

# Неоднородная деформация монокристалла $\text{SrTiO}_3$ вследствие обратного флексоэлектрического эффекта

Е. Д. Обозова<sup>1)</sup>, В. Г. Залесский

Физико-технический институт им. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 18 апреля 2016 г.

С помощью интерферометрического метода в тонких монокристаллических пластинах  $\text{SrTiO}_3$  исследована неоднородная деформация, индуцированная внешним электрическим полем.

DOI: 10.7868/S0370274X16110072

**Введение.** В последнее десятилетие наблюдается значительный рост интереса к исследованию флексоэлектрического эффекта, который отвечает за взаимную связь между неоднородной деформацией и поляризацией диэлектрического кристалла (см. обзор [1]). Интерес обусловлен тем, что роль этого эффекта значительно возрастает в кристаллах и пленках субмикронного и наноскопического размера, что является актуальным для интегральной электроники и разработки микроэлектромеханических систем [1, 2]. Прямой флексоэлектрический эффект представляет собой полярный отклик на градиент деформации. Менее изучен обратный флексоэлектрический эффект, при котором поляризация внешним электрическим полем вызывает неоднородную деформацию [1].

В первых работах по изучению обратного эффекта в монокристаллических пластинах и пленках  $\text{BaTiO}_3$  исследовалась деформация цилиндрического изгиба (*cantilever bending*) [3, 4]. Такого рода деформация проявляется в тонкой прямоугольной пластине при жестком закреплении одной из ее кромок, оставляя другие части пластины свободными для изгиба по цилиндрической поверхности. В случае кубического кристалла со структурой перовскита с симметрией  $m3m$ , цилиндрический изгиб понижает симметрию до  $mm2$ . Однако, в работе [3] утверждается, что обратный флексоэлектрический эффект должен сопровождаться искажением элементарной ячейки из изначально кубической ( $m3m$ ) в ячейку в виде усеченной пирамиды с симметрией  $4mm$ . Для протяженного кристалла такая геометрия должна приводить к другому виду неоднородной деформации – деформации сферического изгиба. Напомним, что сферический изгиб наблюдают в тонких пластинах или мембранах, закрепленных по краям к неподвижно-

му круговому контуру. При этом центральная часть поверхности изгибается под действием однородного механического напряжения и изогнутая поверхность представляет собой поверхность вращения. Почти во всех исследованиях обратного эффекта рассматривается только деформации цилиндрического изгиба и неоднородного сжатия кристаллов [3–6]. Поэтому в настоящей работе основной задачей является установление вида неоднородной деформации (деформация кручения, цилиндрический и сферический изгиб) при обратном флексоэлектрическом эффекте в монокристалле  $\text{SrTiO}_3$ . Этот материал рассматривается в качестве модельного, поскольку является центросимметричным ( $m3m$ ), что сводит к минимуму влияние пьезоэффекта. С другой стороны,  $\text{SrTiO}_3$  обладает достаточно большой величиной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon \approx 300$  при  $T = 300$  К), что благоприятно для исследования флексоэлектричества.

**Эксперимент.** Для исследования индуцированной электрическим полем деформации были использованы пластины монокристалла  $\text{SrTiO}_3$  оптического качества, толщиной 143 мкм и площадью  $11 \times 11$  мм<sup>2</sup>. На поверхность (001) образца методом термического напыления наносились серебряные электроды диаметром 7 мм и толщиной 0.25 мкм, которые также служили зеркалами. Края образца приклеивались к неподвижному круглому контуру диаметром 8 мм (рис. 1а). К электродам прикладывалось напряжение до  $\pm 750$  В ( $E = \pm 55$  кВ/см) в виде импульсов треугольной формы.

Деформация поверхности зеркального электрода исследовалась с помощью оптического микроскопа-интерферометра Линника–Майкельсона (см. рис. 1а, детали метода описаны в [7]). В микроскопе-интерферометре источником света служил He–Ne лазер с  $\lambda = 0.633$  нм, а на выходе окуляра была установлена ССD-камера. Поле зрения микроскопа составляло 1 мм. Полученные изображения поверх-

<sup>1)</sup>e-mail: nsh@mail.ioffe.ru

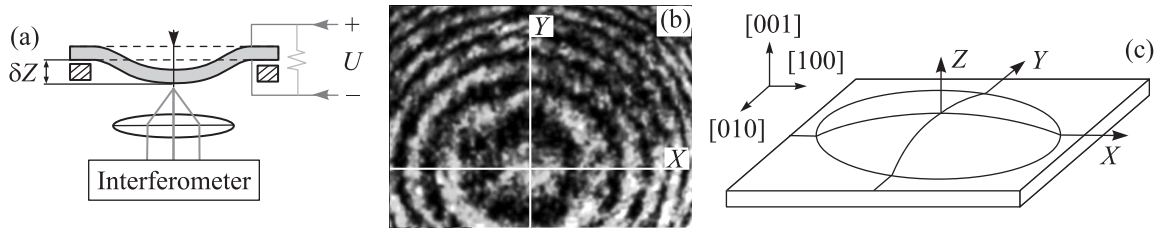


Рис. 1. (a) — Схема интерферометрической установки для исследования индуцированной деформации. (b) — Микрофотография интерференционных колец. (c) — Направления сканирования деформированной поверхности монокристаллической пластинки SrTiO<sub>3</sub>

ности электрода-зеркала в виде интерференционных колец (рис. 1b) анализировались с помощью компьютерной программы “блинк-компаратор”, основанной на методе сравнения двух снимков интерференционных картин, попеременно накладываемых друг на друга. Метод позволял оценивать прогиб деформируемой поверхности по смещению интерференционных максимумов (минимумов) с точностью до 0.01 длины волны по следующей формуле:

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

где  $R_0$  и  $R_1$  — радиусы интерференционных колец до и после прогиба поверхности. При анализе изображений одновременно измерялись два диаметра интерференционных колец во взаимно перпендикулярных направлениях  $X$  и  $Y$  (рис. 1b). По разнице в величинах диаметров оценивался астигматизм оптической системы, который определяется нарушением осевой симметрии деформируемого зеркального электрода. Ранее, в работе [7] этот метод позволил различить цилиндрическую и сферическую деформацию изгиба поверхности тонких пластин ВаTiO<sub>3</sub>.

Микроскоп – интерферометр также обеспечивал сканирование всей поверхности кристалла вдоль направлений  $X$  и  $Y$ , что давало возможность непосредственно оценивать профиль неоднородной деформации в виде функции  $\delta z(x, y)$  (рис. 1c).

**Результаты.** На начальном этапе исследовался прогиб центральной области поверхности кристалла. Оказалось, что импульс положительной полярности, поданный на зеркальный электрод, вызывает сужение интерференционных колец от периферии к центру поля зрения. Изменение знака полярности, наоборот, приводит к их разбеганию. На рис. 2 показаны временные зависимости прогиба поверхности  $\delta z_x$  и  $\delta z_y$ , рассчитанные с помощью формулы (1), по данным наблюдения за движением колец в двух направлениях  $X$  и  $Y$  во время подачи к электродам импульсов треугольной формы. На рисунке видно, что величины  $\delta z_x$  и  $\delta z_y$  ведут себя примерно одинаково. Сама

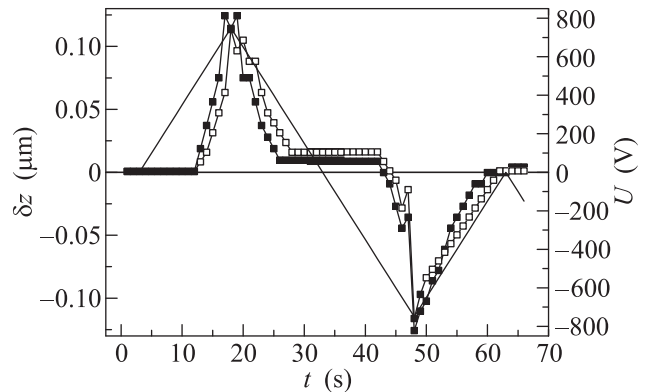


Рис. 2. Временная зависимость деформации в центре поверхности кристалла, как отклик на пилообразные импульсы внешнего электрического поля (светлые квадратики – деформация по оси  $x$ , темные квадратики – по оси  $y$ )

форма импульсов деформационного отклика отличается от треугольных импульсов внешнего поля и на ней имеются признаки, свидетельствующие о гистерезисе: при нарастании поля, начиная с пороговых полей 490 В ( $E_c = 35.5$  кВ/см), деформация возрастает резким скачком, а после снижения поля до нуля – наблюдается остаточная деформация.

Во второй части эксперимента, при сканировании вдоль направлений  $X$  и  $Y$  (см. рис. 1b) получены профили деформированной поверхности в виде зависимостей  $\delta z(x)$  и  $\delta z(y)$  (рис. 3). Все точки, показанные на графиках  $\delta z(x)$  и  $\delta z(y)$ , соответствуют максимальным локальным прогибам в момент, когда величина треугольного импульса достигала максимума, 750 В ( $E = 55$  кВ/см). На рисунках, несмотря на некоторый разброс точек видно, что индуцированная деформация 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 меньшие по величине локальные изгибы на гра-

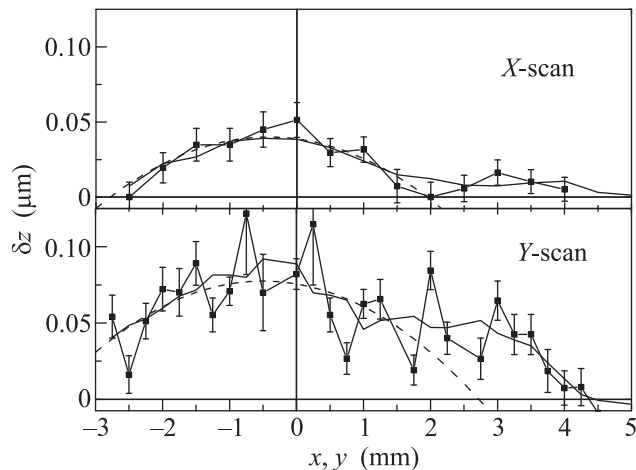


Рис. 3. Профили деформированной поверхности при сканировании в направлениях  $X$  и  $Y$  (см. рис. 1с) в поле 750 В ( $E = 55$  кВ/см). Сплошная линия – результат усреднения по 5 точкам. Пунктиром показана линия для оценки радиуса кривизны изгиба поверхности

ницах электрода, около которых электрическое поле становится неоднородным.

**Обсуждение результатов.** Одним из признаков обратного флексоэлектрического эффекта является нечетная зависимость неоднородной деформации от поля. В эксперименте всегда наблюдается изгиб вогнутой поверхностью к положительно заряженному электроду, что характерно для флексоэлектрического отклика в  $\text{BaTiO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$  [3, 6, 7]. Поскольку  $\text{SrTiO}_3$  является центросимметричным, то наблюдаемая деформация исследуемых кристаллов не может быть связана с пьезоэффектом, который также является нечетным в зависимости от поля. С другой стороны, квадратичный по полю эффект электрострикции действительно наблюдается в эксперименте. Приложение поля любой полярности вызывает сжатие кристалла, которое фиксируется как вклад, дающий незначительное сужение интерференционных колец. В итоге этот вклад проявляется в виде некоторой асимметрии, заметной на рис. 2, когда отрицательные величины деформации незначительно по величине превосходят положительные. Что касается гистерезиса неоднородной деформации в зависимости от поля, то его причиной является наличие диэлектрической релаксации в  $\text{SrTiO}_3$ , обусловленной объемным зарядом. Результаты этого исследования будут представлены в ближайшей публикации.

На рис. 2 видно, что величины деформации  $\delta z_x$  и  $\delta z_y$  ведут себя одинаково, откуда следует, что дефор-

мируемая поверхность не меняет осевую симметрию оптической системы. Последнее свидетельствует о сферической деформации изгиба. О том, что деформация является сферическим изгибом, также свидетельствует вид профилей  $\delta z(x)$  и  $\delta z(y)$  (рис. 3), которые получены по данным сканирования поверхности кристалла. На рис. 3 видно, что изгиб поверхности кристалла наблюдается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Некоторый разброс точек на зависимостях  $\delta z(x)$  и  $\delta z(y)$  обусловлен неоднородностями структуры в приповерхностной области  $\text{SrTiO}_3$  [8], при этом известно, что именно приповерхностные состояния определяют обратный флексоэлектрический эффект [1].

Радиусы изгиба можно оценить по параболической линии, проведенной около экспериментальных точек  $\delta z(x)$  и  $\delta z(y)$  на рис. 3. Приблизительные оценки радиусов изгиба в случае сканирования в направлении  $X$  и  $Y$  дают примерно одинаковые величины порядка 70 м, однако величины прогибов отличаются в 1.5–2 раза.

Полученные данные о деформации типа сферического изгиба означают, что обратный флексоэлектрический эффект в  $\text{SrTiO}_3$  сопровождается искажением элементарной ячейки из кубической  $m\bar{3}m$  в ячейку в виде усеченной пирамиды с симметрией 4 мм.

**Заключение.** Исследован обратный флексоэлектрический эффект в тонкой монокристаллической пластине  $\text{SrTiO}_3$ . С помощью интерференционного метода установлена индуцированная электрическим полем неоднородная деформация сферического изгиба. Авторы благодарят П.П. Сырникова за предоставленные кристаллы. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант # 14-12-00257.

1. P. Zubko, G. Catalan, and A. Tagantsev, *Annu. Rev. Mater. Res.* **43**, 387 (2013).
2. U. Bhaskar, N. Banerjee, A. Abdollahi, Zhe Wang, D. Schlom, G. Rijnders, and 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, W. Zhu, N. Li, and L. E. Cross, *J. Appl. Phys.* **100**, 024112 (2006).
6. Е. Д. Румянцева, В. Г. Залесский, *ФТТ* **56**, 1301 (2014).
7. Е. Д. Румянцева, В. Г. Залесский, *ФТТ* **58**, 671 (2016).
8. K. Szot, W. Speier, G. Bihlmayer, and R. Waser, *Nat. Mater.* **5**, 312 (2006).