

06,07

Неоднородная деформация монокристалла KTaO_3 вследствие обратного флексоэлектрического эффекта

© Е.Д. Обозова, П.П. Сырников, В.Г. Залесский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nsh@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 7 ноября 2017 г.)

В тонких монокристаллических пластинах KTaO_3 с помощью интерферометрического метода исследована неоднородная деформация, индуцированная внешним электрическим полем.

DOI: 10.21883/FTT.2018.05.45791.312

1. Введение

Флексоэлектрический эффект относится к электро-механическим эффектам в конденсированных средах и в значительной степени проявляется в кристаллах и пленках субмикронного и наноскопического размера, что является актуальным для разработки элементов интегральной электроники и микроэлектромеханических систем [1,2]. По аналогии с пьезоэффектом прямой флексоэлектрический эффект определяется как полярный отклик на градиент деформации, а при обратном эффекте неоднородная деформация является следствием поляризации внешним электрическим полем диэлектрической среды [1].

Впервые неоднородная деформация, индуцированная электрическим полем была обнаружена в тонких монокристаллических пластинах BaTiO_3 [3,4]. В этих и последующих работах деформацию в виде цилиндрического изгиба (cantilever bending) наблюдали при жестком креплении одной из их кромок пластин или пленок к неподвижному основанию, при этом другие части оставались свободными для изгиба по цилиндрической поверхности. Очевидно, что в результате цилиндрического изгиба симметрия исходно кубического кристалла со структурой перовскита должна понижаться с $m\bar{3}m$ до $mm2$. Однако, согласно [3], смещение ионов под действием внешнего поля должно вызывать искажение элементарной ячейки из кубической ($m\bar{3}m$) в ячейку в виде усеченной пирамиды с симметрией $4mm$. В таком случае, для протяженного кристалла должен наблюдаться другой вид неоднородной деформации — сферический изгиб. В большинстве работ исследовались два типа индуцированной деформации: цилиндрический изгиб и деформация неоднородного сжатия кристаллов [3–6]. Поэтому основной задачей серии работ по исследованию обратного флексоэлектрического эффекта в исходно кубических перовскитах является установление в них вида неоднородной деформации (деформация кручения, цилиндрический и сферический изгиб).

В предыдущей работе [7] уже сообщалось об обнаружении индуцированной деформации сферического изгиба тонкой монокристаллической пластины SrTiO_3 . Этот материал обладает достаточно большой величиной диэлектрической проницаемости, что благоприятно для исследования флексоэлектричества. Кроме того, кубическая симметрия SrTiO_3 сводит к минимуму вклад пьезоэффекта в общую деформацию кристалла. Однако монокристаллы SrTiO_3 известны своими структурными неоднородностями и появлением объемного заряда при приложении внешнего поля [8], что усложняет изучение обратного флексоэлектрического эффекта. В настоящей работе исследования продолжены на родственных титанату стронция монокристаллах KTaO_3 , которые также обладают достаточно большой величиной диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 150$ при $T = 300$ К).

2. Эксперимент

Монокристаллы KTaO_3 были выращены из раствора-расплава методом спонтанной кристаллизации из исходных компонентов Ta_2O_5 и K_2CO_3 . Качество и ориентация кристаллографических направлений выращенных кристаллов контролировалось методом рентгеноструктурного анализа. Из кристаллов вырезались пластины, площадь поверхности (001) которых составляла 11×11 мм, а толщина — $140 \mu\text{m}$. На отполированную до оптического качества поверхность пластин методом термического напыления наносились серебряные электроды диаметром 4.5 мм и толщиной $0.25 \mu\text{m}$, которые также служили зеркалами. Края образцов приклеивались к неподвижному круглому контуру диаметром 8 мм (рис. 1, а). К электродам прикладывалось напряжение до $U = 150$ В ($E = 11$ кВ/см) в виде импульсов треугольной формы разной полярности.

Деформация поверхности зеркального электрода исследовалась с помощью интерферометрического микроскопа Линника–Майкельсона (см. рис. 1, а, детали метода описаны в [9]). В приборе источником света

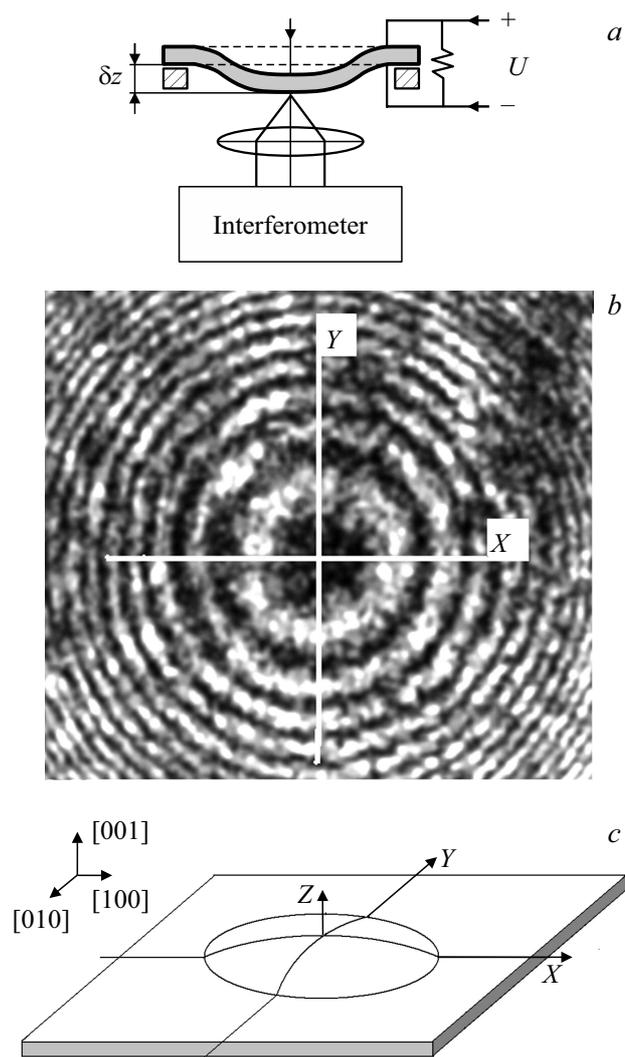


Рис. 1. (a) — схема интерферометрической установки для исследования индуцированной внешним полем деформации. (b) — микрофотография интерференционных колец. (c) — направления сканирования деформированной поверхности монокристаллической пластинки KTaO_3 .

служил He-Ne лазер ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$), а на выходе была установлена CCD-камера. Поле зрения микроскопа составляло 1 mm. Полученные изображения поверхности зеркала-электрода в виде интерференционных колец (рис. 1, b) анализировались методом „блнк-компарции“, с помощью которого сравнивались пары снимков интерференционных картин до и после деформации. Метод позволял оценивать прогиб деформируемой поверхности по смещению интерференционных максимумов (минимумов) с точностью до 0.01 длины волны по следующей формуле [9]

$$\delta z = \frac{1}{2} \frac{(R_1^2 - R_0^2)}{2\lambda}, \quad (1)$$

где R_0 и R_1 — радиусы интерференционных колец до и после деформации поверхности. Радиусы интерферен-

ционных колец одновременно измерялись в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y (рис. 1, b). Направления X и Y были привязаны к кристаллографическим направлениям [100] и [010] соответственно. Разница обоих радиусов позволяла оценивать астигматизм оптической системы, обусловленный нарушением осевой симметрии зеркальной поверхности электрода. Для каждого из направлений с помощью формулы (1) отдельно рассчитывалась величина прогиба поверхности δz_x и δz_y . Интерферометрический микроскоп также обеспечивал сканирование всей поверхности кристалла, что давало возможность непосредственно оценивать ее профиль (рис. 1, c).

3. Результаты

На начальном этапе проводились измерения прогиба центральной области поверхности кристалла. Импульс положительной полярности на зеркальном электроде вызывает сужение интерференционных колец от периферии к центру поля зрения. Изменение знака полярности, наоборот, приводит к их разбеганию. На рис. 2 показаны временные зависимости величин прогиба поверхности δz_x и δz_y , рассчитанные с помощью формулы (1) по данным наблюдения за движением колец в двух направлениях X и Y после подачи на электроды треугольных импульсов сначала положительной, затем отрицательной полярности. При увеличении положительного напряжения, начиная с порогового значения $U_{th} = 60 \text{ V}$ ($E_{th} = 4 \text{ kV/cm}$) наблюдается почти одинаковый рост обеих величин δz_x и δz_y . Снижение напряжения сопровождается уменьшением δz_x и δz_y , при этом становятся заметными некоторая разница обеих величин и остаточная деформация. Деформационный отклик на

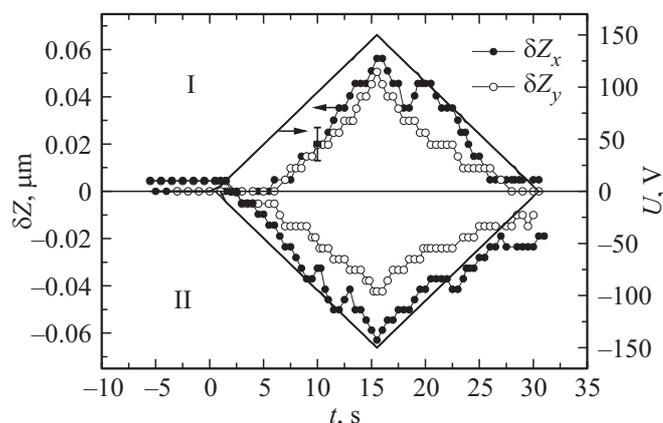


Рис. 2. Временная зависимость деформации в центре поверхности кристалла, как отклик на последовательность треугольных импульсов внешнего электрического поля, сначала положительной полярности (I), затем отрицательной полярности (II). Черные кружки — величина прогиба, полученная по движению колец в направлении X (см. рис. 1, b); белые — в направлении Y.

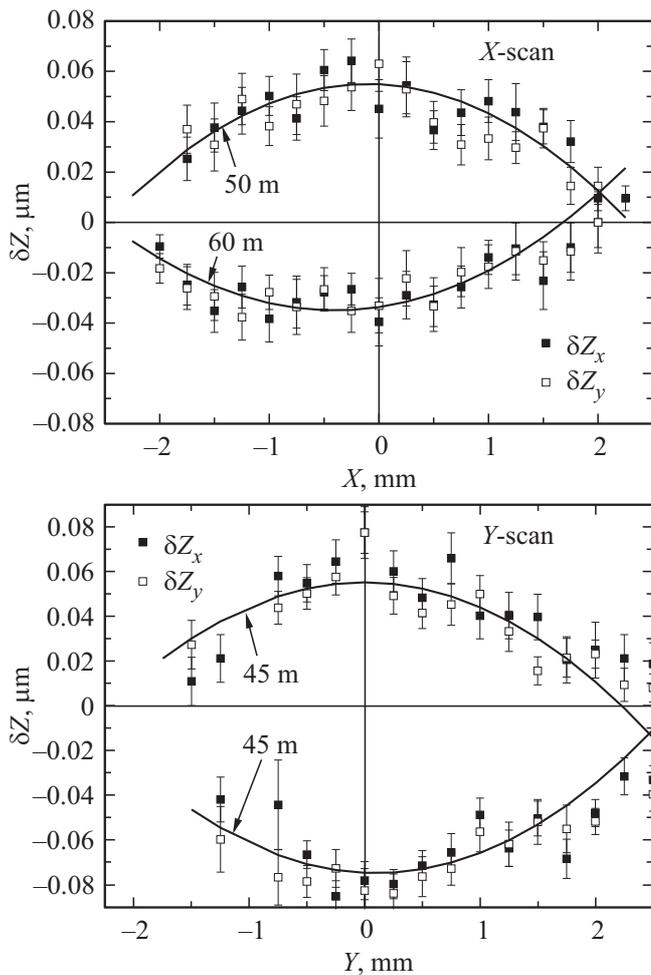


Рис. 3. Профили деформированной поверхности при сканировании в направлениях X и Y (см. рис. 1, c) в поле $U = 150 \text{ V}$ ($E = 11 \text{ kV/cm}$). Показаны линии для оценки радиуса кривизны изгиба поверхности.

отрицательный треугольный импульс сопровождается более низким значением порогового поля $U_{th} = 15 \text{ V}$ ($E_{th} = 1 \text{ kV/cm}$), большей разницей обеих величин и большей величиной остаточной деформации.

Во второй части эксперимента, при сканировании поверхности пластин получены профили деформированной поверхности вдоль направлений $X \parallel [100]$ и $Y \parallel [010]$ (см. рис. 1, b) (рис. 3). Каждая точка на графиках соответствует величине максимального прогиба в точке с координатами x и y на поверхности пластины при максимальном значении треугольного импульса $U = 150 \text{ V}$ ($E = 11 \text{ kV/cm}$). На полученных профилях, несмотря на некоторый разброс точек $\delta z(x)$ и $\delta z(y)$, видно, что прогиб возрастает от периферии зеркального электрода к его центру, как вдоль X -, так и вдоль Y -направлений. На рисунках также можно отметить некоторую асимметрию профилей изгибов, которые, по-видимому, связаны с неоднородностью кристалла и неоднородностью поля на границах электрода.

4. Обсуждение результатов

В тонких пластинах KTaO_3 наблюдается такой же характерный изгиб вогнутой поверхностью к положительно заряженному электроду, как и в случае обратного флексоэлектрического эффекта в BaTiO_3 и SrTiO_3 [3,6,7]. На рис. 2 видно, что на временной зависимости величины деформации δz_x и δz_y ведут себя примерно одинаково, откуда следует, что деформируемая поверхность почти не меняет осевую симметрию оптической системы. Последнее предполагает деформацию сферического изгиба. Что касается гистерезиса и некоторой разницы в величинах δz_x и δz_y , то эти явления обусловлены релаксацией деформации. Согласно дополнительно проведенным экспериментам, причиной механической релаксации в KTaO_3 и SrTiO_3 является диэлектрическая релаксация, обусловленная объемным зарядом. Результаты этого исследования будут представлены в ближайшей публикации.

Окончательно вид неоднородной деформации может быть определен по характеру профилей $\delta z(x)$ и $\delta z(y)$, полученных по данным сканирования поверхности кристалла в X - и Y -направлениях (рис. 3). Линии окружности, проведенной около экспериментальных точек на графиках, позволяют оценить приблизительные радиусы изгиба. В случае сканирования в направлении X для положительной и отрицательной полярностей радиусы изгиба соответствуют 50 и 60 м, а в направлении Y обе полярности дают примерно одинаковые радиусы порядка 45 м. Поскольку радиусы для двух взаимно перпендикулярных направлений отличаются не более чем на 10% (при положительной полярности) и 30% (при отрицательной), то вид полученной неоднородной деформации можно определить как изгиб близкий сферическому.

Некоторый разброс точек на зависимостях $\delta z(x)$ и $\delta z(y)$, по-видимому, обусловлен неоднородностями структуры в приповерхностной области KTaO_3 , поскольку именно приповерхностные состояния определяют обратный флексоэлектрический эффект [1]. Однако этот разброс выражен в меньшей степени, чем в SrTiO_3 , что делает исследуемый материал более привлекательным для последующих флексоэлектрических измерений.

5. Заключение

С помощью интерференционного метода исследован обратный флексоэлектрический эффект в монокристалле KTaO_3 . Полученные данные, свидетельствующие о деформации типа сферического изгиба, означают, что обратный флексоэлектрический эффект в KTaO_3 сопровождается искажением элементарной ячейки из кубической $m3m$ в ячейку в виде усеченной пирамиды с симметрией $4mm$.

Авторы благодарят С.Г. Лушникову и А.С. Юркова за консультацию.

Список литературы

- [1] P. Zubko, G. Catalan, A. Tagantsev. *Ann. Rev. Mater. Res.* **43**, 387 (2013).
- [2] U. Bhaskar, N. Banerjee, A. Abdollahi, Zhe Wang, D. Schlom, G. Rijnders, G. Catalan. *Nature Nanotechnology* **11**, 263 (2016).
- [3] Э.В. Бурсиан, О.И. Зайковский. *ФТТ* **10**, 1413 (1968).
- [4] Э.В. Бурсиан, Н.Н. Трунов. *ФТТ* **16**, 1187 (1974).
- [5] J.Y. Fu, Wenyi Zhu, Nan Li, L.E. Cross. *J. Appl. Phys.* **100**, 024112 (2006).
- [6] Е.Д. Румянцева, В.Г. Залесский. *ФТТ* **56**, 1301 (2014).
- [7] Е.Д. Обозова, В.Г. Залесский. *Письма ЖЭТФ* **103**, 792 (2016).
- [8] K. Szot, W. Speier, G. Bihlmayer, R. Waser. *Nature Mater.* **5**, 312 (2006).
- [9] Е.Д. Румянцева, В.Г. Залесский. *ФТТ* **58**, 671 (2016).