

СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ТОНКИХ ПЛАСТИНКАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ И РОДСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2019 г. В. Г. Залесский^{a,*,**}, Е. Д. Обозова^a, А. Д. Полушина^a

^a Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*e-mail: nsh@mail.ioffe.ru

**e-mail: oed1990@gmail.com

Поступила в редакцию 03.04.2019 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 13.05.2019 г.

Предложен сканирующий интерферометрический метод исследования неоднородной деформации тонких пластин диэлектрических кристаллов под действием однородного электрического поля (обратный флексоэлектрический эффект). Показаны результаты применения метода для определения вида и величины неоднородной деформации (деформации сферического и цилиндрического изгибов) с точностью до 10 нм на примере монокристаллов сегнетоэлектриков и родственных материалов со структурой перовскита.

DOI: 10.1134/S003281621906017X

1. ВВЕДЕНИЕ

В основе флексоэлектрического эффекта (ф.э.) лежит взаимосвязь между неоднородной деформацией и полярным состоянием диэлектрика (см. обзор [1]). Этот электромеханический эффект по аналогии с пьезоэлектричеством может быть прямым и обратным. Прямой эффект представляет собой полярный отклик на градиент деформации кристалла или пленки. При обратном флексоэлектрическом эффекте (о.ф.э.) поляризация внешним электрическим полем индуцирует неоднородную деформацию.

Возросший в настоящее время интерес к этому явлению обусловлен тем, что флексоэлектричество существенно влияет на полярное и механическое состояния диэлектрических пленок и кристаллов субмикронного и наноскопического размера. Для практического применения в интегральной электронике и микроэлектромеханических системах наиболее перспективны сегнетоэлектрические материалы, в которых благодаря большой диэлектрической восприимчивости эффект достигает наибольших величин. Однако при достаточно развитой теоретической модели явления [1, 2] наблюдается известный дефицит экспериментальных данных, даже для модельных материалов, в числе которых известные сегнетоэлектрики со структурой перовскита. Более того, число работ по исследова-

нию обратного эффекта составляет лишь малую долю от всех работ, посвященных флексоэлектричеству [1].

В ранних экспериментальных работах [3, 4] исследовалась деформация цилиндрического изгиба под действием однородного внешнего электрического поля в тонких, толщиной 2–10 мкм, прямоугольных монокристаллических пластинах ВаTiO₃. Одна из кромок тонкой пластины жестко прикреплялась к неподвижному держателю так, чтобы не было препятствий для деформации изгиба остальной части образца. С помощью микроскопа наблюдали изгиб величиной в несколько микрон, что соответствовало радиусу кривизны примерно 20 м в поле 10 кВ/см. Аналогичные исследования проводились в монокристаллах SrTiO₃ в кубической фазе путем измерения угла отклонения луча лазера, отраженного от поверхности тонких пластин с толщинами от 100 до 350 мкм [5]. Радиусы кривизны изгибов достигали 30 м в поле порядка 50 кВ/см.

В работе [3] было высказано предположение, что в кристаллах со структурой перовскита эффект будет сопровождаться искажением элементарной ячейки с симметрией $4/m\bar{3}m$ в симметрию точечной группы $4mm$, т.е. изначально тетраэдрическая (или кубическая) ячейка должна преобразовываться в форму усеченной пирамиды. Такая

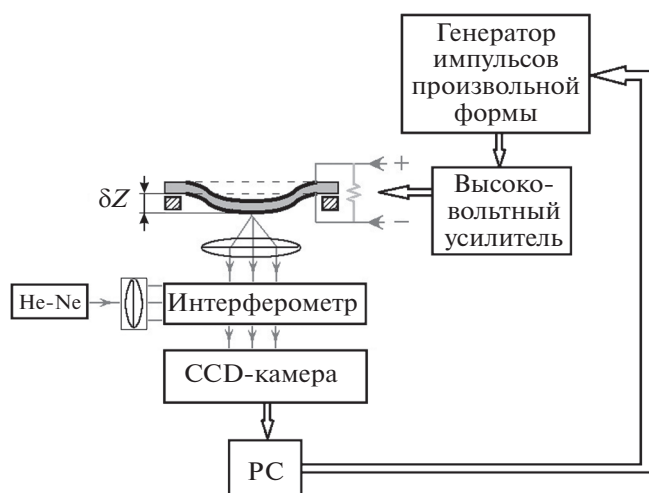


Рис. 1. Блок-схема установки.

геометрия кристаллической структуры будет приводить не к цилиндрическому, а к сферическому изгибу образца.

Почти во всех исследованиях ф.э. полагают, что присутствует деформация цилиндрического типа, а также деформация неоднородного сжатия [1–5]. В случае сферического изгиба у пластины, прикрепленной по краям к круговому неподвижному контуру, изгибается центральная часть поверхности под действием однородно распределенной нагрузки. При этом сама изогнутая поверхность представляет собой поверхность вращения. Обычно такого рода деформация наблюдается в мембране, закрепленной по неподвижному круговому основанию. В случае о.ф.э. неоднородная деформация такого типа может быть вызвана внутренним напряжением, связанным с упомянутым искажением кристаллической решетки под действием внешнего электрического поля.

Основная задача настоящей работы заключалась в разработке метода, позволяющего определить вид и величину индуцированной неоднородной деформации кручения, цилиндрического и сферического изгибов и исследовать их временные зависимости. Основываясь на данных по оценке прямых флексоэлектрических коэффициентов, приведенных в [1] для модельных кристаллов со структурой перовскита, метод должен обеспечивать измерения изгибов с точностью до 10 нм. Применение высоких напряжений предполагает исследования кристаллической поверхности бесконтактным способом. При решении этой задачи был выбран метод сканирования поверхности кристаллов, основанный на оптической интерферометрии.

Интерференционные методы без сканирования уже были использованы в работах по исследованию о.ф.э.-эффекта в жидких кристаллах [6]

и в керамическом образце трапециoidal) формы $\text{Ba}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{TiO}_3$ [7]. При этом вопрос о виде неоднородной деформации и о ее кинетике не ставился. Нами предложена установка и разработан метод, позволяющие детально изучить наиболее важные стороны о.ф.э.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА

Для реализации поставленных задач был использован интерференционный лазерный микроскоп, обеспечивающий сканирование поверхности кристаллов и видеосъемку интерференционных изображений локальных участков. Исследование проводилось с помощью модифицированного оптического интерферометра-микроскопа (по схеме Линника–Майкельсона) на основе серийного прибора ЛОМО МИИ-4, предназначенного для получения изображения микрогеометрии поверхности объектов (измерения толщин пленок и т.п.). В приборе заводской источник света был заменен на He-Ne-лазер ЛГН-208А ($P = 1.5$ мВт, $\lambda = 633$ нм) с расширителем лазерного луча на входе прибора, а на окуляре $15\times$ была закреплена CCD-камера, соединенная с компьютером (рис. 1).

В режиме микроскопа 1 пиксель на видеокадре размером 640×480 соответствовал 1.38 мкм. Камера предусматривала большее разрешение, 800×600 , при скорости 30 кадров в секунду. Для работы прибора в режиме микроскопа в состав оптической схемы входила собирающая линза-объектив (см. рис. 1). При наблюдении поверхности образца объектив обеспечивал поле зрения диаметром 1 мм. В режиме интерферометра эта же линза формировала сферическую предметную волну, которая после отражения от подвижной зеркальной поверхности исследуемого образца интерферировала с опорной волной, идущей от другого плеча интерферометра.

В качестве образцов использовались пластины из монокристаллов сегнетоэлектриков: перовскитов KTaO_3 (КТ), SrTiO_3 (СТ) в параэлектрической фазе и BaTiO_3 (ВТ) в сегнетофазе. Толщина образцов составляла 150 ± 10 мкм, диаметр 10 мм. Поверхность образцов была отполирована до оптического качества. На поверхность методом термического напыления наносились серебряные или золотые электроды диаметром 4.5 мм. Электроды также служили зеркалами. К электродам прикладывались импульсы треугольной формы амплитудой до 15 В (ВТ), 150 В (КТ) и 750 В (СТ) с периодом 100 с.

Края кристаллических пластин фиксировались эластичным нитроклеем по неподвижному круговому контуру диаметром 5 мм (см. рис. 1) для того, чтобы образцы были свободны от внешних механических напряжений, связанных с жестким креплением к неподвижному держателю. Наблюдение за

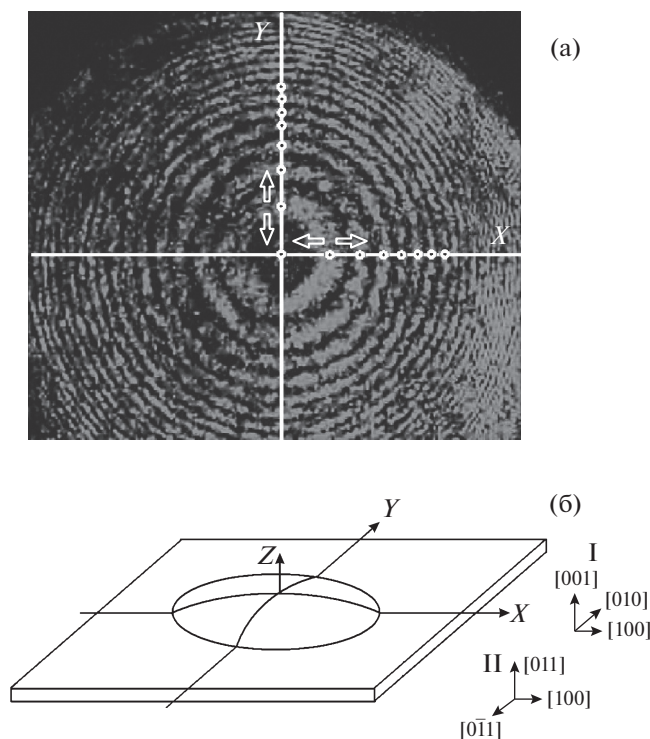


Рис. 2. а – микрофотография интерференционных колец, направления координат X и Y привязаны к кристаллографическим направлениям образца $[100]$ и $[010]$ соответственно, курсоры для исследования движения колец показаны белыми кружками; б – кристаллографические направления монокристаллической пластины двух разных срезов и направления сканирования ее поверхности.

поверхностью кристаллов проводилось со стороны неподвижного основания. При таком способе крепления смещение поверхности за счет объемной деформации происходит на противоположной стороне пластин. Это позволило легко отделить флексоэлектрический вклад в деформацию от электрострикции и пьезоэлектричества.

Наблюдаемые интерференционные максимумы и минимумы имели вид концентрических колец (рис. 2а), по движению которых определялась величина смещения зеркальной поверхности образца. В случае увеличения расстояния между поверхностью образца и объективом прибора наблюдалось сужение колец и, наоборот, при сближении – кольца расширялись от их центра к периферии кадра.

На рис. 3 показан профиль распределения интенсивности вдоль линии X , проходящей через центр концентрических колец. Здесь размерность координат максимумов/минимумов представлена количеством точек на кадре (в пикселях). На этом же рисунке сплошной линией показан профиль после деформации поверхности. Для оценки величины смещения поверхности по наблюдаемому движению максимумов/минимумов требу-

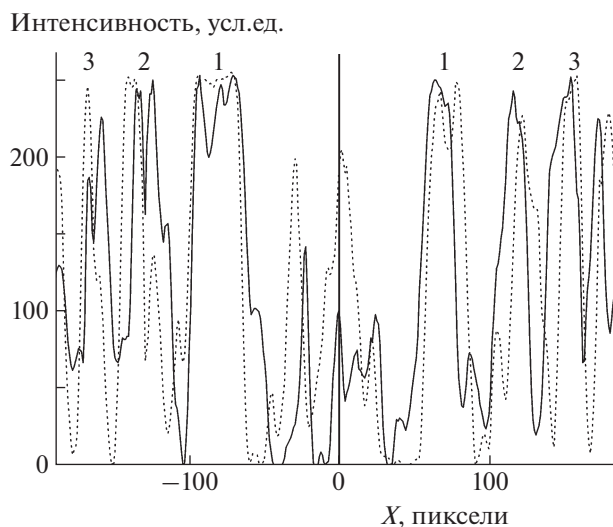


Рис. 3. Профили интенсивности интерференционных колец. Пунктирные линии соответствуют недеформированной поверхности, сплошные – деформированной. Цифры у кривых – порядковые номера максимумов.

ются сложные методы анализа и расчета. Нами предложен более простой и быстрый метод оценки величины деформации – по интерференционным картинкам, основанный на методе “блинк-компарации”, который применяется в астрометрии для определения координат комет и астероидов.

С помощью компьютерной программы “блинк-компаратор” все изменения в интерференционной картине выявляются при сравнении двух фотоснимков, попеременно накладываемых друг на друга. Вначале один из выбранных интерференционных максимумов/минимумов на снимке отмечается курсором и определяется его координата (X_0 , Y_0) (рис. 2а). Для второго снимка с помощью другого курсора устанавливаются координаты уже смещенного максимума (минимума) (X_1 , Y_1) того же интерференционного порядка. При чередовании снимков на удобной для наблюдателя частоте (обычно 2–5 Гц) добиваются, чтобы движение курсоров и максимумов/минимумов было синхронно. Рабочие направления X и Y обычно привязываются к кристаллографическим направлениям образца (рис. 2б).

На рис. 4а показаны экспериментальные точки, связывающие координаты максимумов (для удобства в качестве координат использованы радиусы колец R) и их порядковые номера n , которые отсчитываются от центра интерференционной картины (рис. 2а). Согласно рис. 4а, зависимость $R(n)$ не является линейной, но, поскольку от поверхности образца отражалась сферическая предметная волна, можно предположить квадратичный характер этой зависимости. Действитель-

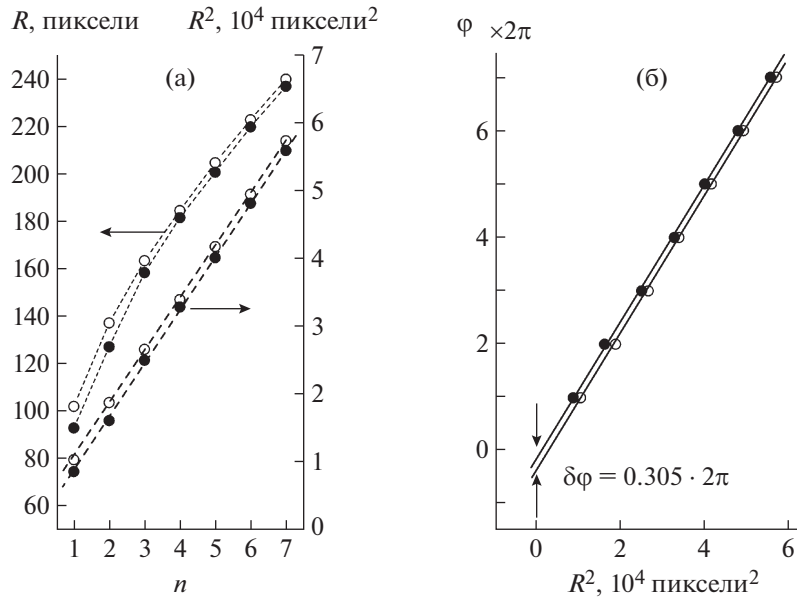


Рис. 4. Зависимости: **а** – радиусов интерференционных колец от их порядкового номера; **б** – фазы от квадрата радиуса интерференционных колец. Светлые точки – для недеформированной поверхности, черные – для деформированной.

но, зависимость квадратов радиусов колец от порядкового номера, построенная в функциональном масштабе $R^2(n)$, является линейной, и отклонение от линейности, рассчитанное по семи экспериментальным точкам, составляет 0.65%.

На рис. 4а также приведены зависимости $R(n)$ и $R^2(n)$ для случая деформированной поверхности. Очевидно, что величину изменения расстояния между поверхностью образца и объективом интерферометра можно рассчитать по изменению координаты максимума одного и того же порядкового номера, используя соответствующую формулу преобразования.

Прежде чем вывести эту формулу, заметим, что для соседних максимумов, у которых порядковые номера различаются на единицу, сдвиг фаз между предметной и опорной волнами равен 2π . В этом случае линии, проведенные по экспериментальным точкам на рис. 4а, могут трактоваться как зависимость координат максимумов от фазы φ , выраженной в долях 2π . Поскольку сдвиг фаз пропорционален смещению поверхности, то для рабочей формулы удобнее выразить зависимость фазы от квадрата координаты (рис. 4б) в виде линейной зависимости:

$$\varphi = 2\pi k R^2 + \text{const.} \quad (1)$$

Коэффициент k определяется оптической системой интерферометра и разрешением CCD-камеры, однако может быть непосредственно найден по наклону на экспериментальной зависимости $\varphi(R^2)$ (см. рис. 4б). Приняв R_0 за радиус кольца до,

а R_1 – после деформации поверхности, с учетом формулы (1) получаем сдвиг фаз:

$$\delta\varphi = 2\pi k (R_1^2 - R_0^2). \quad (2)$$

Для экспериментальных данных на рис. 4б величина $\delta\varphi$ получается равной $0.305 \cdot 2\pi$ с погрешностью измерения ± 0.011 , которая связана с неточностью ± 1 пиксель определения радиуса колец, и со статистической погрешностью ± 0.031 , найденной по семи экспериментальным точкам.

Важно отметить, что длина оптического пути между объективом и образцом удваивается из-за отражения от его зеркальной поверхности. Например, при смещении образца на величину порядка $\delta Z = \lambda/2$ между опорной и предметной волной набежит целая длина волны, и сдвиг фаз становится равным 2π . В результате, зная разницу квадратов радиусов для максимумов/минимумов до деформации и после деформации, с учетом выражения (2) можно найти величину смещения поверхности образца с помощью следующей формулы:

$$\delta Z = (1/2)\lambda k (R_1^2 - R_0^2). \quad (3)$$

Расчет по экспериментальным точкам на рис. 4 показывает, что величина прогиба δZ достигает 96 нм при точности измерения ± 10 нм.

По величине прогиба δZ в центре кристаллической пластины диаметром d можно оценить радиус кривизны ее поверхности ρ и величину градиента деформации du/dx по следующей формуле:

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{\rho} \approx \frac{8\delta Z}{d^2}. \quad (4)$$

Учитывая точность измерения 10 нм величины прогиба центра кристаллической пластины диаметром 10 мм, получаем, что метод позволяет измерять радиус кривизны ее изгиба до величины порядка 1000 м.

Изменение формы интерференционных колец, при котором окружности трансформируются в эллипсы, свидетельствует о появлении астигматизма в оптической системе. Причиной астигматизма является нарушение осевой симметрии, связанное с цилиндричностью отражающей поверхности деформированного образца, в силу того что сама цилиндрическая поверхность имеет две взаимно перпендикулярные плоскости симметрии.

На рис. 5а показан ход лучей при деформации цилиндрического изгиба зеркальной поверхности в двух перпендикулярных плоскостях XZ и YZ . Видно, что при отражении источника света P от поверхности, которая в сечении XZ выглядит изогнутой, а в сечении YZ – плоской, формируются два изображения источника, P'_x и P'_y , удаленные друг от друга. Мнимые источники P'_x и P'_y формируют астигматический пучок, поперечное сечение которого представляет эллипс. В результате интерференции этого пучка с опорной волной образуются интерференционные максимумы в виде концентрических колец эллиптической формы. На рис. 5а главные полуоси одного из интерференционных максимумов обозначены как R_x и R_y . При анализе изображений одновременно измеряются два радиуса (или диаметра) интерференционных колец во взаимно перпендикулярных направлениях X и Y (рис. 2а), что позволяет качественно отличить деформацию цилиндрического изгиба от сферического (рис. 5б–5г).

Для того чтобы непосредственно получить данные о профиле неоднородной деформации в виде функции $\delta Z(x, y)$, микроскоп-интерферометр обеспечивал сканирование всей поверхности кристалла вдоль рабочих направлений X и Y (см. рис. 2б). Позиционирование осуществлялось с помощью микрометрических винтов с точностью до 0.01 мм, и в выбранных точках x и y измерялась величина локального прогиба $\delta Z(x, y)$ до и после прикладывания поля.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный метод позволил детально исследовать о.ф.э. в монокристаллических пластинах модельных перовскитов ВТ, КТ и СТ и впервые получить:

- 1) временные и полевые зависимости величин неоднородной деформации;
- 2) профили деформированной поверхности;
- 3) гистерезисы деформации.

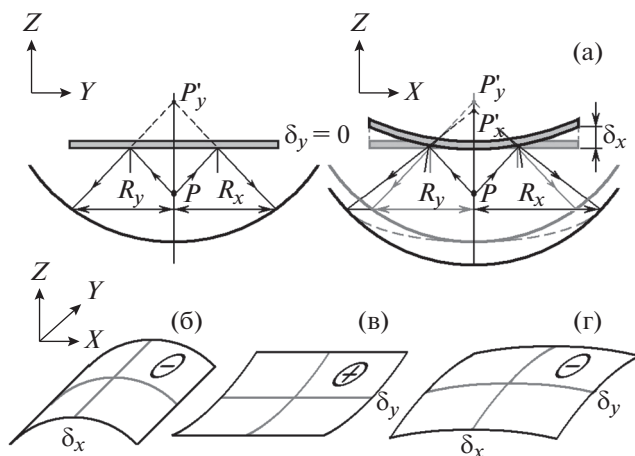


Рис. 5. Искажение волнового фронта при деформации зеркальной поверхности образца (а), цилиндрические изгибы для разной полярности прикладываемого напряжения (б, в) и деформация сферического изгиба (г).

3.1. Временные зависимости

При исследовании временных и полевых зависимостей неоднородной деформации к электродам-зеркалам образцов прикладывались импульсы треугольной формы с периодом 100 с и с амплитудами до 15 В (ВТ), 750 В (СТ) и 150 В (КТ) [8–10]. Для всех перечисленных образцов всегда наблюдался изгиб вогнутой поверхности в направлении к положительно заряженному электроду, что характерно для о.ф.э. [3–6].

На рис. 6 показаны временные зависимости прогиба δZ_x , δZ_y центральной части поверхности (001) пластин КТ, полученные по данным измерений радиусов колец в направлениях X и Y . При увеличении положительного напряжения наблюдается почти одинаковый рост величин δZ_x и δZ_y . Снижение напряжения вызывает уменьшение δZ_x и δZ_y , при этом становится заметной разница этих величин, а при уменьшении поля до нуля наблюдается остаточная деформация. Отрицательный треугольный импульс индуцирует деформационный отклик с большей разницей величин δZ и большей остаточной деформацией. Это позволяет предположить, что при импульсе положительной полярности наблюдается сферическая деформация, которая при отрицательном импульсе переходит в промежуточное состояние между сферическим и цилиндрическим изгибом.

С помощью формулы (4) с учетом диаметра электрода 4.5 мм на пластинах КТ можно оценить радиусы кривизны изгиба в двух перпендикулярных сечениях образца. Так, для положительной полярности оба радиуса кривизны одинаковы и составляют около 40 м, а для отрицательного импульса – 40 и 60 м.

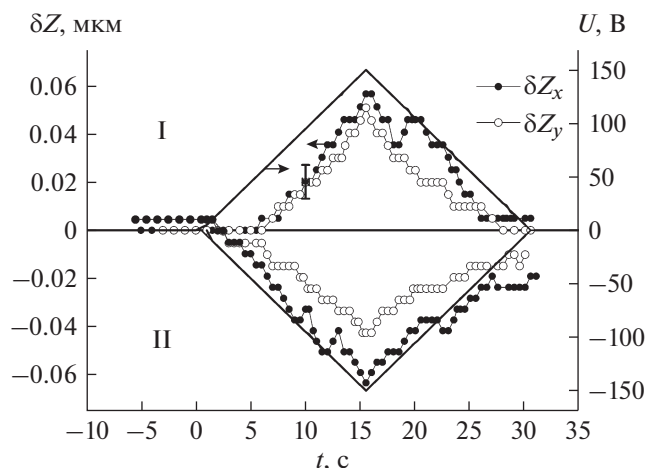


Рис. 6. Временная зависимость деформации в центре поверхности (001) кристалла КТ как отклик на последовательность треугольных импульсов внешнего электрического поля сначала положительной полярности (I), затем отрицательной (II). Черные точки – величина прогиба, полученная по движению колец в направлении X, светлые – в направлении Y (см. рис. 2а). Различие между δZ_x и δZ_y свидетельствует о понижении симметрии деформируемой поверхности при изменении формы изгиба от сферического к цилиндрическому.

3.2. Полевые зависимости

На зависимостях деформации от поля $\delta Z_x(E)$ и $\delta Z_y(E)$ (рис. 7), построенных по данным рис. 5, хорошо видно, что эффект начинается с порогового поля, далее выходит на линейную зависимость, а при снижении поля до нуля наблюдается остаточная деформация. Пороговое поле и остаточная деформация свидетельствуют о гистерезисе деформации. Можно также отметить, что при отрицательной полярности заметно расхождение между δZ_x и δZ_y , что связано с упомянутой промежуточной деформацией между цилиндрическим и сферическим изгибами.

Более наглядно разницу в зависимостях деформации от прикладываемого поля для цилиндрического и сферического изгибов можно проиллюстрировать на примере о.ф.э. в монокристаллических пластинах ВТ [8]. Вначале индуцированный полем изгиб исследовался в исходном кристалле ВТ, в котором спонтанная поляризация была направлена параллельно исследуемой плоскости, и, следовательно, эта плоскость имела ось симметрии 2-го порядка. Во втором случае осуществлялось переключение спонтанной поляризации в сильном поле, в результате которого симметрия этой же поверхности повышалась до оси 4-го порядка. После переполяризации кристалла измерение индуцированного изгиба поверхности повторялось. Полевые зависимости для этих двух случаев приведены на рис. 8.

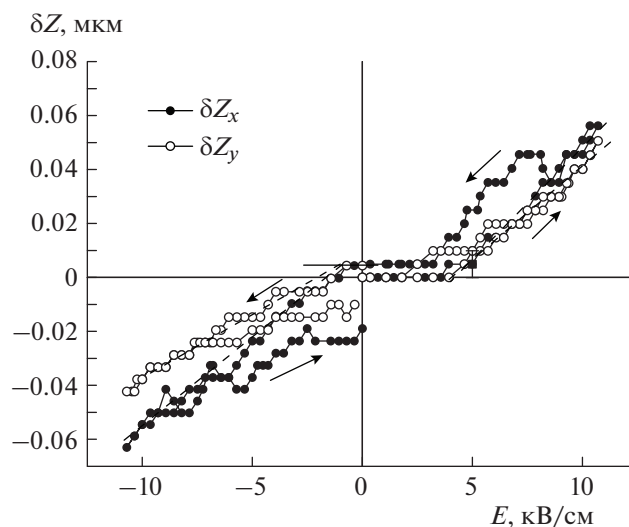


Рис. 7. Зависимость величины деформации от поля в КТ. Данные и обозначения те же, что на рис. 6.

В случае использования поверхности с осью симметрии 2-го порядка поле положительной полярности индуцирует линейно возрастающую X-составляющую $\delta Z_x(E)$, в то время как зависимость $\delta Z_y(E)$ выходит в насыщение. При отрицательной полярности наблюдаются линейный рост Y-составляющей $\delta Z_y(E)$ и выход в насыщение X-составляющей $\delta Z_x(E)$. В отличие от исходного кристалла в поляризованном образце, зависимости обеих составляющих $\delta Z_x(E)$ и $\delta Z_y(E)$ становятся одинаковыми, что свидетельствует о более высокой симметрии деформированной поверхности. Таким образом, использование поверхностей с осями 2-го и 4-го порядка влияет на поведение составляющих $\delta Z_x(E)$ и $\delta Z_y(E)$: в первом случае наблюдается симметрия цилиндрического, а во втором – сферического изгиба.

3.3. Профили пластин с индуцированной неоднородной деформацией

Более точные данные о виде неоднородной деформации, о величине и радиусе ее кривизны можно получить, непосредственно исследуя профили изгиба путем сканирования поверхности [9, 10].

На рис. 9 продемонстрированы профили изгиба пластин КТ, полученные при сканировании поверхности (001) вдоль направлений $X \parallel [100]$ и $Y \parallel [010]$ (см. рис. 2б, геометрия I). Все точки на графиках соответствуют максимальному локальному прогибу в точках x и y в момент максимума треугольного импульса ($U = 150$ В, $E = 11$ кВ/см). Радиусы кривизны изгиба в двух перпендикулярных сечениях образца можно оценить по кривым, проведенным около экспериментальных точек. Для положительного импульса радиусы изгибов

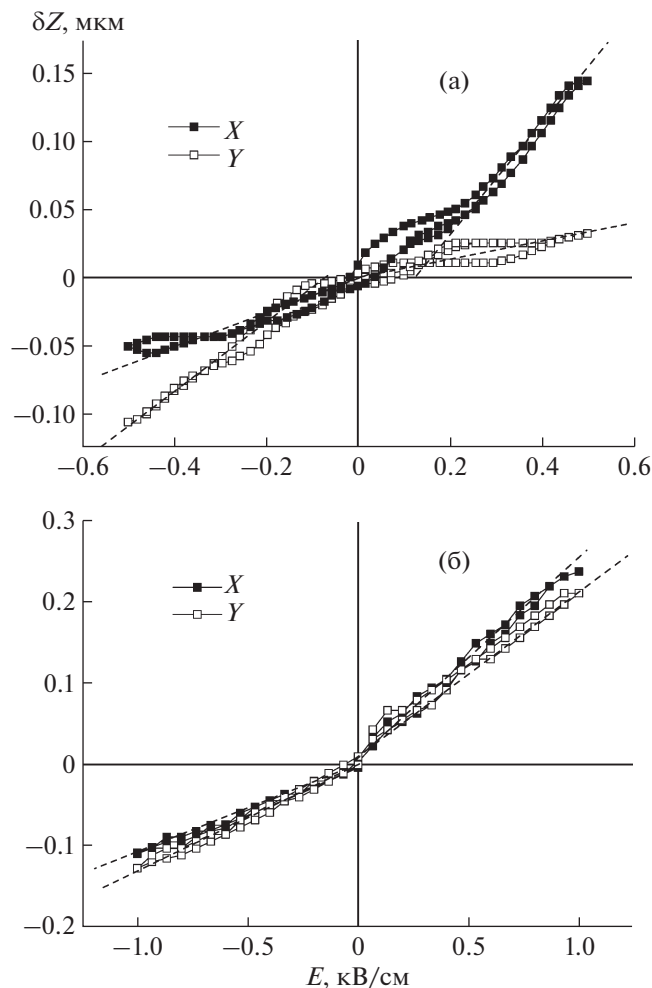


Рис. 8. Зависимости величины деформации от внешнего электрического поля на образце ВТ: **а** – до переключения поляризации (изгиб цилиндрический); **б** – после переключения поляризации (изгиб сферический).

составили 50 и 45 м, а для отрицательного – 60 и 45 м. Заметим, что полученные значения близки к предыдущим приблизительным оценкам по формуле (4). Эти данные также подтверждают, что вначале наблюдалась деформация, близкая к сферическому изгибу, которая при отрицательном импульсе становилась промежуточной между сферическим и цилиндрическим изгибом.

На рис. 9 также можно заметить некоторую асимметрию профилей изгибов, которая, по-видимому, связана с неоднородностью кристалла, а также меньшие по величине локальные изгибы на границах электрода, около которых электрическое поле становится неоднородным. В работе [9] представлены сферические изгибы для тонких пластин ST в кубической фазе, вырезанных в направлении [001]. Однако из-за накопления инжектированного заряда в приповерхностных областях в кристаллах ST наблюдается более силь-

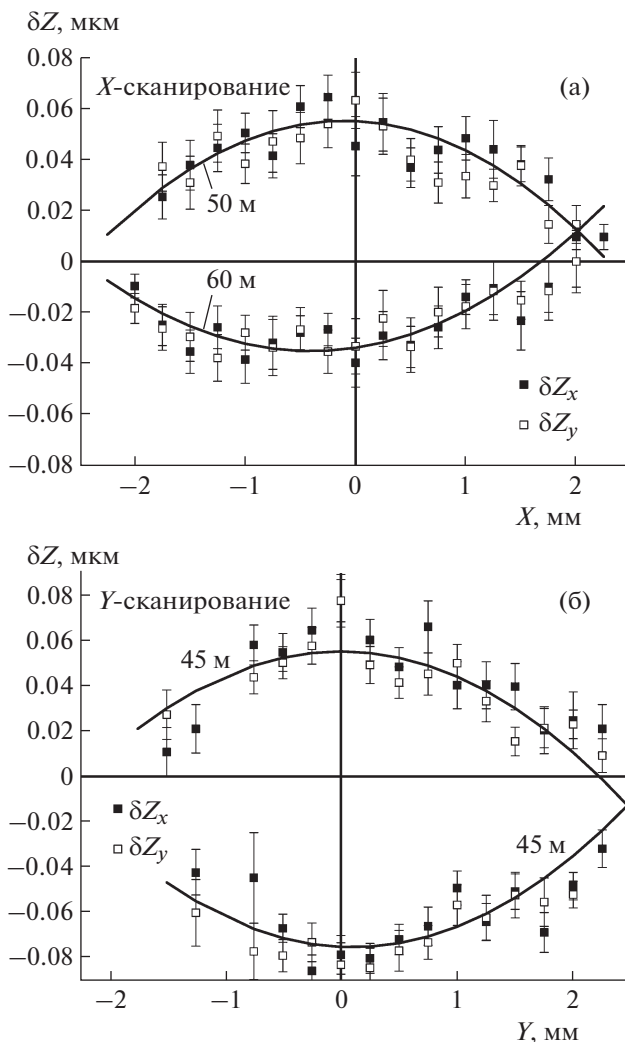


Рис. 9. Профили индуцированного полем $E = 11$ кВ/см изгиба, полученные при сканировании поверхности КТ (001) в направлении X (**а**) и Y (**б**). Показаны линии для оценки радиуса кривизны изгиба поверхности. Радиусы изгибов для положительного и отрицательного импульсов составили: **а** – 50 и 60 м соответственно; **б** – по 45 м.

ный разброс экспериментальных точек и более низкое качество профилей, чем в случае КТ [10].

Профили, показанные на рис. 9, были получены для поверхности кубических кристаллов КТ (001), обладающих кристаллографической осью 4-го порядка, и было бы интересно выяснить вид профилей для поверхности типа (011), имеющей ось симметрии 2-го порядка. В этом случае, направление сканирования X было заранее привязано к кристаллографическому направлению [100], а Y – к $[0\bar{1}1]$ (см. рис. 26, геометрия II). Согласно рис. 10, изгиб наблюдается только при сканировании в направлении Y , при этом радиус кривизны поверхности достигает 140 и 180 м для импульсов поля разной полярности. Что касается направления X , то в этом случае никакого изгиба не выяв-

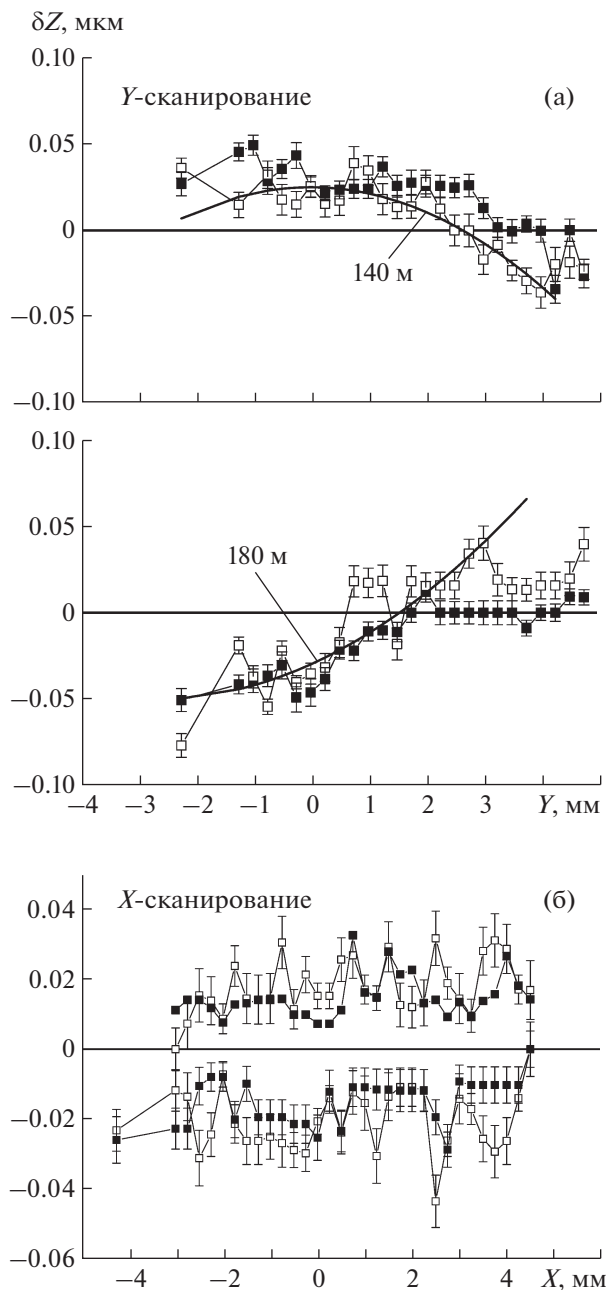


Рис. 10. Профиль индуцированного полем $E = 11$ кВ/см изгиба при сканировании поверхности КТ (011) в направлении: **а** – Y (направление привязано к кристаллографическому направлению $[0\bar{1}1]$) и **б** – X (направление привязано к кристаллографическому направлению $[100]$). Темными квадратами отмечены смещения, рассчитанные по R_x , светлыми – по R_y . Линией показана кривая для оценки радиуса кривизны изгиба поверхности. Радиусы изгибов для положительного и отрицательного импульсов составили 140 и 180 м соответственно (**а**).

лено. Полученные профили еще раз свидетельствуют о том, что симметрия искаженной под

действием внешнего поля кристаллической ячейки перовскита, обладающей осью симметрии 2-го порядка, вызывает цилиндрический изгиб с такого же рода симметрией.

4. ВЫВОДЫ

Создана установка для исследования обратного флексоэлектрического эффекта. Работа установки основана на использовании интерферометрического метода и сканирования поверхности. Предложенный бесконтактный метод позволяет измерять неоднородную деформацию тонких пластин, индуцированную однородным внешним полем. При обработке результатов используется метод “блинк-компарации”, который обеспечивает быструю оценку изгиба кристаллических пластин с точностью до 10 нм. Сканирование поверхности позволяет исследовать локальную деформацию поверхности, строить профили деформированной поверхности, оценивать тип и величину индуцированной неоднородной деформации. С помощью установки исследованы тонкие пластины монокристаллов $BaTiO_3$, $SrTiO_3$ и $KTaO_3$. Показаны индуцированные внешним полем деформации типа сферического и цилиндрического изгиба. Метод позволяет с помощью видеосъемки исследовать гистерезисные явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zubko P., Catalan G., Tagantsev A. // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2013. V. 43. P. 387. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-071312-121634>
2. Tagantsev A.K., Yudin P.V. *Flexoelectricity in solids*. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2017.
3. Бурсиан Э.В., Зайковский О.И. // *ФТТ*. 1968. Т. 10. Вып. 5. С. 1413.
4. Бурсиан Э.В., Трунов Н.Н. // *ФТТ*. 1974. Т. 16. Вып. 4. С. 1187.
5. Румянцева Е.Д., Залесский В.Г. // *ФТТ*. 2014. Т. 56. Вып. 7. С. 1301.
6. Harden J., Teeling R., Gleeson J. T., Sprunt S., Jáklí A. // *Physical Review E*. 2008. V. 78. 031702-1-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.031702>
7. Fu J.Y., Zhu W., Li N., Cross L.E. // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 100. P. 024112. <https://doi.org/10.1063/1.2219990>
8. Румянцева Е.Д., Залесский В.Г. // *ФТТ*. 2016. Т. 58. Вып. 4. С. 671.
9. Обозова Е.Д., Залесский В.Г. // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103. № 11–12. С. 792. <https://doi.org/10.7868/S0370274X16110072>
10. Обозова Е.Д., Сырников П.П., Залесский В.Г. // *ФТТ*. 2018. Т. 60. Вып. 5. С. 947. <https://doi.org/10.21883/FIT.2018.05.45791.312>