

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.3.6>

УДК: 537.9

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА И ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА НА МАКРО- И МИКРОМАСШТАБЕ РАЗМЕРОВ

В.В. Коледов^{1,2}, В.Г. Шавров^{1,2}, М.С. Быбик¹, В.С. Калашников¹, А.В. Несоленов¹, А.П. Орлов¹, Д.Д. Кузнецов¹, С.В. Фонградовски^{1,2}, А.П. Каманцев^{1,2}, Г.А. Шандрюк³,
А. Peláiz-Barranco⁴, К.П. Андрушин⁵, Е.И. Ситало⁵, И.П. Малашин^{1,6}

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

² НТУ Сириус, 354340, Краснодарский край, пгт. Сочи, Олимпийский пр. 1

³ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, 119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 29

⁴ Ferroic Materials Group, Physics Faculty – IMRE, Havana University, San Lázaro y L,
Vedado, 10400, La Habana, Cuba

⁵ Южный Федеральный Университет, 344006, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая,
105/42

⁶ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, корп. 1

Статья поступила в редакцию 10 января 2022

Аннотация. Изготовлены и охарактеризованы образцы сегнетоэлектрических функциональных материалов на основе цирконата-титаната свинца с химической формулой $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3$ (PZT) и триглицинсульфата $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$ (TGS). Методами диэлектрической спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в образцах подтверждено наличие фазовых переходов (ФП) и определены их характерные температуры. Методами термомеханического анализа (ТМА) вблизи ФП изучены термоиндуцированные деформации. Эффект памяти формы (ЭПФ) в макрообразцах изучен методом трехточечного изгиба. Отработаны методы изучения ЭПФ и электрокалорического эффекта (ЭКЭ) на микромасштабе размеров образцов. Исследован процесс формирования в этих

образцах микроструктур в виде «микростолбиков» (“micropillars”) методом селективного ионного травления фокусированным ионным пучком (ФИП). Изучен процесс деформирования «микростолбиков» с диаметром от 120 нм до 1 мкм из сегнетоэлектрических материалов при помощи микроиглы, закрепленной на наноманипуляторе Kleidiek в вакуумной камере двухлучевого сканирующего микроскопа CrossBeam Neon 40 EsB.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, функциональные материалы, фазовый переход, микроструктуры, сегнетоэлектрические кристаллы, электрокалорический эффект, микростолбики, микроигла, наноманипулятор.

Abstract. Samples of ferroelectric functional materials based on lead zirconate titanate with the chemical formula $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3$ and triglycine sulfate $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$ were manufactured and characterized. The dielectric spectroscopy and differential scanning calorimetry confirmed the presence of phase transitions in them, and the characteristic transition temperatures were determined. Thermomechanical analysis method has been used to study thermally induced deformations in them, near phase transitions. The shape memory effect (SME) and electrocaloric effect on macro samples were studied. Methods of studying the SME on the microscale of sample sizes have been worked out. The process of formation of microstructures in these materials in the form of «micropillars» («micropillars») by selective ion etching with a focused ion beam is investigated. The process of deformation of «micro-pillars» with a diameter from 120 nm to 1 micron from ferroelectric materials using a microneedle mounted on a Kleidiek nanomanipulator in the vacuum chamber of a two-beam scanning microscope CrossBeam 1540 EsB has been studied.

Key words: Ferroelectrics, functional materials, phase transition, microstructures, ferroelectric crystals, micro-columns, microneedles, nanomanipulator

Финансирование: Исследование выполнено в рамках госзадания при частичной поддержке РФФИ, гранты № 18-57-34002 и 20-37-51005.

Автор для переписки: Быбик Мария Сергеевна, ne.znachit.nichego@mail.ru

Введение

Исследованию ЭПФ и других эффектов, сопровождающих ФП в сегнетоэлектрических материалах и мультиферроиках посвящено много работ. Следует отметить, что в последнее время в этой области намечаются серьезные прорывы. Особо интересны работы, связанные с изучением функциональных свойств релаксорных сегнетоэлектриков, которые признаны особо перспективными для изучения ЭПФ и ЭКЭ [1]. Опубликовано несколько обзоров, в частности [2], где рассматривается ЭПФ в сегнетоэлектриках в наномасштабе. Благодаря различию симметрии кристаллических структур до и после ФП в перовскитных сегнетоэлектрических оксидах (таких как кубическая, тетрагональная и ромбоэдрическая и пр.) может наблюдаться ЭПФ наряду с параэлектрическим, сегнетоэлектрическим, ЭКЭ и антисегнетоэлектрическими эффектами. При приложении электрического поля в процессе ФП происходит переориентация полярных доменов, которая и обуславливает макроскопическую деформацию образца. По сравнению с ЭПФ в интерметаллических сплавах восстанавливаемая деформация макроскопических сегнетоэлектриков несколько ниже, порядка 1%. Однако проявления ЭПФ под действием электрического поля привлекает своей технологичностью.

Как отмечается в [2] в некоторых мультиферроиках достигаются управляемые гигантские деформации, значительно превышающие деформации в интерметаллических сплавах. Мультиферроик BiFeO_3 (BFO) представляет большой интерес, так как его свойства включают и сегнетоэлектричество и ферромагнетизм [3, 4]. Объемный BFO имеет низкосимметричную ромбоэдрическую структуру с пространственной группой $R3c$. Методом деформирования был изготовлен тетрагональный вариант BFO, и наблюдалось мартенситоподобное превращение в BFO из ромбоэдрической (R) фазы в тетрагональную (T) фазу, вызванное термическим и/или электрическим воздействием. Восстанавливаемая деформация при превращении составляет гигантскую величину – до 14 %, что значительно больше, чем у его объемнокерамического аналога 0,36 %. Это наблюдение

указывает на важность создания образцов малого масштаба размеров для достижения высокопроизводительного электромеханического отклика в сегнетоэлектрических материалах. ЭПФ также изучался в наноразмерных образцах ВФО [5].

Другой прорыв обещают гибридные сегнетоэлектрики. В работе [6] продемонстрирована очень большая деформация сдвига до 21,5 % в гибридном сегнетоэлектрике $C_6H_5N(CH_3)_3CdCl_3$. Это почти на два порядка величины выше, чем у лучших обычных сегнетоэлектрических полимеров и оксидов при температурах вдали от ФП. Эффект достигается за счет переключения неорганических связей. Превосходные электромеханические свойства этих материалов могут проявить себя в миниатюрных устройствах с высокой плотностью энергии.

Пьезоэлектрические оксиды могут генерировать большое напряжение на высокой скорости, но развивают невысокую деформацию. Полимеры, наоборот, дают наибольшую деформацию, но на один-два порядка меньшее механическое напряжение срабатывания (в среднем 2 МПа) [11]. Органо-неорганические гибридные сегнетоэлектрики (ОНГС) состоят из неорганических каркасов, заполненных органическими фрагментами. Они могут использовать преимущества как легкой, гибкой органической части, так и механически прочный неорганический остов, создающий большие напряжения с высокой выходной удельной мощностью. Ожидается, что пьезоэлектрические отклики некоторых ОНГС превзойдут традиционные оксидные сегнетоэлектрики, такие как $BaTiO_3$ и $Pb(Zr, Ti)O_3$ [7-9].

Остановимся на работах [10, 11], в которых изучаются сегнетоэлектрические керамики с ЭПФ $Na_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3-BaTiO_3$ (NBT-BT). Результаты показывают, что после термообработки под напряжением в керамике NBT-BT остается большая остаточная деформация. После их отжига при температуре выше температуры ФП остаточная деформация восстанавливалась. Максимальная восстанавливаемая остаточная деформация,

наблюдаемая в керамической пластине NBT-BT, составляла примерно 0,37% [10, 11].

За последнее время сильно выросла публикационная активность в области изучения калорических эффектов в сегнетоэлектриках и антисегнетоэлектриках [12], а также мультиферроиках [13]. В этом направлении наибольший интерес вызывают ЭКЭ [14-18], эластокалорический [19, 20], механокалорический [21] и барокалорический [22-24] эффекты. Рассматривается также калорический эффект под влиянием вибраций [25] и калорические эффекты под влиянием химических реакций [26]. Большинство из этих эффектов трудно изучать стандартными методами, особенно на микро- и наномасштабе размеров.

Цель настоящей работы – исследование сегнетоэлектрического ФП в монокристаллах и керамиках различных сегнетоэлектриков методами диэлектрической спектроскопии, ДСК и ТГА, разработка методов изучения характера макроскопических механических деформаций под действием нагрева, механических напряжений и электрического поля в макро- и микроскопических образцах, а также разработка метода измерения ЭКЭ.

Материалы и методы

Основное внимание в данной работе было уделено соединениям PbTiO_3 - PbZrO_3 - $\text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3$ - $\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3$ (PZT) и $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ (TGS). Образцы PZT были получены двухстадийным твердофазным синтезом с последующим спеканием по традиционной керамической технологии. В качестве исходных реагентов использовали оксиды и карбонаты металлов следующих составов: PbO , TiO_2 , Nb_2O_5 , ZrO_2 , ZnO , MgO , SrCO_3 , BaCO_3 . Для измерения электрофизических параметров образцы PZT были изготовлены в виде дисков ($\text{Ø } 10 \times 1,0$ мм). Обработку поверхности проводили алмазным инструментом в соответствии с классом точности 6. Металлизацию проводили двойным обжигом серебряносодержащей пасты при температуре $T = 1073$ К в течение 0,5 часа. Измерение электрофизических параметров выполнено с использованием прецизионных LCR-измерителей Agilent 4980A, Wayne Kerr

6500 В включая измерения относительной диэлектрической проницаемости неполяризованного (ϵ'/ϵ_0) и поляризованного (ϵ''/ϵ_0) образцов.

Типичные графики температурной зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'/ϵ_0 и ϵ''/ϵ_0 выбранного образца PZT представлены на рис. 1. По данным диэлектрических измерений в этих образцах ФП наблюдается вблизи 400 К.

Для измерения ЭКЭ была разработана установка на основе дифференциальной схемы измерения температуры двух образцов (см. рис. 2а), к которым поочередно подключается источник напряжения 0...1000 В. Общий вид измерительной ячейки с двумя образцами в термостате представлен на рис. 2б: O_1 и O_2 – первый и второй образец соответственно, ТП – термопара. Типичная временная зависимость ЭКЭ от времени представлена на рис. 2в. Характерное значение ЭКЭ в данном эксперименте составляет всего 0,02 °С, однако чувствительность данного метода составляет 10^{-3} °С.

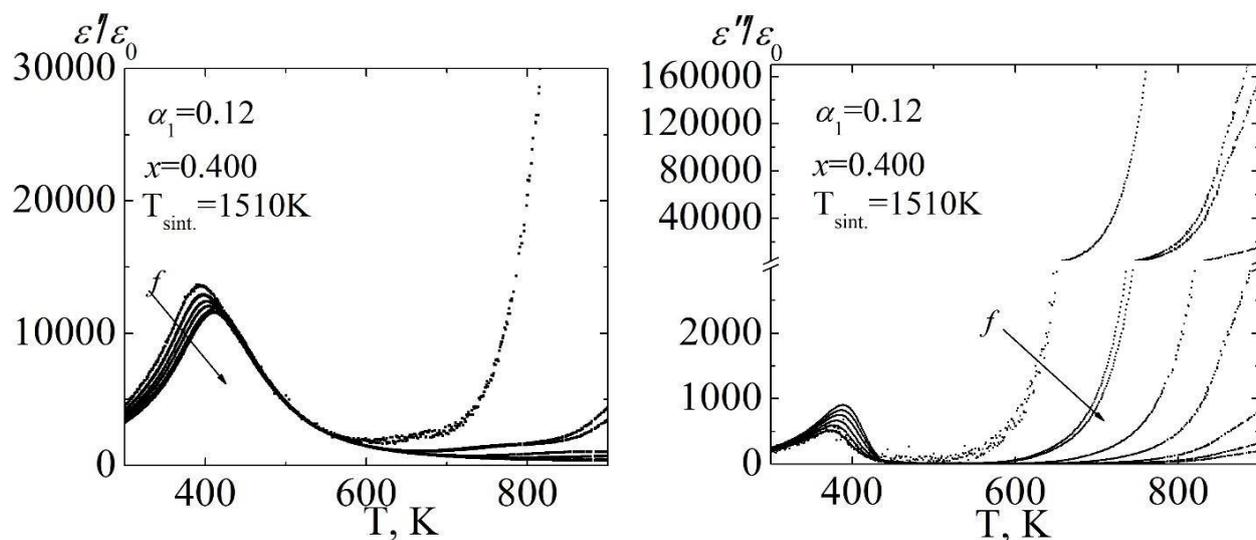


Рис. 1. Зависимости ϵ'/ϵ_0 (Т) (слева) и ϵ''/ϵ_0 (Т) (справа) в частотном диапазоне $f = (25-10^6)$ Гц для образца PZT в режиме охлаждения.

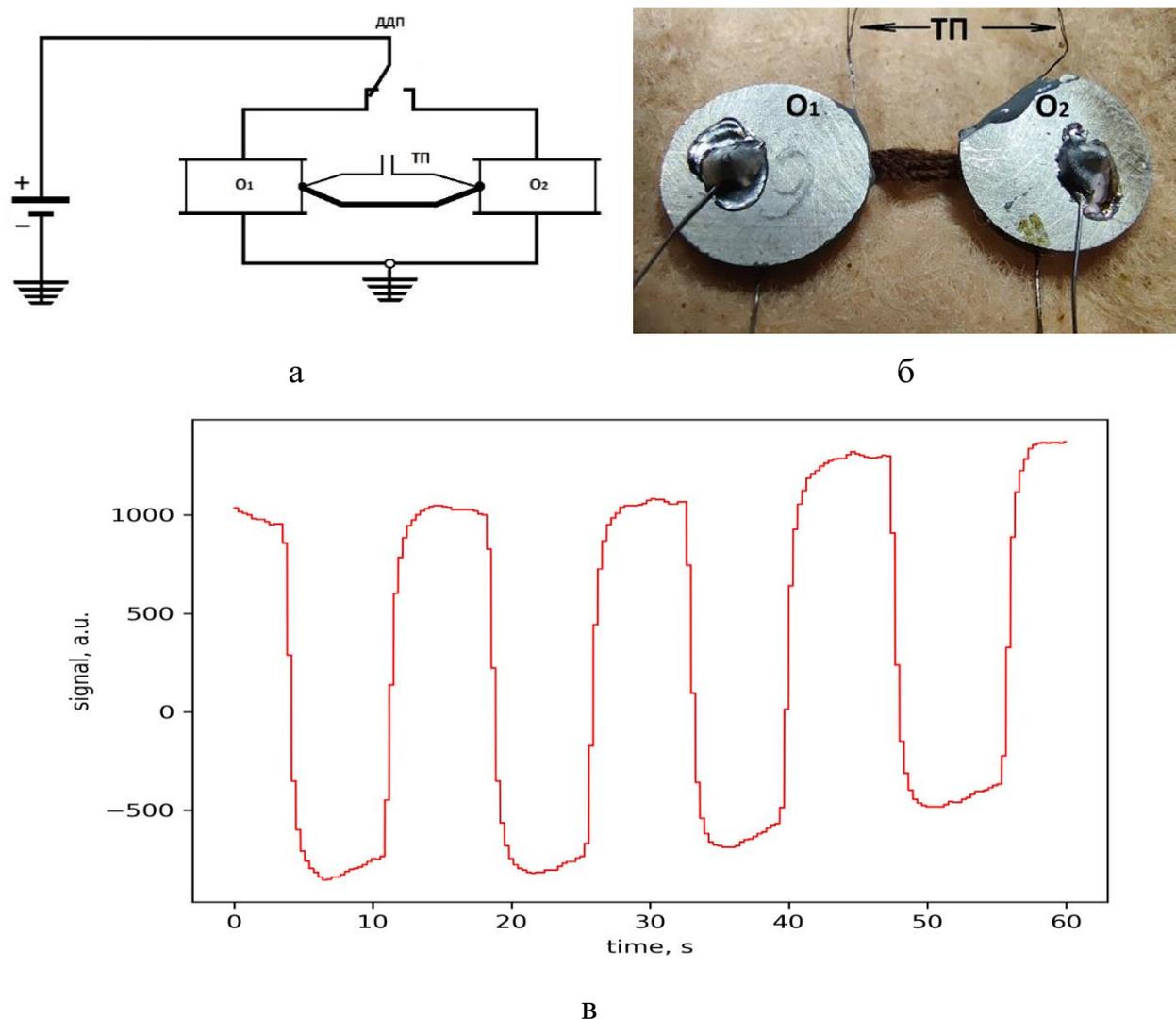


Рис. 2. Измерение ЭКЭ в образцах PZT. (а) – блок схема установки. На схеме обозначены: ДДП – двухполюсный двунаправленный переключатель, O₁ и O₂ – первый и второй образец соответственно, ТП – термопара. (б) – общий вид измерительной ячейки с двумя образцами в термостате. (в) – типичная временная зависимость показаний дифференциальной термопары при поочередном подключении напряжения в образцы O₁ и O₂.

Также в данной работе исследованы монокристаллические образцы (одноосный кристалл) триглицинсульфата TGS, который представляет собой сегнетоэлектрик с ФП второго рода типа порядок-беспорядок при температуре 49 °С [27-29]. Кристаллы TGS ниже ФП принадлежат к полярной группе P2₁ и, следовательно, являются не только сегнетоэлектрическими, но и пьезоэлектрическими при комнатной температуре. При ФП точечная группа симметрии изменяется с 2/m на 2. Величина спонтанной поляризации составляет 2,8 мкКл/см² при 20 °С. Полярная ось лежит вдоль моноклинной (2-

го порядка) оси b (то есть направлена вдоль b -оси, направление [010]). Выше температуры Кюри TGS имеет моноклинную решетку, которая относится к пространственной группе $C22h - P21/m$.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 3 по данным ТМА и ДСК, ФП в TGS очень близок к переходу 2-го рода. Пик ДСК при нагреве $T_1 = 49,0$ °C, при охлаждении $T_2 = 45,5$ °C (рис. 3в). Площадь под пиками ДСК – скрытая теплота ФП, которая при охлаждении составляет 3,12 Дж/г, а при нагреве – 3,33 Дж/г (рис. 3в).

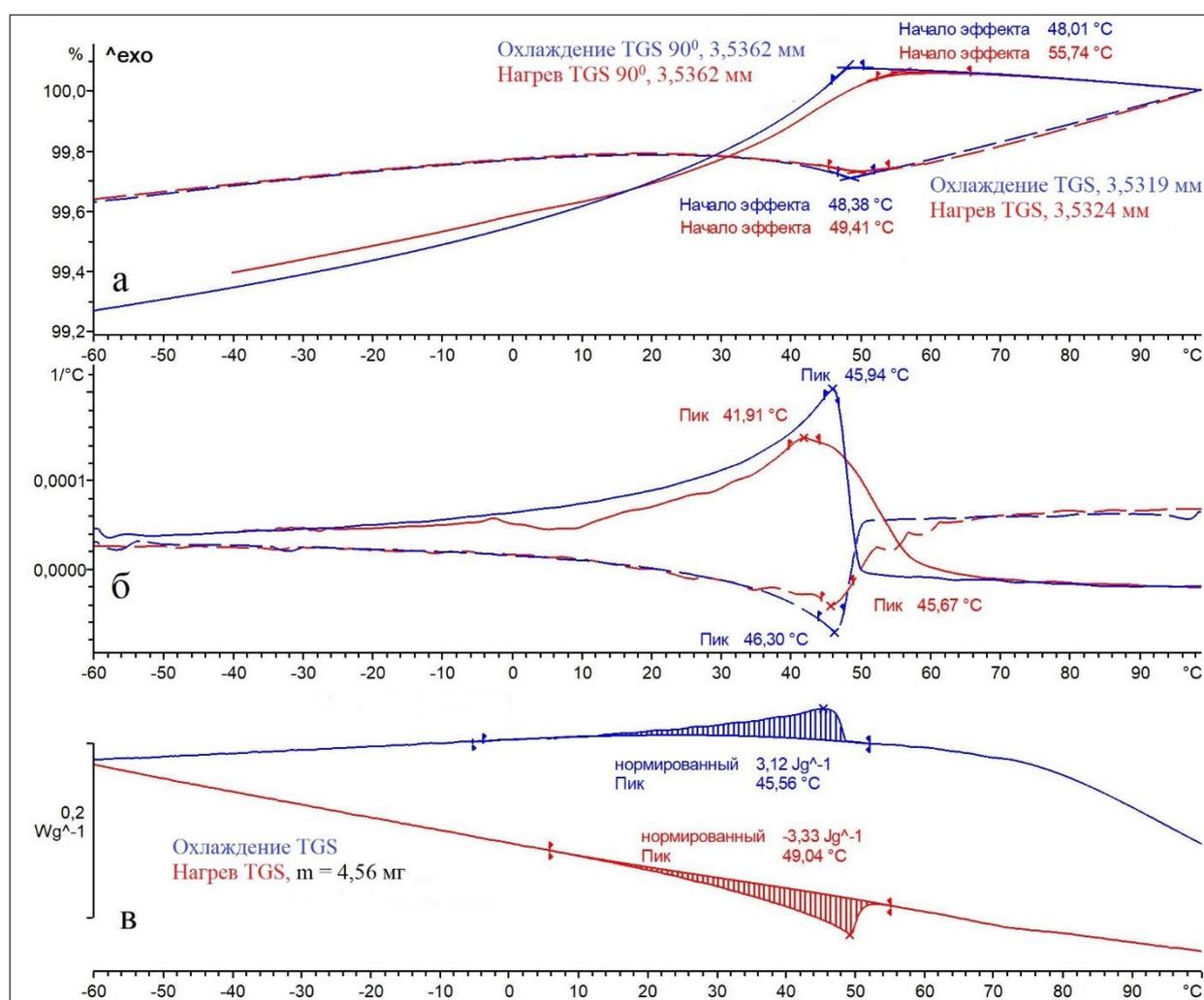


Рис. 3. Термический анализ ФП в образцах TGS, в зависимости от ориентации кристалла: (а) – ТМА: изменение линейного размера (в %) образца при охлаждении и нагреве с ориентацией под углом 90° (верхние кривые) и 0° (нижние кривые); (б) – производная по температуре от данных на верхнем графике; (в) – ДСК, по площади под пиками посчитана скрытая теплота ФП.

Величина и знак спонтанной деформации по данным ТМА зависит от ориентации кристалла TGS (рис. 3а,б). Такое поведение можно объяснить следующим образом. Сегнетоэлектрический ФП в TGS представляет собой переход типа порядок – беспорядок [28]. Решетка остается моноклинной при переходе в параэлектрическое состояние. При этом кристалл при нагреве и приближении к точке ФП сжимается вдоль сегнетоэлектрической оси b . Напротив, в параэлектрической фазе TGS расширяется, в то же время вдоль осей a и c , наоборот, расширяется в сегнетоэлектрической фазе при нагреве, и начинает сжиматься в параэлектрической фазе [28]. По данным ТМА спонтанная деформация (по модулю) составляет порядка 1% (рис. 3а).

Таким образом, дальнейшее изучение деформаций монокристаллов TGS под действием внешних электрических и механических напряжений вблизи ФП должно прояснить вопрос о существовании в нем ЭПФ. Исследование ЭПФ в диэлектрических материалах началось относительно недавно, с развитием методов микро- и нанотехнологии [30]. Одной из основных причин сравнительно небольшого интереса к ним являлась хрупкость. Этот эффект обусловлен присущими керамике физическими ограничениями, связанными с зёрнами, которые создают области концентрации напряжений, приводящих к межкристаллитным разломам. Статья [31] – первая работа, где было предложено принципиальное направление преодоления проблемы хрупкости на наноуровне. На наноуровне образец приближается к монокристаллу. Показано, что, например, в ZrO с ЭПФ на наноуровне псевдопластические механические напряжения, могут превышать таковые в интерметаллическом сплаве TiNi – до сих пор самом надёжном из интерметаллидов с ЭПФ [31]. На данном этапе работы из образцов сегнетоэлектрических материалов были изготовлены микро- и наноструктуры для испытаний механических свойств и изучения ЭПФ на наноуровне размеров (рис. 4-6). Цель экспериментов заключалась в том, чтобы проверить возможность изготовления «наностолбиков» из сегнетоэлектрических материалов методами селективного ионного травления в установке ФИП, а затем проверить возможность изучения механических свойств микро- и наноструктур

методом деформирования. Поэтапный процесс формирования «наностолбика» толщиной около 500 нм из TGS показан на рис. 4а-г. На рис. 5а,б проиллюстрирован процесс изготовления наностолбиков из TGS толщиной 100–200 нм.

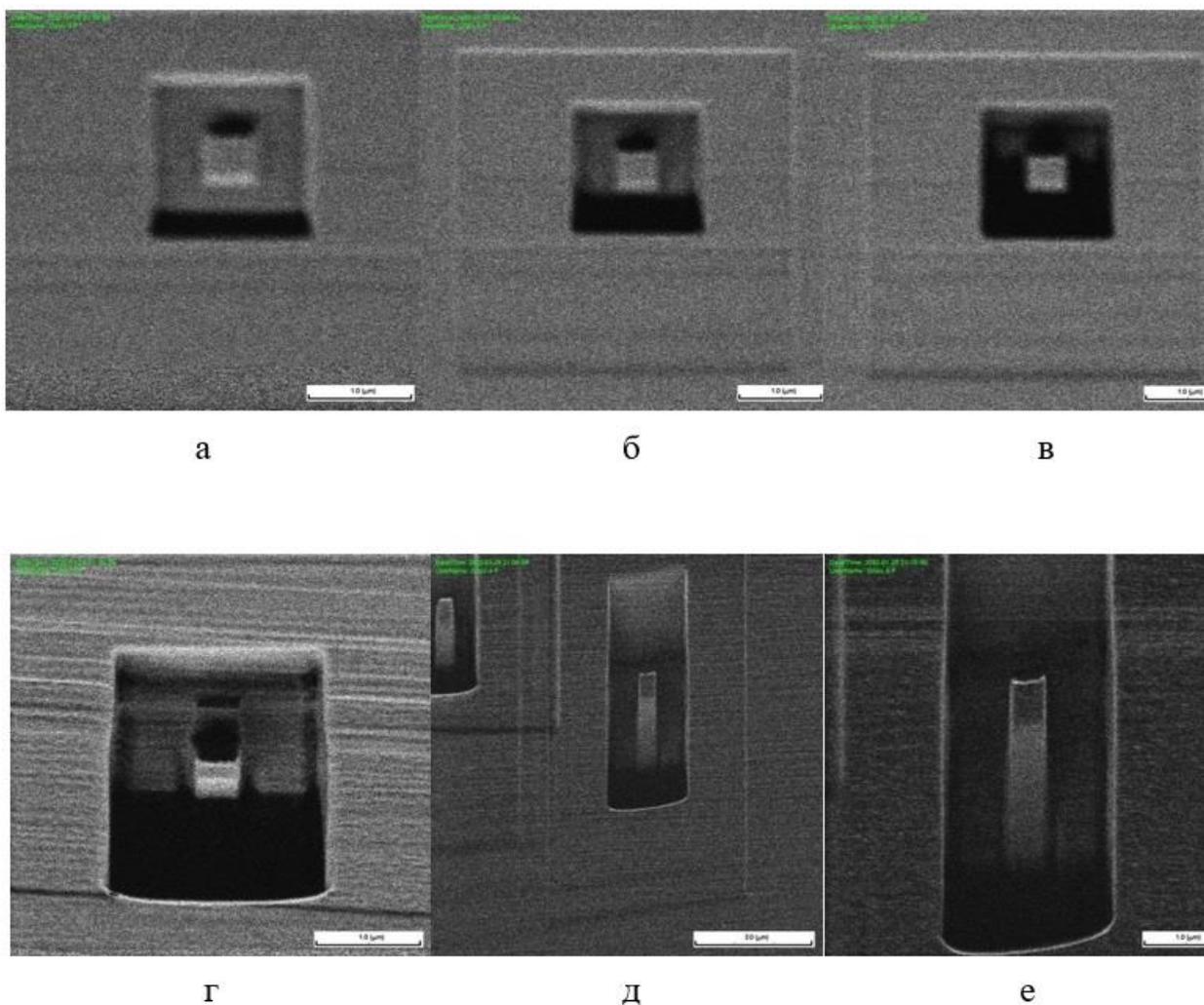


Рис. 4. Процесс формирования «наностолбика» из TGS толщиной около 500 нм.

Отбор уединенного наностолбика и эксперимент по деформации индивидуальных наностолбиков микропроволокой, закрепленной на наноманипуляторе Kleindiek, в вакуумной камере сканирующего двухлучевого микроскопа, проиллюстрирован на рис. 5в,г. Деформирование показано на рис. 5д,е. Деформирование производится для того, чтобы определить область упругости деформации наностолбика, его прочность и оценить качественно, является ли деформация истинно пластической или псевдопластической. Если

образец обладает ЭПФ, то в этом случае возможно 2 варианта: при температуре наблюдения эффекта деформирования выше температуры структурного ФП микропроволокой, закрепленной на наноманипуляторе Kleindiek (рис. 5в-е), будет наблюдаться сверхупругое поведение с обратимым восстановлением формы, а при температуре ниже будет наблюдаться односторонняя память формы, то есть псевдопластический необратимый изгиб. По-видимому, в эксперименте реализуется этот вариант.

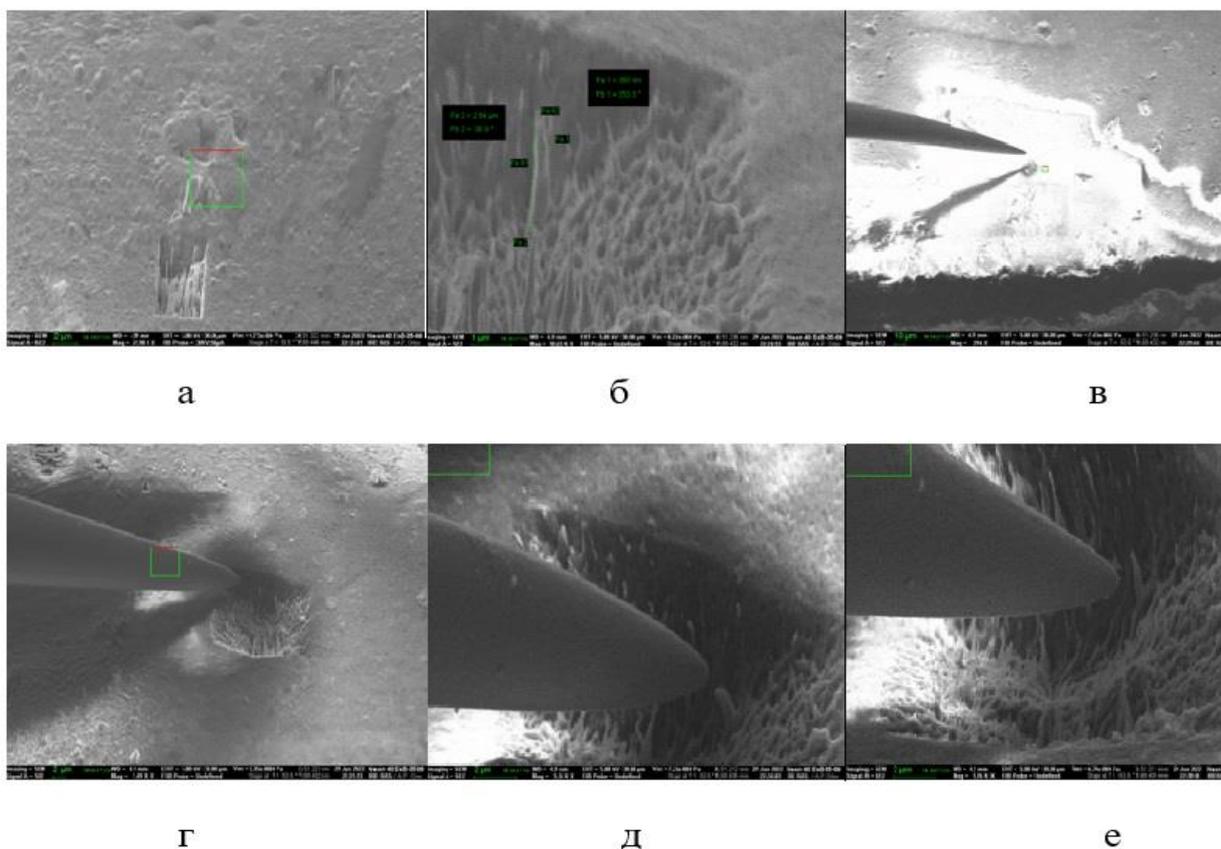


Рис. 5. (а, б) – изготовление наностолбиков толщиной 100 – 200 нм из TGS и (в-е) – деформация индивидуальных наностолбиков из TGS.

На рис. ба-г в деталях показан процесс изготовления и деформирования образца микростолбика из сегнетоэлектрика PZT. Для этого материала также характерно то, что температура ФП выше комнатной температуры. Для качественной проверки вида деформации при комнатной температуре наностолбик изгибался кончиком микропроволоки. Данные многократных экспериментов также совместимы с предположение о наличии односторонней памяти формы.

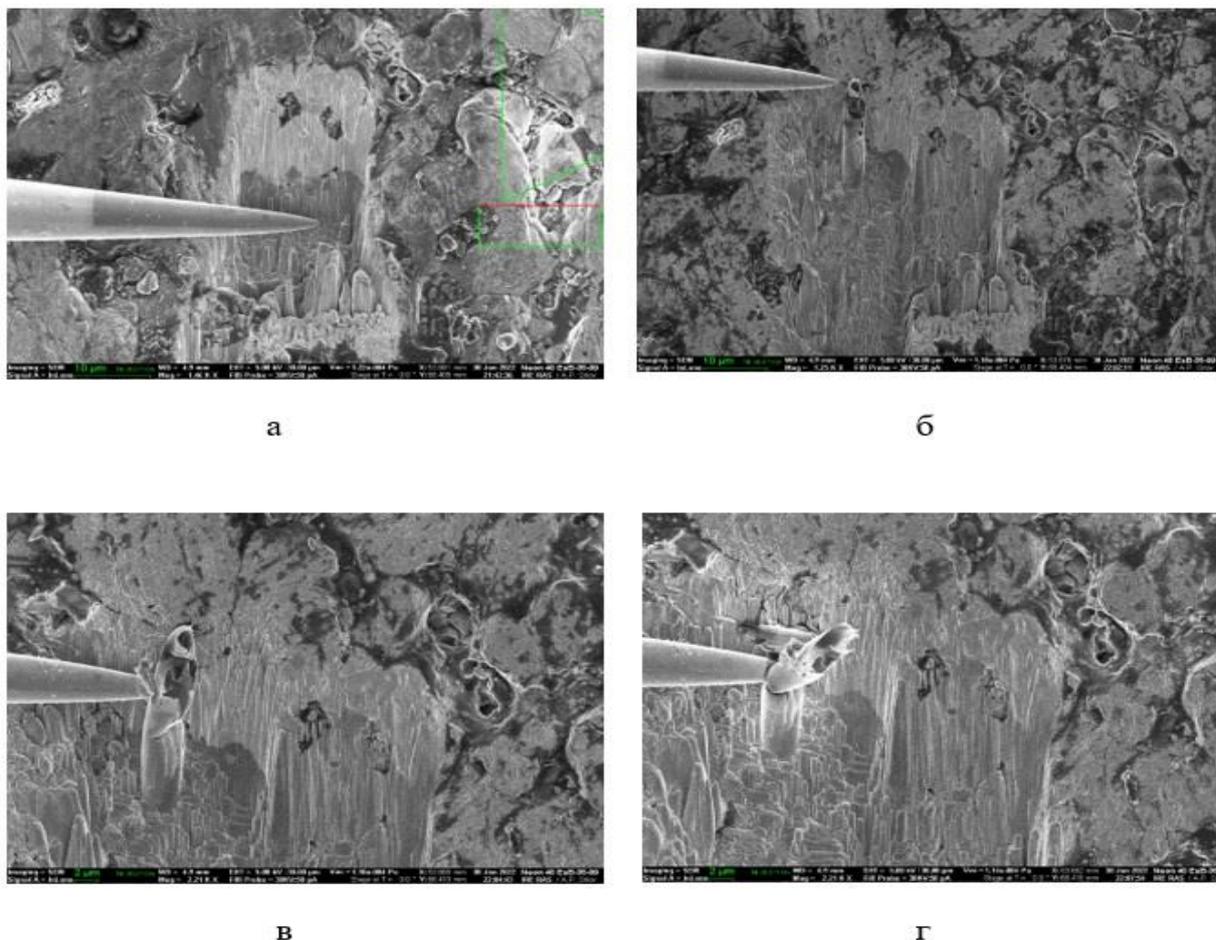


Рис. 6. Отбор и деформирования индивидуального наностолбика из образца функциональной керамики PZT.

Заключение

Таким образом, подробное изучение физико-механических свойств функциональных сегнетоэлектрических материалов PZT и TGS вблизи ФП позволило выявить аномалии, связанные с ФП, в частности эффекты изменения формы. Анализ полученных данных показывает, что сегнетоэлектрические материалы, особенно на субмикронном уровне размеров демонстрируют высокую механическую стабильность и ЭПФ. На их основе, принципиально, возможна разработка микромеханических устройств нового поколения.

Автор для переписки: Быбик Мария Сергеевна, ne.znachit.nichego@mail.ru

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзадания при частичной поддержке РФФИ, гранты № 18-57-34002 и 20-37-51005.

Литература

1. Zhang H., Zhou J., Shen J., Wang T., Xie D., Chen W. Tristate ferroelectric memory and strain memory in $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3$ -based relaxor ferroelectrics. *Applied Physics Letters*. 2018. №113(15). P.152902.
2. Wang X., Ludwig A. Recent Developments in Small-Scale Shape Memory Oxides. *Shape Memory and Superelasticity*. 2020. V.6. №3. P.287-300.
3. Liu W. et al. Electro-shape-memory effect in hybrid doped BaTiO_3 ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2006. V.438. P.350-353.
4. Silva J. et al. BiFeO_3 : a review on synthesis, doping and crystal structure. *Integrated Ferroelectrics*. 2011. V.126. №1. P.47-59.
5. Zeches R. J. et al. A strain-driven morphotropic phase boundary in BiFeO_3 . *Science*. 2009. V.326. №5955. P.977-980.
6. Hu Y. et al. Ferroelastic-switching-driven large shear strain and piezoelectricity in a hybrid ferroelectric. *Nature Materials*. 2021. V. №5. P.612-617.
7. You Y. M. et al. An organic-inorganic perovskite ferroelectric with large piezoelectric response. *Science*. 2017. V.357. №6348. P.306-309.
8. Liao W. Q. et al. A molecular perovskite solid solution with piezoelectricity stronger than lead zirconate titanate. *Science*. 2019. V.363. №6432. P.1206-1210.
9. Tang Y. Y. et al. Multiaxial molecular ferroelectric thin films bring light to practical applications. *Journal of the American Chemical Society*. 2018. V.140. №26. P.8051-8059.
10. Chen P. et al. Shape memory effect in $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ -based ferroelectric ceramics. *Acta Materialia*. 2022. V.223. P.117479.
11. Zhuo F. et al. Giant shape memory and domain memory effects in antiferroelectric single crystals. *Materials Horizons*. 2019. V.6. №8. P.1699-1706.

12. Zhuo F. et al. Perspective on antiferroelectrics for energy storage and conversion applications. *Chinese Chemical Letters*. 2021. V.32. №7. P.2097-2107.
13. Hou H. et al. Ultra-low-field magneto-elastocaloric cooling in a multiferroic composite device. *Nature communications*. 2018. V.9. №1. P.1-8.
14. Hou H., Qian S., Takeuchi I. Materials, physics and systems for multicaloric cooling. *Nature Reviews Materials*. 2022. P.1-20.
15. Khassaf H. et al. Flexocaloric response of epitaxial ferroelectric films. *Journal of Applied Physics*. 2018. V.123. №2. P.024102.
16. Porta M. et al. Flexocaloric effect near a ferroelastic transition. *Physical Review B*. 2021. V.104. №9. P.094108.
17. Patel S. Flexo/elasto-caloric effects in $_{0.66}\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-0.34}\text{PbTiO}_3$ single crystal. *Materials Letters*. 2021. V.287. P.129301.
18. Patel S. Flexocaloric effect in ferroelectric materials: methods of indirect evaluation. *Applied Physics A*. 2021. V.127. №6. P.1-13.
19. Li C. et al. Giant room temperature elastocaloric effect in metal-free thin-film perovskites. *npj Computational Materials*. 2021. V.7. №1. P.1-8.
20. Wang F. et al. Elastocaloric Effect in PbTiO_3 Thin Films with 180° Domain Structure: A Phase Field Study. *Chinese Physics Letters*. 2018. V.35. №3. P.037701.
21. Murillo-Navarro D. E., Graf M., Íñiguez J. Coexisting conventional and inverse mechanocaloric effects in ferroelectrics. *Physical Review B*. 2021. V.104. №18. P.184112.
22. Li J. et al. Colossal Reversible Barocaloric Effects in Layered Hybrid Perovskite $(\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{NH}_3)_2\text{MnCl}_4$ under Low Pressure Near Room Temperature. *Advanced Functional Materials*. 2021. V.31. №46. P.2105154.
23. Mikhaleva E. A. et al. Features of the behavior of the barocaloric effect near ferroelectric phase transition close to the tricritical point. *Crystals*. 2020. V.10. №1. P.51.
24. Lloveras P., Tamarit J. L. Advances and obstacles in pressure-driven solid-state cooling: A review of barocaloric materials. *MRS Energy & Sustainability*. 2021.

V.8. №1. P.3-15.

25. Kumar A. et al. Vibration induced refrigeration using ferroelectric materials. *Scientific reports*. 2019. V.9. №1. P.1-9.
26. Hu Y. et al. Chemically driven energetic molecular ferroelectrics. *Nature communications*. 2021. V.12. №1. P.1-7.
27. Лайнс М., Гласс А. *Сегнетоэлектрики и родственные им материалы*. Москва, Мир. 1981.
28. Смоленский Г. А. *Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики*. Ленинград, Наука. 1971.
29. Hussain A. et al. Mechanical investigations on piezo-/ferroelectric maleic acid-doped triglycine sulphate single crystal using nanoindentation technique. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. V.13. №1. P.1874-1889.
30. Du Z. et al. Size effects and shape memory properties in ZrO₂ ceramic micro-and nano-pillars. *Scripta Materialia*. 2015. V.101. P.40-43.
31. Lai A. et al. Shape memory and superelastic ceramics at small scales. *Science*. 2013. V.341. №6153. P.1505-1508.

Для цитирования:

Коледов В.В., Шавров В.Г., Быбик М.С. и др. Функциональные свойства сегнетоэлектрических материалов на основе цирконата-титаната свинца и триглицинсульфата на макро- и микромасштабе размеров. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.3.6>