

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

УДК 621.315.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЛАТЕРАЛЬНОГО ПЬЕЗОУТКЛИКА В Y–СРЕЗЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2012 г. А. С. Быков, Д. А. Киселев, В. В. Антипов,
М. Д. Малинкович, Ю. Н. Пархоменко
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

В режиме силовой микроскопии пьезоотклика исследована угловая зависимость латеральной составляющей пьезоотклика в монокристаллах ниобата лития Y–среза, содержащих регулярную доменную структуру. Показано, что визуализация доменной структуры определяется ориентацией X–направления кристалла относительно направления сканирования: наибольший контраст между доменами с противоположной ориентацией векторов поляризации имеет место при расположении вдоль одной прямой X–направления и направления сканирования.

Ключевые слова: ниобат лития, монокристаллы, силовая микроскопия пьезоотклика, пьезокоэффициенты.

Введение

Сегнетоэлектрические материалы, в том числе монокристаллы ниобата лития, широко используют в оптических системах, например в качестве удвоителей частоты и электрооптических затворов [1]. Удвоение частоты и управление лазерным излучением обусловлено наличием в сегнетоэлектрических материалах периодической или упорядоченной доменной структуры. Доменные структуры для разных применений могут иметь разные размеры и разный период — от нескольких нанометров до сотен микрометров. Очевидно, что рабочие характеристики устройств сильно зависят от параметров и качества доменной структуры. Поэтому актуальным является вопрос характеристики как макро-, так и микродоменной структуры.

К наиболее эффективным методам визуализации доменной структуры относится силовая микроскопия пьезоотклика (СМП), в том числе в латеральной моде [2]. В последнее время СМП стала стандартным методом исследова-

ния сегнетоэлектрических доменов, главным образом из-за своей простоты и высокого пространственного разрешения (до 20 нм [3, 4]).

В этом методе визуализация доменов основана на том, что при приложении при помощи проводящего зонда переменного потенциала к поверхности образца в нем, вследствие пьезоэффекта, генерируются продольные, поперечные и сдвиговые волны, которые вызывают колебания кантилевера, находящегося в контакте с поверхностью. Эти колебания, регистрируемые оптической системой атомно-силового микроскопа, несут информацию об ориентации оси Z и направлении поляризации доменов.

В выполненной ранее работе [2] продемонстрирована возможность применения СМП–методики для визуализации и исследования доменных границ в образцах кристаллов ниобата лития с регулярной доменной структурой. Установлено, что для кристаллов Z–среза различие контраста соседних доменов связано с противоположным направлением в них векторов спонтанной поляризации, а в случае Y–среза по

фазовому контрасту латеральных колебаний можно определить знак заряда доменных границ.

Ниже представлены результаты исследований по визуализации доменной структуры в образцах монокристаллов ниобата лития Y-среза СМП-методом в латеральной моде в зависимости от угла между линией междоменной границы и направлением сканирования кантилевера. Данные, полученные таким методом, позволят определить как знак заряда междоменной границы, так и направление оптической оси в плоскости Y-среза.

Экспериментальная часть

Объектами исследований являлись образцы монокристаллов ниобата лития Y-среза, содержащие регулярную доменную структуру, сформированную методом послеростовой термоэлектрической обработки [5]. Образцы ниобата лития представляли собой полированные пластины толщиной 200 мкм. Работу проводили на зондовой нанолaborатории NTEGRA Prima (НТ-МДТ, Москва) в режиме латеральной моды СМП при приложении переменного напряжения

$U_{AC} = 10$ В с частотой $f = 150$ кГц. Для исследования топографии поверхности и визуализации доменной структуры использовали кремниевые кантилеверы NSG10/Pt (НТ-МДТ, Москва) с платиновым проводящим покрытием. Все исследования проводили при комнатной температуре.

Для исследования угловой зависимости пьезоотклика в латеральной моде модернизировали установку, дополнив ее поворотным столиком, на котором крепился образец. Контраст измеряли в зависимости от угла между направлением сканирования и линией междоменной границы.

Результаты и их обсуждение

Регулярные доменные структуры (РДС), сформированные в Y-срезах кристалла $LiNbO_3$ методом послеростовой термоэлектрической обработки вблизи температуры Кюри $T_K = 1140$ °С [5, 6], могут различаться взаимной ориентацией векторов спонтанной поляризации P_s в соседних доменах, что приводит к изменению структуры доменных границ. Вектора P_s могут быть антипараллельными и параллельными

доменной границе ($k \perp P_s$, где k — вектор пространственной периодичности [5] (рис 1, а), встречными и нормальными к доменной границе ($k \parallel P_s$, рис. 2, а) или иметь промежуточную ориентацию, при этом заряд междоменной границы будет иметь разные знаки и разное абсолютное значение.

На рис. 1, а показана схема поворота образца с регулярной доменной структурой, в которой междоменные границы параллельны вектору поляризации. В эксперименте образец поворачивали таким образом, чтобы угол между направлением сканирования и линией междоменной границы менялся от -90° до $+90^\circ$ с шагом 45° . На рис. 1, б представлены полученные при этом изображения доменной структуры в латеральной моде СМП. На рис. 3 представлена угловая зависимость пьезоотклика среднего домена (рис. 1, б). Из рис. 3 видно, что наряду с изменением пьезоотклика, абсолютное значение которого достигает максимума при $\alpha = \pm 90^\circ$, меняется его знак.

При расположении междоменной границы перпендикулярно к вектору поляризации получены следующие результаты (см. рис. 2). Максимальный контраст в

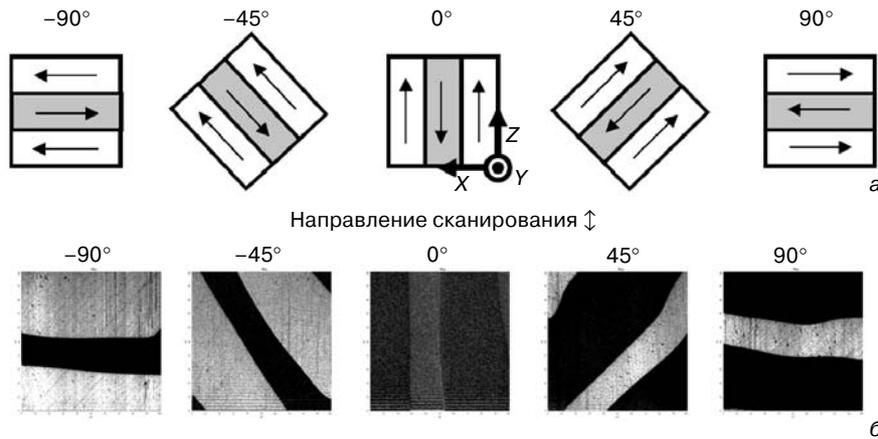


Рис. 1. Схематические изображения конфигурации доменов при повороте образца (а) и соответствующие латеральные компоненты пьезоотклика кристалла ниобата лития с РДС (б) в зависимости от угла поворота образца относительно направления сканирования. Размер изображений 100×100 мкм²

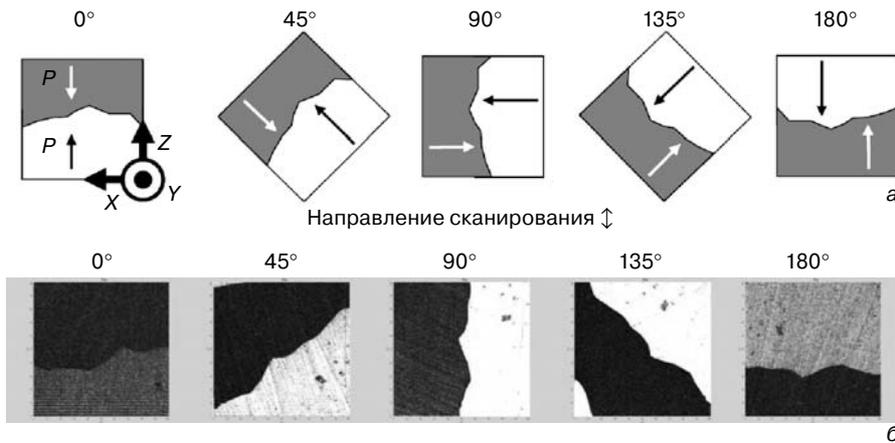


Рис. 2. Схематическое изображение конфигурации доменов при повороте образца (а) и латеральная компонента пьезоотклика (б) кристалла $LiNbO_3$ Y-среза. Размер изображений 100×100 мкм²

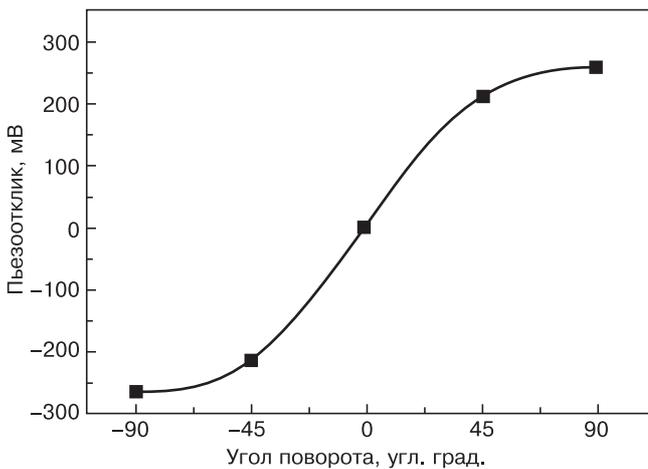


Рис. 3. Зависимость амплитуды латерального сигнала пьезоотклика при повороте образца

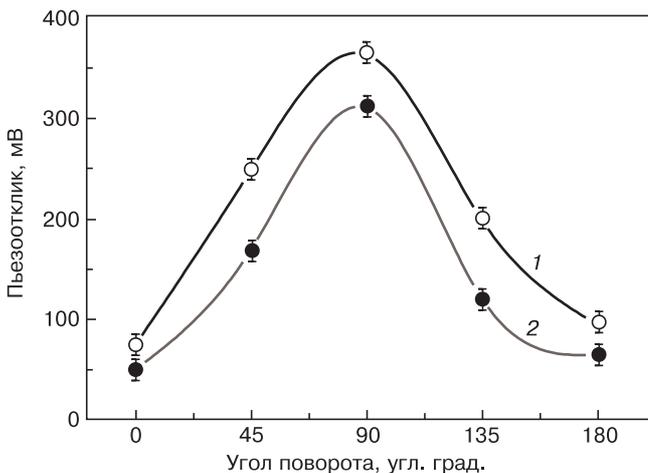


Рис. 4. Зависимость амплитуды латерального сигнала пьезоотклика при повороте образца для «положительного» (1) и «отрицательного» (2) домена

изображении доменов в режиме пьезоотклика имеет место, в отличие от предыдущего случая при совпадении направления сканирования и линии междоменной границы; знак доменов, также, в отличие от предыдущего случая, не меняется на противоположный при повороте образца на 180° (рис. 4), изменяются лишь амплитуды сигналов от положительного и отрицательного доменов, которые принимают максимальные значения при сканировании вдоль линии границы.

Обратный пьезоэлектрический эффект является физической причиной пьезоотклика, значение и знак которого при приложении к поверхности кристалла переменного электрического поля определяются, очевидно, выражением

$$\varepsilon_j(\omega t) = d_{ij}E_i(\omega t), \quad (1)$$

где ε_j — компонента относительной упругой деформации; d_{ij} — пьезоэлектрический модуль; $E_i(\omega t)$ — компонента вектора напряженности электрического поля.

Из этого выражения следует, что знак и значение пьезоотклика ε_j определяются знаком модуля d_{ij} ,

который зависит от ориентации вектора поляризации \mathbf{P}_s относительно Z -направления кристалла, его значением, а также кристаллографической ориентацией образца относительно направления регистрируемой деформации (т. е. направления сканирования).

Если считать, что вектор напряженности электрического поля, которое создает проводящий зонд, находящийся в контакте с поверхностью образца, в объеме кристалла перпендикулярен к поверхности, т. е. ориентирован по Y , то рабочим модулем, создающим деформацию в направлении сканирования, является только d_{21} , который стремится к нулю при повороте в плоскости $X-Z$ к оси Z (точечная группа ниобата лития $3m$, модули для нее см. в работе [7]). Следует отметить, что сдвиговая деформация при приложении поля по оси Y возможна только в плоскости $Y-Z$, т. е. перпендикулярно к поверхности образца. Поэтому на латеральную составляющую пьезоотклика она не влияет. Следовательно, регистрируемые колебания являются продольными с параллельным поверхности образца волновым вектором. Таким образом, максимальные значения латерального пьезоотклика должны наблюдаться в том случае, когда X -направление кристалла и направление сканирования расположены вдоль одной прямой, причем частотная зависимость деформации находится в фазе с вектором E_2 (регистрируется как светлая область образца, см. рис. 1, б и 2, б), если вектор \mathbf{X} направлен вниз, считая, что положительное направление сканирования — вверх (см. рис. 1, а и 2, а), так как модуль d_{21} — отрицательный [7]. Эта модель объясняет изменение знака пьезоотклика при вращении образца в случае ориентации вектора поляризации параллельно междоменной границе и отсутствия такого изменения при перпендикулярном расположении.

Остаточный междоменный контраст, который не должен наблюдаться при перпендикулярном направлении оси X кристалла к направлению сканирования вследствие нулевого значения модуля d_{23} , объясняется наличием некоторой доли составляющей вектора электрического поля по другим, кроме Y , направлениям вследствие того, что контакт зонда с поверхностью можно считать почти точечным.

Заключение

На основании результатов исследования зависимости латеральной составляющей пьезоотклика на Y -срезе монокристаллов ниобата лития выявлены закономерности, имеющие важное методическое значение. Показано, что с помощью измерения угловой зависимости пьезоотклика можно определить кристаллографические направления и ориентацию междоменной границы относительно оптической оси кристалла. По установленной ориентации векторов поляризации относительно междоменной границы легко определить ее знак. Подход, предложенный

в настоящей работе, может быть распространен на другие срезы кристалла для идентификации доменной структуры как макроскопических, так и микрометровых размеров.

Библиографический список

1. Блистанов, А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики / А. А. Блистанов // М.: МИСИС, 2000. – 432 с.
2. Киселев, Д. А. Исследование доменной структуры в монокристаллах LiNbO_3 методом силовой микроскопии пьезоотклика / Д. А. Киселев, А. С. Быков, Р. Н. Жуков, В. В. Антипов, М. Д. Малинкович, Ю. Н. Пархоменко // Кристаллография. – 2012. – Т. 57, № 6. – С. 876.
3. Jungk, T. Contrast mechanisms for the detection of ferroelectric domains with scanning force microscopy / T. Jungk,

A. Hoffmann, E. Soergel // New J. Physics. – 2009. – N 11. – P. 033029.

4. Жуков, Р. Н. Распространение поляризации сегнетоэлектрических зерен в электрически изолированных пленках ниобата лития / Р. Н. Жуков, Д. А. Киселев, М. Д. Малинкович, Ю. Н. Пархоменко, Е. А. Выговская, О. В. Торопова // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2011. – № 4. – С. 12.

5. Sorokin, N. G. The regular domain structure in LiNbO_3 and LiTaO_3 / N. G. Sorokin, V. V. Antipov, A. A. Blistanov // Ferroelectrics. – 1995. – V. 167. – P. 267.

6. Antipov, V. V. Formation of bidomain structure in lithium niobate single crystals by electrothermal method / V. V. Antipov, A. S. Bykov, M. D. Malinkovich, Y. N. Parkhomenko // Ferroelectrics. – 2008. – V. 374. – P. 65.

7. Най Дж. Физические свойства кристаллов // Дж. Най – М.: Мир, 1967. – 385 с.

Работа выполнена в рамках проекта «Развитие кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» (госконтракт №13.G36.31.0004) и при финансовой поддержке Минобрнауки России на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» на базе НИТУ «МИСиС».

УДК 535.312:548.7

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2012 г. Д. В. Рощупкин, Д. В. Иржак, Е. В. Емелин, Р. Р. Фахртдинов, О. А. Бузанов*, С. А. Сахаров*
ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН»,
*ОАО «ФОМОС Материалс»

Введение

Развитие современной акустоэлектроники связано с поиском новых перспективных пьезоэлектрических кристаллов, которые обладают хорошими термическими свойствами и имеют высокие значения пьезоэлектрических констант. В последнее десятилетие активно ведется поиск новых пьезоэлектрических материалов из группы лантангаллиевого силиката (лангасита). Кристаллы этой группы обладают точечной группой симметрии 32, как и кристалл пьезокварца SiO_2 , и хорошей термостабильностью [1–4]. Значения коэффициентов электро-механической связи кристаллов этой группы уступают кристаллам LiNbO_3 , но превышают соответствующие значения для кристаллов кварца в несколько раз. Ранее авторами детально были исследованы

акустические свойства кристаллов лангасита $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (ЛГС) [5–7] и лантангаллиевого танталата (лангатата) $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ (ЛГТ) [8], которые сегодня являются базовыми материалами при создании высокотемпературных датчиков на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Следует отметить, что интерес к кристаллам группы ЛГС также связан с отсутствием в этих кристаллах фазовых переходов, вплоть до температуры плавления.

В группе кристаллов ЛГС потенциально могут быть синтезированы более 250 кристаллов. Это не только четырехкомпонентные кристаллы ЛГС и ЛГТ, но и пятикомпонентные кристаллы $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,3}\text{Al}_{0,2}\text{O}_{14}$ (ЛГТА) и $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (КТГС).

Ниже представлены примеры синтеза пятикомпонентного кристалла группы ЛГС методом Чохральского и последующего исследо-

Представлены результаты исследования многокомпонентных пьезоэлектрических кристаллов группы лантангаллиевого силиката (лангасита). Изучены процессы синтеза и структура кристаллов. С использованием методов рентгеновской топографии и дифрактометрии исследованы акустические свойства кристаллов. Продемонстрирована возможность применения этих пьезоэлектрических кристаллов в высокотемпературных сенсорных устройствах на поверхностных акустических волнах.

Ключевые слова: пьезоэлектрические кристаллы, поверхностные акустические волны, объемные акустические волны, рентгеновская топография, рентгеновская дифрактометрия.