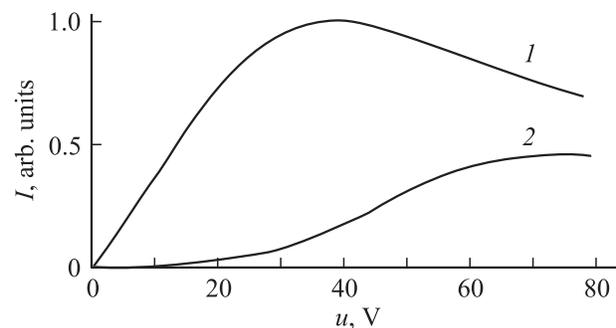


Рис. 3. Зависимость интенсивности первой (1) и второй (2) гармоник ПАВ от приложенного к преобразователю напряжения.

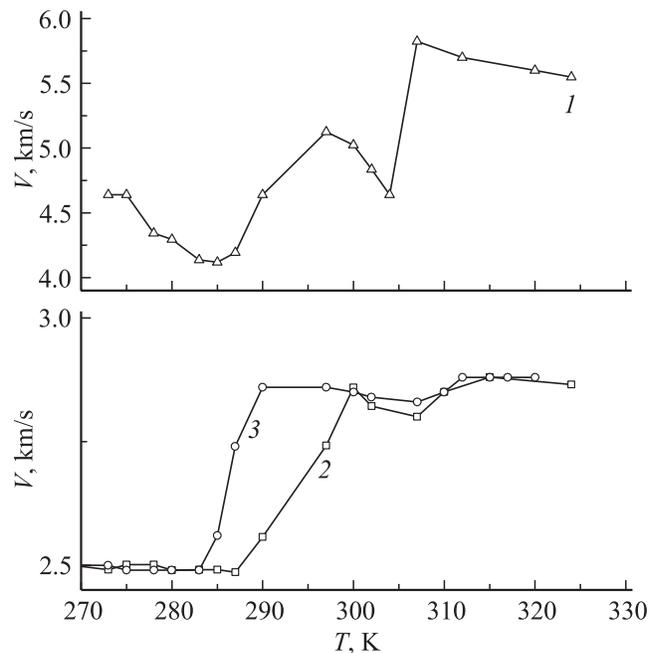


Рис. 4. Температурные зависимости скоростей продольных (1), квазипоперечных (магнитоупругих) (2) и поперечных (3) акустических импульсов в $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$.

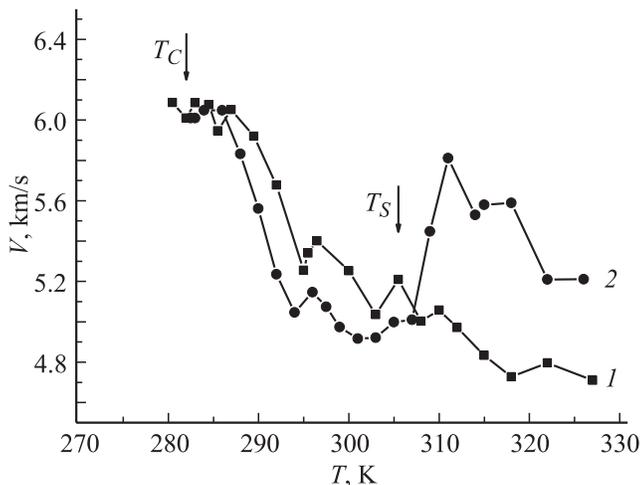


Рис. 5. Температурная зависимость скорости импульсов при распространении в прямом (1) и обратном (2) направлении в образце $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$.

ганитах. В этом случае исследовалось распространение акустических волн с частотой $f = 770$ МГц в лантан-стронциевом манганите вблизи обнаруженного нами ранее структурного фазового перехода первого рода при $T_S = 310$ К [8]. Было установлено, что именно при T_S возникает трансформация части энергии продольной волны в квазипоперечную волну, которая отличается от первичной волны скоростью распространения и поляризацией (рис. 4).

Как известно [1,9], нелинейные оптические и акустические свойства ПДС также проявляются в изменении скорости трансформации мод и эффекте невязимности для волн, распространяющихся в подобных средах. В наших экспериментах по распространению высокочастотных ($f = 700$ МГц) акустических волн через монокристаллы лантан-стронциевых манганитов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.175$) было обнаружено как изменение скорости, так и невязимность волн вблизи близко расположенных по температуре магнитном ($T_C = 285$ К) и структурном ян-теллеровского типа ($T_S = 310$ К) переходах. Как следует из рис. 4, наибольшее изменение в скоростях акустических волн наблюдалось в интервале $T_C - T_S$. В интервале $T = 280 - 330$ К был обнаружен эффект невязимности, заключающийся в различии скоростей акустических волн, распространявшихся в образце в противоположных направлениях (рис. 5). При этом вблизи $T = 305$ К наблюдалась перемена знака в изменении скорости.

3. Заключение

Общей причиной изменения скоростей волн в указанном выше интервале температур является возникновение не полностью упорядоченных слоистых структур (упругих доменов), на возможность возникновения ко-

торых в окрестностях фазовых переходов в манганитах указывалось Кугелем и Хомским [10] и Туровым и Николаевым [11]. При этом интервал $T = 305 - 400$ К [8] является областью существования структурных ян-теллеровских доменов, образованных искаженными октаэдрами MnO_3 и имеющими близкий порядок упорядочения. Интервал $T_C < T < T_S$ характерен магнитоупругими доменами, возникающими в промежуточной области двухфазного ферромагнитного и парамагнитного состояния. Различие в особенностях обоих видов доменов проявляется при приложении внешнего магнитного поля порядка тесла, влияние которого на параметры акустических волн сказывается только вблизи T_C . Нарастание ферромагнитного упорядочения при приложении поля приводит к подавлению как ближнего порядка среди искаженных ян-теллеровских октаэдров MnO_3 , так и двухфазного магнитного состояния. Вследствие этого ниже T_C исчезают ближний порядок ян-теллеровских и магнитоупругих доменов, что приводит к практическому исчезновению описанных выше нелинейных эффектов в распространении акустических волн.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было установлено возникновение не полностью упорядоченных доменных структур в сегнетоэлектрических и магнитных оксидах металлов, обладающих сильными нелинейными акустическими свойствами. Это подтверждается генерацией ВГ, модовой трансформацией и эффектом невязимности акустических волн.

Список литературы

- [1] А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин. Фотонные и фононные кристаллы: формирование и применение в опто- и акустоэлектронике. Физматлит, М. (2010). 160 с.
- [2] V.Ya. Shur. *Ferroelectrics* **340**, 3 (2006).
- [3] R.S. Cudney, V. Garcés-Chavez, P. Negrete-Regagnon. *Opt. Lett.* **22**, 439 (1997).
- [4] S. Kawai, T. Ogawa, H. Lee, R. De Matthey, R. Feiglson. *Appl. Phys. Lett.* **73**, 768 (1998).
- [5] Д.В. Исаков, Т.Р. Волк, Л.И. Ивлева. *ФТТ* **51**, 2199 (2009).
- [6] U. Voelker, K. Betzler. *Phys. Rev. B* **74**, 132 104 (2006).
- [7] А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин. *ФТТ* **50**, 1068 (2008).
- [8] Х.Г. Богданова, А.Р. Булатов, В.А. Голенищев-Кутузов, А.А. Потапов, А.Е. Усачев. *Изв. РАН. Сер. физ.* **73**, 1080 (2009).
- [9] F. Jonsson, C. Flytzanis. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 063 902 (2006).
- [10] D.I. Khomskii, K.I. Kugel. *Phys. Rev. B* **67**, 134 401 (2003).
- [11] Е.А. Туров, В.В. Николаев. *УФН* **175**, 547 (2005).