

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-66-78>



УДК 537.226.4

Влияние механических напряжений на доменную структуру монокристаллов многоосных сегнетоэлектриков (на примере титаната бария)

В.В. Бородина¹,
С.О. Крамаров^{2,@}

¹Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова – филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», Ростов-на-Дону 344006, Россия

²Сургутский государственный университет, Сургут 628412, Россия

@Автор для переписки, e-mail: taoovo@yandex.ru

В данной обзорной статье обобщён материал многолетних исследований, посвящённых влиянию механических напряжений на доменную структуру многоосных сегнетоэлектриков на примере монокристаллов титаната бария (BaTiO_3). Со времени открытия сегнетоэлектрических свойств титаната бария в 1944 году этот материал стал предметом всестороннего исследования как первый практически важный и, пожалуй, наиболее известный сегнетоэлектрик. Доменная структура титаната бария является чувствительной к механическим напряжениям, возникающим и от простого одноосного сжатия, и от точечных воздействий локальной механической нагрузкой. Механические напряжения, действуя на сегнетоэлектрический кристалл, оказывают существенное влияние на его диэлектрические и пьезоэлектрические свойства, в частности, под влиянием механических напряжений возможны 90-градусные переключения доменов. Наиболее интересные экспериментальные результаты были получены при изучении упругопластических процессов в BaTiO_3 под действием локальных механических нагрузок. Обнаружены и изучены: напряжённо-деформированная область вокруг точки приложения нагрузки; «внутренний» 90-градусный домен, не выходящий ни на одну из поверхностей кристалла и не замыкающийся на других доменах; рост 90-градусных доменов под действием остаточных механических напряжений; рост трещин вдоль заряженных

90-градусных доменных границ. Введены термины «сегнетопластический эффект» (деформирование кристалла за счёт образования 90-градусных сегнетоэлектрических доменов) и «сегнетомеханический эффект» (образование и рост трещин по заряженным 90-градусным доменным границам). Была выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о существенной роли кислородных вакансий в процессах 90-градусных доменных переориентаций. В частности, увеличение концентрации кислородных вакансий путём восстановительного отжига монокристаллов титаната бария создаёт более благоприятные условия для появления «внутреннего» 90-градусного домена под локальной механической нагрузкой. Изучение закономерностей формирования доменной структуры в сегнетоэлектрических кристаллах остаётся важной проблемой современного материаловедения.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, домены, внутренние механические напряжения, релаксация, внутреннее электрическое поле.

Для цитирования: Бородина В.В., Крамаров С.О. Влияние механических напряжений на доменную структуру монокристаллов многоосных сегнетоэлектриков (на примере титаната бария). *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):66-78. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-66-78>

Effect of mechanical stresses on the domain structure of barium titanate single crystals

Veronika V. Borodina¹
Sergey O. Kramarov^{2,@}

¹*Sedov Water Transport Institute – the branch of Admiral Ushakov State Maritime University, Rostov-on-Don 344006, Russia*

²*Surgut State University, Surgut 628412, Russia*

@*Corresponding author, e-mail: maoovo@yandex.ru*

This review article summarizes the material of years of research on the impact of mechanical stresses on the domain structure of multiaxhetelectrics using the example of barium titanium monocrystals. Since the discovery of the ferroelectric properties of barium titanate in 1944, this material has been the subject of comprehensive investigation as the first practically important and perhaps the most famous ferroelectric. The domain structure of barium titanate is sensitive to mechanical stresses arising both from simple uniaxial compression and from point impacts by local mechanical loading. Mechanical stress applied to a ferroelectric crystal may have a significant effect on dielectric and piezoelectric properties. In particular, 90-degree domain switching is possible under the influence of stresses. The most interesting experimental results are obtained in the study of elastoplastic processes in BaTiO₃, originating from local mechanical stresses. The following features are found and studied: development of strained region around the point of application of the load; “internal” 90-degree domain that does not extend to the crystal surfaces and does not close upon other domains; the growth of 90-degree domains under the influence of residual mechanical stresses; growth of cracks along charged 90-degree domain walls. The notions of “ferroplastic effect” (crystal deformation

due to the formation of 90-degree ferroelectric domains) and “ferromechanical effect” (crack formation and growth along charged 90-degree domain walls) are introduced. The hypothesis of a significant role of oxygen vacancies in the processes of 90-degree domain reorientation was put forward and experimentally confirmed. In particular, an increase in the concentration of oxygen vacancies by reducing annealing of barium titanate single crystals creates more favorable conditions for the appearance of an “internal” 90-degree domain under local mechanical load. The study of the mechanisms governing the formation of a domain structure in ferroelectric crystals remains an important problem of modern materials science.

Keywords: ferroelectrics, domains, internal mechanical stresses, relaxation, internal electric field.

For citation: Borodina V.V., Kramarov S.O. Effect of mechanical stresses on the domain structure of barium titanate single crystals. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):66-78 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-66-78>

Введение

Создание и исследование интеллектуальных материалов, то есть материалов, изменяющих свои свойства в результате различных внешних воздействий, является одним из наиболее перспективных направлений современной науки о материалах. Такие материалы, благодаря своей уникальной структуре и составу, могут выполнять «двойную или даже тройную функцию – собственно материала с требуемыми характеристиками, датчика на внешнее воздействие и, в некоторых случаях, устройства, «запрограммированного» на определенное поведение» [1]. К ним относятся: сплавы с «памятью формы», самовосстанавливающиеся, самосмазывающиеся и самоочищающиеся материалы, проводящие полимеры, магнитореологические и электрореологические жидкости, электрохромные материалы, гидрогели, пироэлектрические, электрострикционные и магнитострикционные материалы. И к этому же классу «умных» материалов со свойствами, реагирующими на внешние факторы, относятся сегнетоэлектрики, вещества, обладающие спонтанной электрической поляризацией, которая может быть обращена приложением внешнего электрического поля. Большая диэлектрическая проницаемость, высокий пьезомодуль, наличие петли диэлектрического гистерезиса, интересные электрооптические свойства обусловили широкое применение сегнетоэлектриков в радиоэлектронике, электроакустике, квантовой электронике, измерительной технике и многих других областях современной науки и техники. Титанат бария (BaTiO_3) – яркий представитель этого семейства, многоосный сегнетоэлектрик со структурой перовскита, обладающий фоторефрактивным и пьезоэлектрическим эффектом. Его открытие ознаменовало принципиально новый этап в исследовании сегнетоэлектричества, а возможности его практического применения далеко не исчерпаны. Поэтому, несмотря на большое количество публикаций, посвящённых титанату бария, исследования в данном направлении продолжают и в настоящее время [2, 3]. С применением новых методов сканирующей зондовой микроскопии [3] стало возможным наблюдение доменной структуры сегнетоэлектрических материалов в наноразмерной области. Продолжается изучение электромеханических свойств тонких плёнок на основе BaTiO_3 [4], изучаются свойства композитных материалов на

основе наночастиц BaTiO_3 в полимерной матрице [5, 6]. В настоящей работе обобщается материал исследований, посвящённых влиянию механических напряжений на доменную структуру монокристаллов титаната бария.

История вопроса

Термин «сегнетоэлектричество» был предложен И.В. Курчатовым, который в 30-х годах XX в. провёл комплексные исследования сегнетовой соли и написал соответствующую монографию [7]. В настоящее время известно несколько десятков веществ, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, но титанат бария (BaTiO_3) вошёл в историю научных исследований как первый практически важный и, пожалуй, наиболее известный сегнетоэлектрик. Сегнетоэлектрические свойства BaTiO_3 были открыты в 1944 г. в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии Наук СССР Б.М. Вулом и И.М. Гольдман и подробно описаны в работе А.В. Ржанова в 1949 году [8]. С этого времени материал был предметом пристального внимания. В 1973 году был издан сборник «Титанат бария» [9]. В сборник были включены основные доклады, заслушанные на семинаре, посвященном 25-летию открытия сегнетоэлектрических свойств титаната бария. В 1974 году была издана монография Э.В. Бурсиана «Нелинейный кристалл (титанат бария)» [10], в которой даётся теоретическое объяснение сегнетоэлектрических свойств особенностями его кристаллического строения. В 1986 году увидела свет монография «Процессы переключения в нелинейных кристаллах», автором которой является В.М. Рудяк [11]. В книге рассмотрены процессы перестройки доменной структуры и связанные с ними процессы реориентации спонтанной намагниченности, поляризованности и деформации в ферромагнетиках, сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках, соответственно. Рассмотрена роль диэлектрической и сегнетоупругой вязкости в процессах переключения и гистерезисных явлениях. Значительная часть книги посвящена эффекту Баркгаузена в нелинейных кристаллах и его применению в качестве метода их исследования. И это далеко не полный перечень научных трудов по данной теме.

Доменная структура монокристаллов титаната бария

Все сегнетоэлектрики объединяет ряд характерных признаков. У них существует некоторая температура (точка Кюри, T_K) в окрестности которой при охлаждении самопроизвольно (спонтанно) в отсутствие внешнего электрического поля возникает электрическая поляризованность $\mathbf{P}_{\text{СП}}$. Направление вектора $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ может быть изменено электрическим полем («переключение полем»). При охлаждении сегнетоэлектрика от $T > T_K$ возрастает диэлектрическая проницаемость по закону Кюри-Вейсса $\epsilon = c/(T - T_K)$; при $T \approx T_K$ наблюдается максимум ϵ , а затем уменьшение с охлаждением при $T < T_K$ [12].

Сегнетоэлектрики при $T < T_K$ разбиваются самопроизвольно на отдельные области (электрические домены), отличающиеся друг от друга направлением вектора $\mathbf{P}_{\text{СП}}$. Под влиянием внешних воздействий (температура, электрическое поле, механическое напряжение) доменная структура может перестраиваться, то есть имеет место «динамика» доменов. Зарождению и росту доменов в титанате бария, условиям их существования, движению доменных стенок под действием электрического поля посвящено большое количество научных работ.

Появление вектора $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ сопровождается спонтанной деформацией сегнетоэлектрика, связанной с изменением симметрии кристалла. В результате перехода в сегнетоэлектрическую фазу и образования доменной структуры сегнетоэлектрический кристалл по своей статистически усреднённой макросимметрии возвращается к симметрии исходной, параэлектрической фазы. Разбиваясь на домены, он стремится сохранить свою прежнюю форму [13]. Таким образом, помимо сегнетоэлектрических, титанат бария обладает также сегнетоэластическими свойствами, то есть является смешанным сегнетоэластиком. Согласно определению, данному в статье С.А. Гриднева, «сегнетоэластики – это особый класс кристаллических твердых тел, в которых при структурном фазовом переходе из более симметричной (параэластической) в менее симметричную (сегнетоэластическую) фазу спонтанно (самопроизвольно) возникает деформация кристаллической решетки относительно исходной» [14]. Поэтому доменная структура титаната бария является чувствительной к механическим напряжениям, возникающим и от простого одноосного сжатия, и от точечных воздействий локальной механической нагрузкой.

С начала массового выращивания кристаллов BaTiO_3 методом Ремейки из раствора в расплаве фторида калия (KF) [15] были проведены многочисленные исследования статистики и динамики доменной структуры [16].

При понижении температуры BaTiO_3 испытывает фазовый переход I рода из неполярной (кубической) параэлектрической фазы (или парафазы) в сегнетоэлектрическую (тетрагональную) фазу (или сегнетофазу) при температуре $T_{\text{К}} = 132 \text{ }^\circ\text{C}$ (для кристаллов, выращенных в расплаве KF обычно $120 \text{ }^\circ\text{C}$). Спонтанная поляризованность возникает вдоль одной из осей куба. Общий характер доменной структуры в сегнетоэлектрическом кристалле определяется симметрией кристалла в исходной неполярной фазе и симметрией сегнетоэлектрической фазы. В целом равновесная доменная структура должна удовлетворять условиям минимума полной свободной энергии кристалла, включающей в себя энергию упругих деформаций, энергию доменных стенок и энергию полей деполяризации. Согласно [17, 18], в сегнетоэлектриках возможно существование метастабильных доменных конфигураций, которые медленно переходят в стабильные за счёт движения доменных стенок, перераспределения дефектов, изменения условий экранирования и других факторов.

В тетрагональной фазе BaTiO_3 вектор спонтанной поляризованности $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ может быть ориентирован вдоль одного из шести псевдокубических направлений типа [001]. Поэтому наряду с антипараллельными (180-градусными) доменами, у которых $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ направлен вдоль одной кристаллографической оси («по» или «против») и при переходе через доменную стенку изменяет своё направление на 180° существуют также 90-градусные домены – при переходе через доменную стенку, разделяющую такие домены, вектор $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ изменяет своё направление на 90° . У титаната бария домены с вектором спонтанной поляризованности, перпендикулярные наиболее развитым поверхностям пластинок, получили название с-доменов, а домены с $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ параллельными этим поверхностям – а-доменов.

На рис. 1 изображены возможные типы доменных структур. На рис. 1а изображен с-доменный кристалл, а на рис. 1б и г – а-доменные кристаллы. В случае 1б 90-градусные домены пересекаются антипараллельными структурами. В случае 1е представлены 90-градусные клиновидные системы в а-доменном кристалле, а в случае 1д – а-доменные

клиновидные домены в с-доменном кристалле. На рис. 1в, е, з показаны схематически а-с-доменные кристаллы, а на рис. 1ж – пересечение одиночных а-доменов внутри с-доменного кристалла. Несмотря на большое количество предложенных методов наблюдения доменных структур [12], все основные данные могут быть получены с использованием эффекта двулучепреломления, а также по рельефу избирательного травления поверхности сегнетоэлектрического образца. При этом используются как оптические, так и электронные микроскопы (метод реплик).

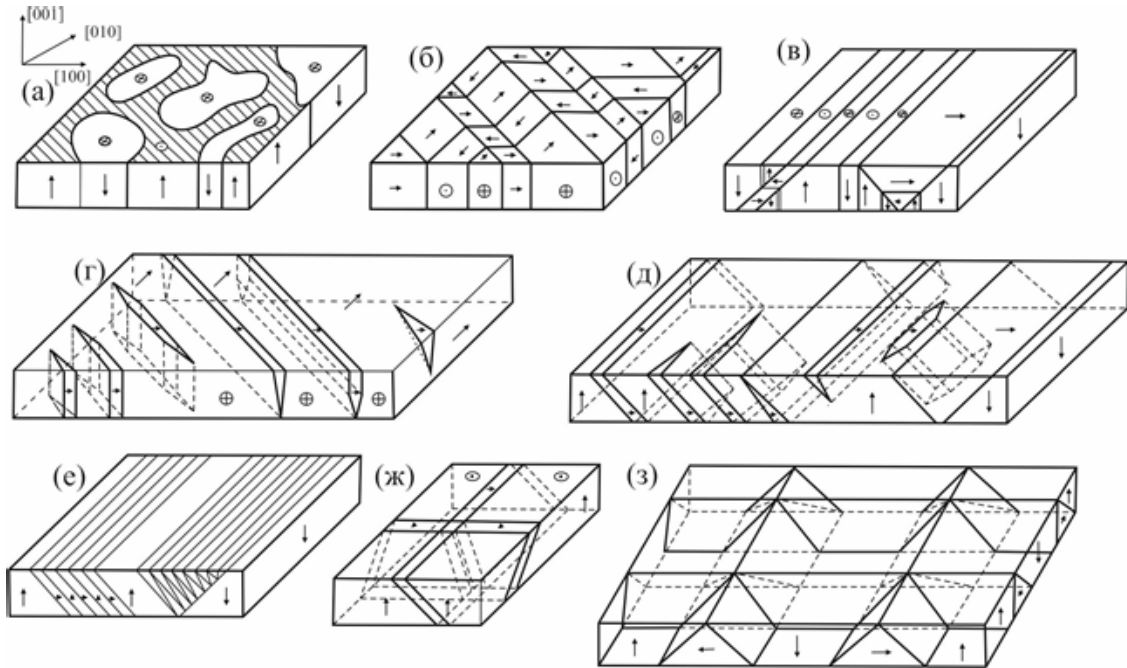


Рис. 1. Возможные типы доменных структур.

Очевидно, что появление клинообразных 90-градусных доменов обусловлено наличием неоднородных механических напряжений и направлено на минимизацию упругой энергии последних.

В тетрагональной фазе BaTiO_3 существуют два типа доменных границ: 180° стенки, разделяющие домены с антипараллельными направлениями спонтанной поляризованности $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ и 90° стенки, при переходе через которые $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ изменяет направление на 90° . Последние являются сегнетоэластическими, поскольку разделяемые ими домены имеют различно ориентированные системы спонтанных деформаций.

Возможность появления клиновидных а-доменов объясняется тем, что 90° стенки в объёмных образцах могут несколько отклоняться от «разрешённых» направлений. Действительно, в тетрагональной фазе 90° -градусная доменная стенка не является, строго говоря, 90° -градусной: при переходе через неё вектор спонтанной поляризованности изменяет направление на $89^\circ 24'$. В результате в окрестности 90° -градусной стенки наблюдаются неоднородные деформации (рис. 2), поверхность кристалла «сморщивается» [17, 19, 20], а при наличии серии клиновидных доменов отмечаются деформации изгиба (рис. 3). Неоднородные деформации отмечены при отражении рентгеновских лучей от поверхности а-с-доменных кристаллов по расширению дифракционного максимума и ослаблению интенсивности в максимуме в 2–5 раз [21]. Отсюда

следует, что 90-градусные границы в тетрагональном Ba-TiO_3 возникают в тех участках, где в парафазе либо при фазовом переходе существуют неоднородные механические напряжения. Появление 90-градусных доменов минимизирует поля неоднородных внутренних напряжений.

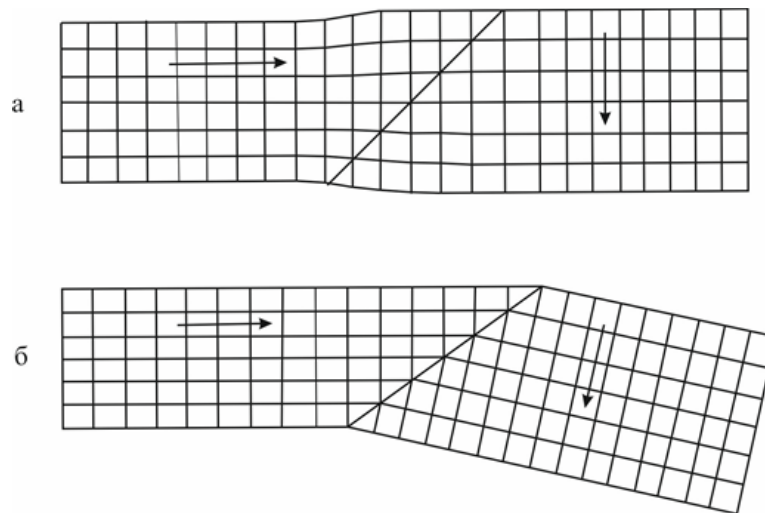


Рис. 2. Деформация кристалла титаната бария, обусловленная наличием в нём 90-градусной доменной стенки: а – переходной слой в окрестности 90-градусной стенки с пониженной тетрагональностью; б – излом свободного кристалла (36 минут) [19].

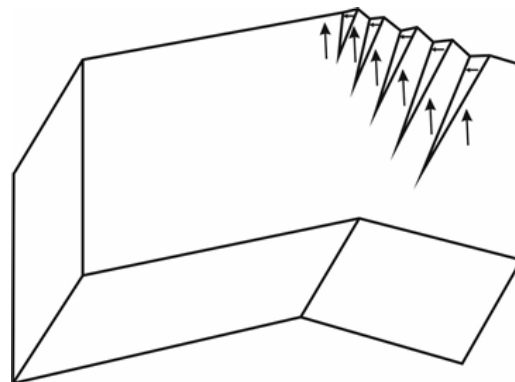


Рис. 3. Деформация сегнетоэлектрической пластинки, содержащей систему 90-градусных доменных клиньев [17].

Механические напряжения, действуя на сегнетоэлектрический кристалл, оказывают существенное влияние на его диэлектрические и пьезоэлектрические свойства. Если приложить к кристаллу внешнее механическое напряжение, которое направлено определенным образом, то спонтанные деформации, существующие в отдельных доменах, могут быть переориентированы. При достаточно больших значениях напряжения кристалл становится монодоменным, а его суммарная деформация достигает насыщения [14]. Наряду с ориентационными эффектами и эффектами искажения, механические напряжения приводят к изменению фазового состояния [20].

Согласно термодинамической теории титаната бария [29], под влиянием механических напряжений возможны 90-градусные переключения доменов. Критические напряжения сжатия вдоль направления $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ (ось с) убывают с приближением к температуре Кюри. По-

этому с нагреванием кристаллов и происходит усложнение системы а-доменов как отражение внутренних механических напряжений. В сборнике, изданном к 25-летию открытия сегнетоэлектрических свойств у титаната бария [23], помещена статья Е.В. Синякова, посвящённая влиянию внешних воздействий на доменную структуру кристаллов BaTiO_3 . В частности, показано влияние одноосного механического сжатия. Рассмотрены два случая. В первом – на а-с-доменный кристалл накладывалось механическое сжатие перпендикулярно кристаллографической плоскости (001), наблюдения велись в этой плоскости. С ростом механического одномерного сжатия увеличивалось число а-доменов, пока весь кристалл не становился а-доменным (без сохранения направления пластинчатых а-доменов вдоль кристаллографического направления [100]. Однако при $\sigma_{33} > 7.4$ МПа наблюдалось появление и развитие поверхностной структуры 90-градусных клиньев, ориентированных вдоль кристаллографического направления $[\bar{1}\bar{1}0]$, по-видимому, обусловленное нарушением однородности давления за счёт неоднородности самого кристалла.

Во втором случае а-с-доменный кристалл сжимается вдоль кристаллографического направления [100] при ориентации линейчатых а-доменов вдоль кристаллографического направления [010], то есть, опять вдоль вектора $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ в а-доменах. При увеличении давления наблюдалось исчезновение а-доменов; вектор спонтанной поляризованности ориентировался в направлении [001] – происходила с-доменизация кристалла. Однако одновременно с этим процессом начинал развиваться второй – появлялись а-домены с ориентацией $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ вдоль кристаллографического направления [010] (при $\sigma_{11} > 3.3$ МПа).

Наиболее интересные экспериментальные результаты были получены при изучении упругопластических процессов в BaTiO_3 под действием локальных механических нагрузок. Сложный вид поля напряжений, возникающих в упругом полупространстве под действием нормальной сосредоточенной силы [24], особенно с учётом пьезоэффекта и граничных условий [25], приводит к появлению целого ряда интересных явлений. Источниками локальных механических нагрузок были как игла на пружине с регулируемым напряжением [26], так и алмазная четырёхгранная пирамидка, используемая в микротвердомере Виккерса [25, 27]. Объектами исследования были а- и с-монодоменные кристаллы различной толщины. В зависимости от величины приложенной нагрузки возможны следующие случаи, по мере её увеличения:

– Напряжённо-деформированная область вокруг точки приложения нагрузки. Возникает, если механические напряжения недостаточны для 90-градусных переориентаций. Она хорошо заметна в скрещенных поляроидах на с-доменных кристаллах в виде четырёх светлых лепестков.

– «Внутренний» 90-градусный домен, не выходящий ни на одну из поверхностей кристалла и не замыкающийся на других доменах [27]. Наблюдался в с-доменных кристаллах для минимальных критических значений механической нагрузки. Кинетика образования этого домена характеризуется стадией «скрытого» зарождения с характерным временем релаксации, причём логарифм времени релаксации линейно зависит от величины, обратной приложенной локальной нагрузке. Время релаксации существенно зависит от изменения механических граничных условий и полупроводниковых свойств кристалла.

– При дальнейшем увеличении механической нагрузки в с-доменном кристалле наблюдается образование а-доменных клиньев от одной из его поверхностей, которые растут

вглубь кристалла [26]. Скорость роста клина вглубь кристалла постепенно замедляется. В зависимости от величины напряжения и длительности его воздействия 90-градусная реориентация может иметь как обратимый, так и необратимый характер. Чем больше механическое напряжение и чем длительнее оно воздействовало, тем большая часть а-доменов не возвращается в исходное состояние после снятия напряжений. Устойчивыми становятся те а-домены, которые прорастают сквозь кристалл и из клиньев превращаются в параллелепипеды. Часто под локальной нагрузкой при её больших значениях образуется не одиночный а-домен, а система пересекающихся а-доменных клиньев.

– Процессы 90-градусной доменной переориентации могут происходить и под действием остаточных механических напряжений [28]. В данной работе описаны образующиеся при локальном деформировании с-доменных кристаллов а-домены в форме тонких дисков, уходящих вглубь кристалла. После снятия механической нагрузки а-доменные клинья релаксируют практически до нуля, а затем в течение 10 минут медленно растут под действием остаточных напряжений.

– Вдоль 90-градусных доменных границ возможен рост трещин, это явление было исследовано при индентировании а-доменных кристаллов BaTiO_3 [29]. Вследствие неоднородного характера деформирования на границах возникают одноимённые электрические заряды, которые способствуют росту трещин за счёт кулоновского отталкивания. Трещины медленно растут под действием остаточных напряжений, их рост замедляется при экранировании заряженных границ носителями зарядов. С этим связано торможение роста трещин фотоактивным освещением, а также его несимметричный характер (наличие основных и неосновных носителей заряда) [29].

Таким образом, под действием локальной механической нагрузки в кристаллах титаната бария наблюдаются сегнетопластический эффект (деформирование кристалла за счёт образования 90-градусных сегнетоэлектрических доменов) и сегнетомеханический эффект (образование и рост трещин по заряженным 90-градусным доменным границам) [29]. Эти эффекты чувствительны к воздействию фотоактивного освещения, обладают свойствами полярности и инверсии.

В ходе проведённых исследований была выдвинута и подтверждена экспериментально гипотеза «о роли кислородных вакансий в процессах экранирования заряженных доменных стенок при 90-градусных доменных переориентациях в с-доменных монокристаллах титаната бария. Восстановительный отжиг кристаллов в присутствии углерода, приводящий к увеличению концентрации кислородных вакансий, создаёт более благоприятные условия для появления «внутреннего» а-домена под локальной механической нагрузкой» [30, 31].

В последние годы активно развивается нанодоменная инженерия, основной задачей которой является создание в сегнетоэлектриках стабильных регулярных доменных структур на новом уровне, например, для изготовления эффективных преобразователей частоты когерентного излучения [32]. Возможно также более подробное изучение термодинамики доменных переориентаций по аналогии с изучением доменных границ в многослойных магнитных структурах [33]. В связи с этим изучение закономерностей формирования доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах и возможность управления ими остаётся важной проблемой материаловедения сегнетоэлектриков. Титанат бария по-прежнему является востребованным материалом для создания мини-

тюрных приборов, теперь уже на новом наноуровне. Получены наночастицы титаната бария, отличающиеся улучшенными электрическими и механическими свойствами [6], они имеют сферическую форму, и при диаметре более 70 нм в них возникает доменная структура. Для изучения доменной структуры наночастиц, скорее всего, будут применяться методы сканирующей зондовой микроскопии, которые уже успешно применяются на кристаллах, выращенных «традиционным» методом Ремейки [2, 3].

Выводы

Сегнетоэлектрики являются одной из самых многочисленных, изученных и практически значимых групп современных интеллектуальных материалов. Титанат бария – наиболее яркий представитель семейства многоосных сегнетоэлектриков. Его применение в настоящее время не ограничивается использованием в качестве диэлектрика при изготовлении керамических конденсаторов или материала для пьезоэлектрических микрофонов и пьезокерамических излучателей. Одним из перспективных направлений изучения и использования этого материала является возможность управления его доменной структурой, которая является чувствительной к электрическим полям, механическим напряжениям и фотоактивному освещению. Особенно интересными являются новые эффекты, сегнетопластический и сегнетомеханический, открытые в монокристаллах титаната бария под действием локальной механической нагрузки. Такие кристаллы остаются «модельными» объектами для проведения аналогий и предсказания возможных закономерностей формирования и изменения доменной структуры сегнетоэлектрической керамики, тонких плёнок и даже сегнетоэлектрических наночастиц. Поэтому обзор научных результатов по влиянию механических напряжений на доменную структуру монокристаллов титаната бария может служить базой для дальнейших исследований.

Литература:

1. Кокцинская Е.М. «Умные» материалы и их применение (обзор). *Видеонаука: сетевой журн.* 2016;1. URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tekhnicheskie-nauki/42-umnye-materialy-i-ikh-primeneniye-obzor>
2. Большакова Н.Н., Большакова О.В., Сергеева О.Н., Педько Б.Б., Бородина В.В., Некрасова Г.М. Кинетика доменных процессов в кристаллах титаната бария. *Химическая термодинамика и кинетика. Сборник докладов VIII Международной научной конференции.* Тверь: Тверской государственный университет, 2018. С. 75-76.
3. Киселев Д.А., Ильина Т.С., Малинкович М.Д., Сергеева О.Н., Большакова Н.Н., Семенова Е.М., Кузнецова Ю.В. Особенности поведения доменной структуры кристаллов $BaTiO_3$ в процессе термического нагрева и охлаждения. *Физика твёрдого тела.* 2018;60(4):734-738. <http://dx.doi.org/10.21883/FTT.2018.04.45684.01D>
4. Широков В.Б., Калинин В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. Материальные константы тонких пленок титаната бария. *Физика твердого тела.* 2015;57(8):1509-1514.
5. Емельянов Н.А., Чаплыгин А.А., Аль Мандалави В.М., Граби З.Х. Особенности фазового перехода в композитном материале на основе наночастиц $BaTiO_3$ с модифицированной поверхностью в матрице полистирола. *«AUDITORIUM». Электронный научный журнал Курского государственного университета.* 2014;4:1-4. URL: <http://auditorium.kursksu.ru/pdf/004-001>
6. Емельянов Н.А., Сизов А.С., Яковлев О.В. Структура и свойства наночастиц титаната бария, полученных термической обработкой пероксидного прекурсора. *Учёные записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета.* 2013;4(28):1-5
7. Курчатов И.В. Избранные труды: в 3 т. Т.1 Сегнетоэлектричество. М.: Наука, 1982. 391 с.
8. Ржанов А.А. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик. *Успехи физических наук.* 1949;XXXVIII(8):461-489. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0038.194908a.0461>
9. Титанат бария. М.: Наука, 1973. 264 с.
10. Бурсиан Э.В. Нелинейный кристалл. Титанат бария. М.: Наука, 1974. 295 с.

11. Рудяк В.М. Процессы переключения в нелинейных кристаллах. М.: Наука, 1986. 248 с.
12. Физика сегнетоэлектрических явлений, под ред. Г.А. Смоленского. Л.: Наука, 1985. 396 с.
13. Желудев И.Г., Шувалов Л.А. Ориентация доменов и макросимметрия свойств сегнетоэлектрических кристаллов. *Изв. АН СССР. Сер. физич.* 1957;21(2):264-274.
14. Гриднев С.А. Сегнетоэластические кристаллы: основные свойства, влияние дефектов. *Природа*. 2002;6:22-29.
URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/06_02/SEIGN.HTM
15. Remeika J.P., Jackson W.M. A Method for Growing Barium Titanate Single Crystals. *J. Amer. Chem. Soc.* 1954;76(3):940-941.
<https://doi.org/10.1021/ja01632a107>
16. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. Монография. М.: Мир, 1965. 554 с.
17. Барфут Дж. Введение в физику сегнетоэлектрических явлений. М.: Мир, 1970. 278 с.
18. Burfoot Jack C. *Ferroelectrics. An introduction to the Physical Principles.* New York: Van Nostrand; 1967. 261 p.
19. Никифоров И.Я., Мальцев Ю.Ф., Бородин В.З. Исследование сегнетоэлектрических кристаллов на трехкристальном рентгеновском спектрометре. *Кристаллография*. 1973;18(5):1018-1022.
20. Bhide V.G., Barat N.J. Interferometric Study of the Microtopography Arising out of 90° Domain Walls in Single Crystals of Barium Titanate. *J. Appl. Phys.* 1963;34(1):181-188.
<https://doi.org/10.1063/1.1729063>
21. Forsbergh P.W. Jr. Domain Structures and Phase Transitions in Barium Titanate. *Phys. Rev.* 1949;76(8):1187-1201.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1187>
22. Пикалев Э.М., Дорошенко В.А., Алёшин В.И. Фазовое состояние кристалла титаната бария при сильных механических напряжениях. Сегнетоэлектрики при внешних воздействиях. Л.: Изд. ФТИ АН СССР, 1981. С. 65-76.
23. Сняжков Е.В. Влияние внешних воздействий на доменную структуру и процессы поляризации монокристаллов титаната бария. В кн.: Титанат бария. М.: Наука, 1974. С. 50-59.
24. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. С. 13-14.
25. Borodina V.V., Kramarov S.O., Madorsky V.V., Rozin L.G. Effect of the boundary conditions on the local deformation of BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1995;172:141-150.
<https://doi.org/10.1080/00150199508018467>
26. Богданов С.В. К вопросу о влиянии механической нагрузки на ориентацию доменов в монокристаллах BaTiO₃. *Кристаллография*. 1962;7(5):755-760.
27. Grekov A.A., Kramarov S.O., Borodina V.V. Dynamics of the local deformation of c-domain BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1994;160(1):165-176.
<https://doi.org/10.1080/00150199408007706>
28. Греков А.А., Крамаров С.О., Розин Л.Г., Англада Х. Влияние фотоактивного освещения на рост трещин в кристаллах BaTiO₃. *Кристаллография*. 1993;38(1):247-249.
29. Крамаров С.О., Бородина В.В., Шкондин И.А. Новые эффекты в многоосных сегнетоэлектрических кристаллах типа BaTiO₃ под воздействием локальных механических и электрических полей. *Известия Академии наук. Серия физическая*. 2000;64(6):1121-1128.
30. Приседский В.В. Кинетика релаксации кислородных вакансий в титанате бария. Химическая термодинамика и кинетика. Сборник докладов VII Международной научной конференции. Великий Новгород, 2017. С. 241-242.
31. Бородина В.В. К вопросу о влиянии кислородных вакансий на динамику доменной структуры в монокристаллах титаната бария. *Евразийское Научное Объединение*. 2020;3-1(61):17-20.
URL: <https://esa-conference.ru/wp-content/uploads/files/pdf/Borodina-Veronika-Viktorovna.pdf>
32. Стефанович Л.И., Мазур О.Ю. Формирование доменных структур в сегнетоэлектриках в сильнонервновесных условиях под влиянием внешних воздействий. Дніпро: Середняк Т. К., 2019. 100 с. ISBN 978-617-7761-44-9.
URL: https://www.researchgate.net/publication/332802272_Formirovanie_domennyh_struktur_v_segnetoelektrikah_v_silnoneravnovesnyh_usloviah_pod_vlianiem_vnesnih_vozdejstvij
33. Морозов А.И., Сигов А.С. Новый тип доменных границ в многослойных магнитных структурах. *УФН*. 1999;169(8):922-924.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0169.199908h.0922>

References:

1. Koktsinskaya E.M. "Smart" materials and their application (review). Videonauka: setevoy zhurnal = Videonauka. 2016;1. (in Russ.).
URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tekhnicheskie-nauki/42-umnye-materialy-i-ikh-primenenie-obzor>
2. Bol'shakova N.N., Bol'shakova O.V., Sergeeva O.N., Ped'ko B.B., Borodina V.V., Nekrasova G.M. Kinetics of domain processes in barium titanate crystals. In: *Khimicheskaya termodinamika i kinetika. Sbornik докладов VIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii.* (Chemical thermodynamics and kinetics. Collection of reports of the VIII International Scientific Conference). Tver': Tverskoi gosudarstvennyi universitet Publishing House; 2018. P. 75-76 (in Russ.).

3. Kiselev D.A., Ilina T.S., Malinkovich M.D., Sergeeva O.N., Bolshakova N.N., Semenova E.M., Kuznetsova Yu.V. Specific features of the domain structure of BaTiO₃ crystals during thermal heating and cooling. *Phys. Solid State*. 2018;60(4):738-742. <https://doi.org/10.1134/S1063783418040157>
4. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoi R.A., Yuzyuk Y.I. Material constants of barium titanate thin films. *Phys. Solid State*. 2015;57(8):1535-1540. <https://doi.org/10.1134/S1063783415080302>
5. Emelianov N.A., Chaplygin A.A., Al Mandalavi V.M., Grabi Z.H. Features of phase transition in composite material based on BaTiO₃ nanoparticles with modified surface in polystyrene matrix. «AUDITORIUM». *Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta = «AUDITORIUM». An electronic scientific journal of Kursk state University*. 2014;4:1-4 (in Russ.). URL: <http://auditorium.kursksu.ru/pdf/004-001>.
6. Emelianov N.A., Sizov A.S., Yakovlev O.V. Structure and properties of barium titanate nanoparticles obtained by heat treatment of a peroxide precursor. *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific notes. The online academic journal of Kursk state University*. 2013;4(28):5 p. (in Russ.).
7. Kurchatov I.V. *Izbrannye trudy v trekh tomakh. T. 1 Segnetoelektrichestvo* (Selected works in 3 v. V. 1 Ferroelectricity). Moscow: Nauka Publ.; 1982. 391 p. (in Russ.).
8. Rzhanov A.V. Barium titanate is a new ferroelectric. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1949;38(8):461-489 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0038.194908a.0461>
9. *Titanat Bariya* (Barium titanate). Moscow: Nauka Publ.; 1973. 264 p. (in Russ.).
10. Bursian E.V. *Nelineinyi kristall. Titanat bariya* (Nonlinear crystal. Barium titanate). Moscow: Nauka Publ.; 1974. 295 p. (in Russ.).
11. Rudyak V.M. *Protsessy pereklyucheniya v nelineinykh kristallakh* (Switching processes in nonlinear crystals). Moscow: Nauka Publ.; 1986. 248 p. (in Russ.).
12. Smolenskii G.A. (Ed.). *Fizika segnetoelektricheskikh yavlenii* (Physics of ferroelectric effects). Leningrad: Nauka Publ.; 1985. 396 p. (in Russ.).
13. Zheludev I.G., Shuvalov L.A. The orientation of the domains and macrosymmetry of ferroelectric crystals. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical series*. 1957;21(2):264-274 (in Russ.).
14. Gridnev S.A. Ferroelastic crystals: basic properties, influence of defects. *Priroda = Nature*. 2002;6:22-29 (in Russ.). URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/06_02/SEIGN.HTM
15. Remeika J.P., Jackson W.M. A Method for Growing Barium Titanate Single Crystals. *J. Amer. Chem. Soc.* 1954;76(3):940-941. <https://doi.org/10.1021/ja01632a107>
16. Iona F., Shirane D. *Segnetoelektricheskie kristally* (Ferroelectric crystals). Moscow: Mir; 1965. 554 p. (in Russ.).
17. Burfoot Jack C. Ferroelectrics. An introduction to the Physical Principles. New York: Van Nostrand; 1967. 261 p.
18. Fousek J., Safrankova M. On the equilibrium domain structure of BaTiO₃. *Jap. J. Appl. Phys.* 1965;4(6):403-408. <https://doi.org/10.1143/JJAP.4.403>
19. Nikiforov I.Ya., Mal'tsev Yu.F., Borodin V.Z. Investigation of ferroelectric crystals on a three-crystal X-ray spectrometer. *Kristallografiya = Crystallography*. 1973;18(5):1018-1022 (in Russ.).
20. Bhide V.G., Barat N.J. Interferometric Study of the Microtopography Arising out of 90° Domain Walls in Single Crystals of Barium Titanate. *J. Appl. Phys.* 1963;34(1):181-188. <https://doi.org/10.1063/1.1729063>
21. Forsbergh P.W. Jr. Domain Structures and Phase Transitions in Barium Titanate. *Phys. Rev.* 1949;76(8):1187-1201. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1187>
22. Pikalev E.M., Doroshenko E.M., Aleshin V.I. *Phase state of a barium titanate crystal under strong mechanical stresses. In: Segnetoelektriki pri vneshnikh vozdeistviyakh* (Ferroelectrics under external influences). Leningrad: FTI AN SSSR Publ.; 1981. P. 65-76 (in Russ.).
23. Sinyakov E.V. Influence of external influences on the domain structure and polarization processes of barium titanate single crystals. In: *Titanat Bariya* (Barium titanate). Moscow: Nauka Publ.; 1973. P. 50-59 (in Russ.).
24. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktnogo razrusheniya* (Contact fracture mechanics). Moscow: Nauka Publ.; 1989. P. 13-14 (in Russ.).
25. Borodina V.V., Kramarov S.O., Madorsky V.V., Rozin L.G. Effect of the boundary conditions on the local deformation of BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1995;172(1):141-150. <https://doi.org/10.1080/00150199508018467>
26. Bogdanov S.V. On the influence of mechanical load on the orientation of domains in BaTiO₃ single crystals. *Kristallografiya = Crystallography*. 1962;7(5):755-760 (in Russ.).
27. Grekov A.A., Kramarov S.O., Borodina V.V. Dynamics of the local deformation of c-domain BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1994;160(1):165-176. <https://doi.org/10.1080/00150199408007706>
28. Grekov A.A., Kramarov S.O., Rozin L.G., Jose Anglada-Rivera. Effect of photoactive lighting on crack growth in BaTiO₃ crystals. *Kristallografiya = Crystallography*. 1993;38(1):247-249 (in Russ.).

29. Kramarov S.O., Borodina V.V., Shkondin I.A. New effects in multiaxial ferroelectric crystals of BaTiO₃ type under the influence of local mechanical and electric fields. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of Russian Academy of Science: Physics*. 2000;64(6):1121-1128 (in Russ.).

30. Prisedskii V.V. Relaxation kinetics of oxygen vacancies in barium titanate. In: *Khimicheskaya termodinamika i kinetika. Sbornik докладов VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. (Chemical thermodynamics and kinetics. Collection of reports of the VII International Scientific Conference). Velikii Novgorod; 2017. P. 241-242 (in Russ.).

31. Borodina V.V. K voprosu o vliyani kislородnykh vakansij na dinamiku domennoy struktury v monokristallah titanata bariya. *Evrasijskoe Nauchnoe Ob'edinenie*. 2020;3-1(61):17-20 (in Russ.).

URL: <https://esa-conference.ru/wp-content/uploads/files/pdf/Borodina-Veronika-Viktorovna.pdf>

32. Stefanovich L.I., Mazur O.Yu. *Formirovanie domennykh struktur v segnetoelektrikakh v sil'noneravnovesnykh usloviyakh pod vliyaniem vneshnikh vozdeistvii* (Formation of domain structures in ferroelectrics under strongly nonequilibrium conditions under the influence of external influences). Dnipro: Serednyak T.K. Publ.; 2019. 100 p. (in Russ.). ISBN 978-617-7761-44-9.

URL: https://www.researchgate.net/publication/332802272_Formirovanie_domennykh_struktur_v_segnetoelektrikakh_v_sil'noneravnovesnykh_usloviyakh_pod_vliyaniem_vneshnikh_vozdeistvii

33. Morosov A.I., Sigov A.S. New type of domain boundaries in multilayer magnetic structures. *Phys. Usp.* 1999; 42(8):827-830.

<https://doi.org/10.1070%2FPU1999v042n08ABEH000586>

Об авторах:

Бородина Вероника Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин Института водного транспорта им. Г.Я. Седова, филиала Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова (344006, Ростов-на-Дону, улица Седова, д. 8). <https://orcid.org/0000-0002-7142-333X>

Крамаров Сергей Олегович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Сургутского государственного университета (628412, Сургут, пр. Ленина, д. 1). <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

About the authors:

Veronika V. Borodina, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), associate Professor of the Department of mathematics, natural science and general professional disciplines, Sedov Water Transport Institute - the branch of Admiral Ushakov State Maritime University (8, Sedov str., Rostov-on-Don 344006, Russia). <https://orcid.org/0000-0002-7142-333X>

Sergey O. Kramarov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Scientist of Surgut State University (1, Lenin Ave., Surgut 628412, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

Поступила: 01.06.2020; Получена после доработки: 15.06.2020; Принята к опубликованию: 06.07.2020