

Влияние размеров зерен на температурный гистерезис керамического титаната бария

И. Л. Мыльников^{1✉}, И. П. Сошников^{2,4,5}, А. И. Дедык¹, Ю. В. Павлова¹,
А. С. Анохин^{1,3}, А. В. Еськов¹, П. Ю. Белявский¹, А. С. Антонова¹, А. А. Семенов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Институт аналитического приборостроения
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

✉ mylnikov.il@gmail.com

Аннотация

Введение. Растущая мощность элементной базы современных электронных приборов задает новые стандарты охлаждения устройств. Перспективным методом охлаждения является использование электрокалорического эффекта как самого доступного и простого в реализации среди всех калорических эффектов. Однако тепловые гистерезисные эффекты вблизи точки фазового перехода отрицательно влияют на уровень электрокалорического отклика и, соответственно, на эффективность охлаждения. Также немаловажно требование к экологичности устройств, что не позволяет использовать в качестве материалов свинецсодержащие соединения, в которых электрокалорический эффект достигает больших значений. Альтернативным материалом могут выступать твердые растворы на основе титаната бария, однако изучению температурных гистерезисных явлений в них уделено очень мало внимания.

Цель работы. Исследование температурных гистерезисных явлений в сегнетоэлектрических керамиках.

Материалы и методы. Исследуемые образцы помещаются в жидкостный термостат и проходят цикл "нагрев-охлаждение" с заданной скоростью. По полученным температурным зависимостям диэлектрической проницаемости рассчитывается размер температурного гистерезиса. Оценка среднего размера зерен осуществляется по фотографиям поверхности образцов, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Результаты. Исследовано влияние процессов синтеза на структуру и размеры кристаллитов керамического титаната бария и их диэлектрические свойства. Экспериментально изучена зависимость размеров кристаллитов титаната бария и пористости образцов от температуры спекания. Определена область температур эффективного спекания выше 1320 °С. Исследованы диэлектрические характеристики синтезированных образцов при нагреве и охлаждении. Определены параметры температурного гистерезиса и диэлектрических свойств. Показано, что изменение температурного гистерезиса связано с изменением размеров кристаллитов титаната бария и площади контакта между ними.

Заключение. На основании полученных результатов выдвинуто предположение об оптимальной температуре спекания образцов, при которой материал обладает достаточно хорошими диэлектрическими свойствами, при этом уровень температурного гистерезиса мал.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, титанат бария, температурный гистерезис, размер зерна, электрокалорический эффект

Для цитирования: Влияние размеров зерен на температурный гистерезис керамического титаната бария / И. Л. Мыльников, И. П. Сошников, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова, А. С. Анохин, А. В. Еськов, П. Ю. Белявский, А. С. Антонова, А. А. Семенов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 57–68.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-57-68

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № ФСЕЕ-2022-0017).

Статья поступила в редакцию 27.11.2024; принята к публикации после рецензирования 26.03.2025; опубликована онлайн 30.04.2025



Effect of Grain Sizes on Temperature Hysteresis of Ceramic Barium Titanate

Ivan L. Mylnikov¹✉, Ilya P. Soshnikov^{2,4,5}, Antonina I. Dedyk¹,
Yuliya V. Pavlova¹, Alexander S. Anokhin^{1,3}, Andrej V. Es'kov¹,
Pavel Yu. Belyavskiy¹, Anna S. Antonova¹, Alexander A. Semenov¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Alferov University, St Petersburg, Russia

³ ITMO University, St Petersburg, Russia

⁴ Ioffe Institute, St Petersburg, Russia

⁵ Institute for Analytical Instrumentation
of the Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

✉ mylnikov.il@gmail.com

Abstract

Introduction. The growing power of modern electronic devices imposes stricter requirements on their cooling systems. One promising cooling method employs the electrocaloric effect as the most accessible and simple phenomenon among all caloric effects to implement. However, thermal hysteresis near the phase transition point negatively affects the magnitude of the electrocaloric response and the cooling efficiency. Another important factor is the requirement for environmental friendliness of the devices, which makes the use of lead-containing compounds undesirable despite their pronounced electrocaloric effect. A possible alternative to such materials comprises solid solutions based on barium titanate; however, their temperature hysteresis phenomena are poorly studied.

Aim. Investigation of temperature hysteresis phenomena in ferroelectric ceramics.

Materials and methods. The samples under study were placed in a liquid thermostat to undergo a heating and cooling cycle at a given rate. The value of temperature hysteresis was calculated from the temperature dependencies of dielectric permittivity. The average grain size was estimated using SEM images of the sample surface.

Results. The influence of synthesis processes on the structure and grain size of ceramic barium titanate, as well as its dielectric properties, were studied. Temperature dependencies of the grain size of barium titanate and the porosity of sintered samples were studied experimentally. The temperature range of effective sintering above 1320 °C was determined. Dielectric characteristics of the samples at heating and cooling were studied. The parameters of temperature hysteresis and dielectric properties were determined. Changes in the value of temperature hysteresis were shown to be associated with changes in the grain size of barium titanate and the contact area between the grains.

Conclusion. An assumption about the optimal temperature of sample sintering was made. At this temperature, the material exhibits sufficiently good dielectric properties at a low temperature hysteresis.

Keywords: ferroelectric, barium titanate, temperature hysteresis, grain size, electrocaloric effect

For citation: Mylnikov I. L., Soshnikov I. P., Dedyk A. I., Pavlova Yu. V., Anokhin A. S., Es'kov A. V., Belyavskiy P. Yu., Antonova A. S., Semenov A. A. Effect of Grain Sizes on Temperature Hysteresis of Ceramic Barium Titanate. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 57–68.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-57-68

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The reported study was funded by Ministry of Education and Science of Russian Federation (grant No. FSEE-2022-0017)

Submitted 27.11.2024; accepted 26.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. Проблемы развития техники и технологий современной микро-, нано- и оптоэлектроники во многом связаны с ограничениями тепловых режимов работы приборов и структур [1]. Одним из перспективных направлений решения таких проблем являются систе-

мы охлаждения на структурах с фазовыми переходами второго рода, в частности, электрокалорическом эффекте (ЭКЭ) [2]. Подтверждением актуальности задачи разработки материалов и структур для ЭКЭ-систем охлаждения является рост интереса к ним в последнее время [2, 3].

В настоящее время наибольшая эффективность ЭКЭ показана в таких соединениях, как $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ [4] и $(\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-x}\text{PbTiO}_3)_{1-x}$ [5–7]. Однако свинецсодержащие соединения чрезвычайно опасны для человека и окружающей среды. Поэтому поиск альтернативных материалов является актуальной задачей, на которую, собственно, и направлено исследование, описываемое в данной статье. Хорошими кандидатами являются соединения со структурой перовскита, например титанат бария (BT) и титанат бария-стронция (BST) [8–10]. Особенность сегнетоэлектриков – различное положение точки Кюри при фазовом переходе (ФП) при нагреве и охлаждении. Это явление называется температурным гистерезисом $\Delta T_{\text{гист}}$ [11]. Размер температурного гистерезиса определяется материалом, его составом, структурой и морфологией [12–16]. Однако нельзя говорить только о размере зерен в образцах. Керамическая технология определяет совокупность таких микроструктурных свойств керамики, как плотность и пористость, а также форму зерен и их распределение по размерам [17–20].

Особо следует отметить проблему определения критической температуры синтеза ВТО: по различным данным эта температура варьируется от 1312 до 1337 °C [21]. Указанное различие явно превышает погрешность измерения температуры процесса и может быть связано с неконтролируемыми параметрами или особенностями технологического процесса подготовки материала.

Таким образом, цель научного исследования – изучить влияние режимов изготовления титаната бария на его структуру и температурный гистерезис диэлектрических свойств. В рамках данной работы решались следующие задачи: изготовление керамик BT при разных температурах спекания, исследование их структурных и диэлектрических свойств для определения размера температурного гистерезиса в данных образцах.

Методика эксперимента. Образцы керамического титаната бария изготавливались методом, который включает предварительную термообработку, мокрый помол, прессование и заключительную термообработку. Исходным материалом служил порошок титаната бария производства компании TOSHIMA (Япония) с размером зерен 0.2...1 мкм. Предварительная термообработка порошка проводилась при температуре 1200 °C в течение 2 ч в муфельной печи ЭКПС-10 в условиях воздушной атмосферы. Далее следовал мокрый помол в изопропиловом спирте на планетарной мельнице Fritsch PULVERISETTE 7 при частоте вращения 800 мин⁻¹ в течение 20 мин. Затем порошок прессовался в диски диаметром 12 мм и толщиной 1.5 мм при давлении 6000 кг/см². Спекание полученных образцов осуществлялось в камерной электропечи ПБК-1.6-12 при температурах 1200...1450 °C (со скоростью нагрева 4 К/мин) в воздушной атмосфере в течение 1 ч. Осуществлялся тщательный контроль температуры: помимо стандартных замеров с помощью термометров (пирометров) рядом с образцами располагались контрольные кольца FERRO-STH с памятью формы. Измерение диаметра колец до и после отжига выполнялось с точностью до 0.01 мм, что позволяло оценивать максимальную температуру нагрева в пределах 1000...1500 °C с погрешностью не хуже 1 °C.

Исследования морфологии поверхности и поперечного сечения образцов проводились с помощью растрового электронного микроскопа Supra25 C.Zeiss, оборудованного детектором рентгеновского излучения Ultim Oxford Instruments Inc.

Пористость керамики определялась методом гидростатического взвешивания на лабораторных весах PX-224 OHAUS Pioneer. Полученные значения пористости составляли ~15 % для образцов с температурой обжига 1200...1325 °C и ~2...5 % для образцов с температурой спекания 1350...1450 °C.

Исследования диэлектрических характеристик при различных температурах проводились при помощи прецизионного измерителя LCR Keysight (Agilent) E4980A в термостате Julabo F32. Сначала образец нагревали до 150 °C, поддерживали эту температуру в течение 2 ч, а затем

охлаждали. Температуру изменяли равномерно со скоростью $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Результаты и обсуждение. Синтезирована серия образцов при температурах обжига от 1200 до $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характерные микроскопические изображения морфологии образцов приведены на рис. 1.

На полученных электронно-микроскопических изображениях наблюдаются области с ярким и темным контрастом. Изображения образцов при больших увеличениях показывают, что области с ярким контрастом (рис. 2, а) содержат кристаллиты с размерами $0.5\text{--}2\text{ }\mu\text{м}$, близкими к размерам исходного порошка, и имеют высокую пористость (до 50%). Отмечается наличие огранки зерен,

свидетельствующей об их кристаллической структуре. В то же время области с низким контрастом содержат блочную структуру с характерными размерами более $50\text{ }\mu\text{м}$ (рис. 2, б). Наблюдаются поры с характерными размерами примерно $0.3\text{--}2\text{ }\mu\text{м}$ и плотностью менее $10^9\text{--}10^{10}\text{ пор}/\text{см}^3$, что соответствует менее чем 1% объема образца. Отмечается наличие огранки в порах.

Образцы, синтезированные при температурах ниже $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, содержат практически только микрометровые кристаллиты (рис. 1, а). Образцы, синтезированные при температурах $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше, содержат крупные кристаллиты. Хорошо прослеживаются межзеренные границы, средний размер зерен возрастает до $100\text{ }\mu\text{м}$.

Результаты оценок размеров кристаллитов и плотности образцов представлены на рис. 3. Особо подчеркнем, что при температурах выше $1325\text{ }^{\circ}\text{C}$ границы кристаллитов прилегают одна к другой, так что свободного пространства, определяющего пористость, практически не

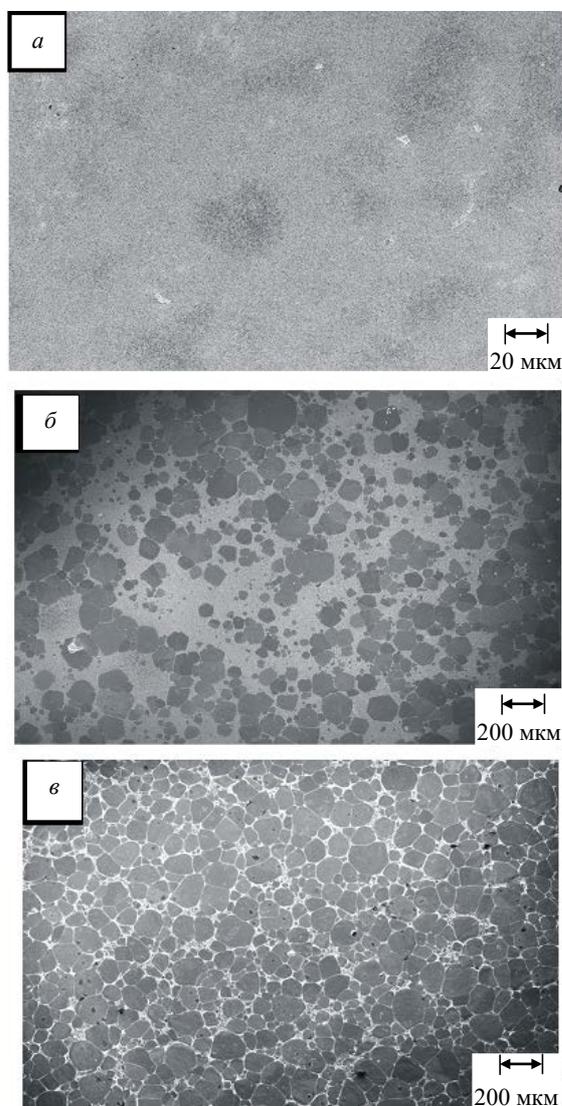


Рис. 1. Морфология поверхности керамик ВТО после обжига при температуре: а – $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $1315\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 1. Surfaces morphology of BTO ceramics sintered at a temperature of: а – $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $1315\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$

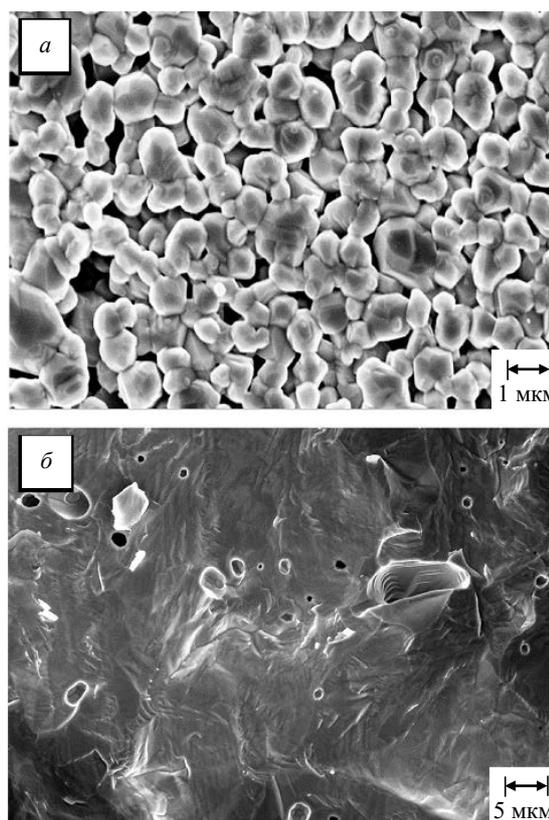


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения образцов керамики: а – при $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в яркой; б – при $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в темной областях

Fig. 2. Electron microscopic image of the cross-section of ceramic samples at a temperature of: а – $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the light; б – dark regions at temperature of $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

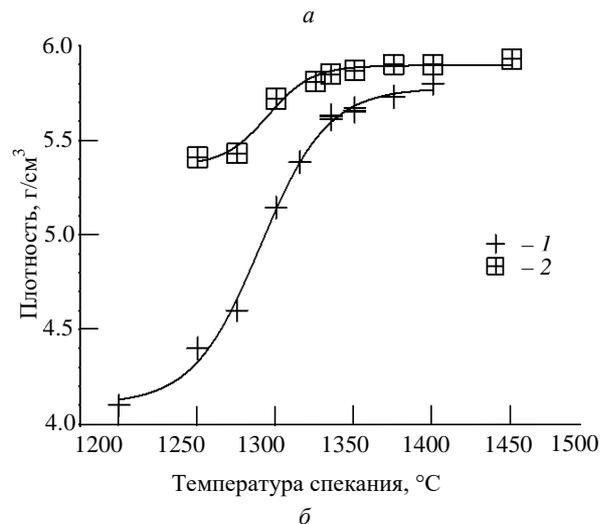
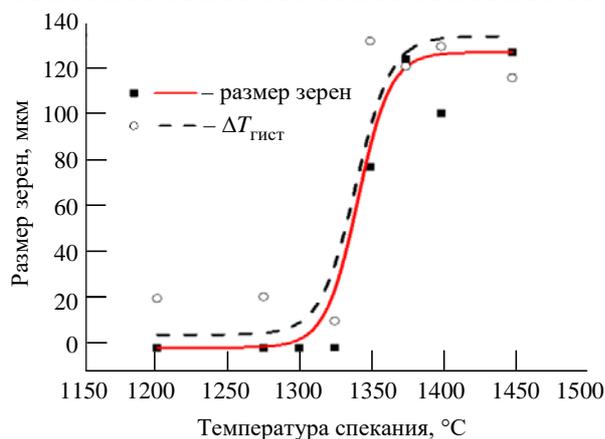


Рис. 3. Зависимость размера температурного гистерезиса, среднего размера зерен (а) и плотности образцов (б) от температуры спекания (1 и 2 – механические и гидростатические измерения плотности соответственно)

Fig. 3. Dependence of the temperature hysteresis, average grain size (a) and sample density (б) on the sintering temperature (1 and 2 – mechanical and hydrostatic density measurements)

остается. Состав образцов по результатам исследований энергодисперсионных спектров соответствует Ва:Ti 1:1.

Зависимость плотности образцов от температуры синтеза (рис. 3, б) носит ступенчатый характер, а ее значение изменяется от 5.4 г/см^3 при $t < 1325 \text{ °C}$ до 5.9 г/см^3 при $t > 1325 \text{ °C}$.

Полученные значения плотности несколько ниже табличного значения 6.02 г/см^3 , что можно объяснить пористостью образцов. Результаты по плотности и морфологии образцов хорошо согласуются между собой и объясняются фазовым переходом Solid-Liquid для ВТО в области $1312...1337 \text{ °C}$ [22].

Для всех описанных образцов были измерены температурные характеристики диэлектрической

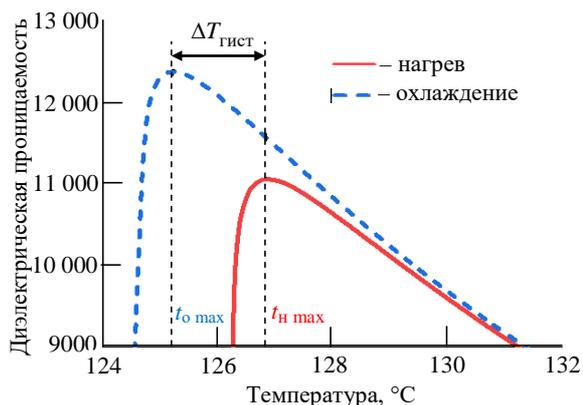


Рис. 4. Область фазового перехода для образца титаната бария, спеченного при температуре 1450 °C ($t_{O \text{ max}}$ – температура фазового перехода при охлаждении; $t_{H \text{ max}}$ – температура фазового перехода при нагреве)

Fig. 4. Phase transition region for a sample of barium titanate sintered at a temperature of 1450 °C ($t_{O \text{ max}}$ – temperature of the phase transition during cooling; $t_{H \text{ max}}$ – temperature of the phase transition during heating)

проницаемости в режимах нагрева и охлаждения. Пример такой зависимости для образца, синтезированного при температуре 1450 °C , приведен на рис. 4. Измеренные характеристики типичны для структур с фазовым переходом, близким к переходу первого рода [23, 24].

Образцы, синтезированные при температурах ниже 1325 °C , имеют пологую характеристику $\epsilon(t)$ с максимумом диэлектрической проницаемости, который может достигать 6000 (кривые 1 и 2 на рис. 5). При температурах спекания выше 1325 °C значение диэлектрической проницаемости скачкообразно увеличивается (кривая 3 на рис. 5) в области температур, предшествующих

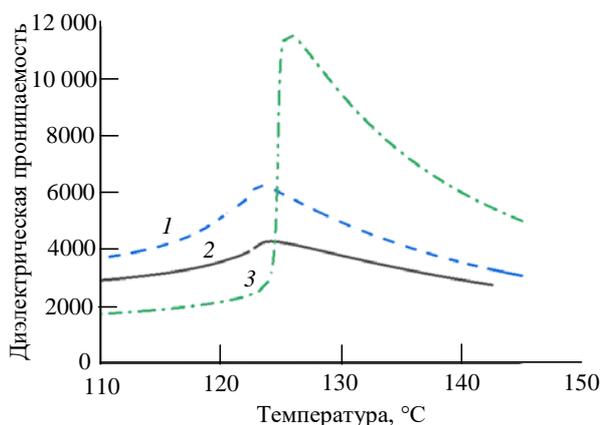


Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образцов после обжига при температуре: 1 – 1200 °C ; 2 – 1325 °C ; 3 – 1450 °C

Fig. 5. Temperature dependence on dielectric permittivity for barium titanate samples sintered at a temperature of: 1 – 1200 °C ; 2 – 1325 °C ; 3 – 1450 °C

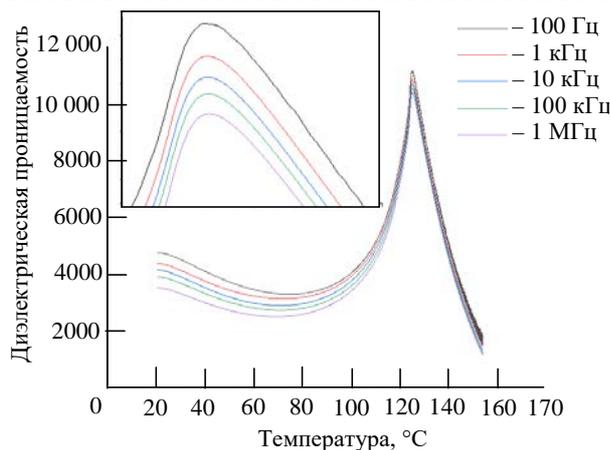


Рис. 6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образца, спеченного при температуре 1275 °С

Fig. 6. Temperature dependence on dielectric permittivity for barium titanate sample sintered at a temperature of 1275 °C

фазовому переходу (в районе 125 °С), и максимальные значения ϵ достигают 12 000.

Весь цикл температурных измерений осуществлялся в диапазоне частот 100 Гц...1 МГц. На рис. 6 представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости при разных частотах для образца, спеченного при температуре 1275 °С. На врезке показана область фазового перехода.

Диэлектрическая проницаемость значительно изменяется в зависимости от частоты в интервале температур 20...90 °С. С приближением к точке фазового перехода дисперсия ϵ снижается, однако полностью не исчезает (как видно на врезке рис. 6). Последующее повышение температуры уже не вызывает значительного увеличения частотной зависимости диэлектрической проницаемости. Температурный порог фазового перехода остается стабильным и почти не подвержен влиянию изменений частоты.

Для образцов, спеченных при температурах выше 1325 °С, наблюдается слабая частотная зависимость диэлектрической проницаемости во всем диапазоне температур (рис. 7).

Однако вблизи фазового перехода наблюдается влияние частоты на температуру фазового перехода (врезка на рис. 7). При увеличении частоты фазовый переход смещается в область более высоких температур. Обнаруженная частотная зависимость диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии релаксационных свойств во всех исследованных керамиках титаната бария.

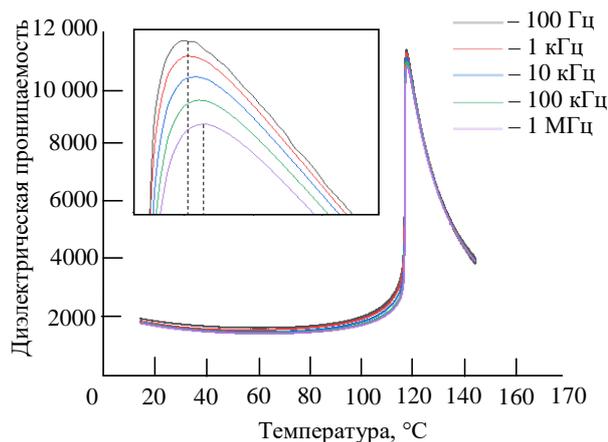


Рис. 7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образца, спеченного при температуре 1450 °С

Fig. 7. Temperature dependence on dielectric permittivity for barium titanate sample sintered at a temperature of 1450 °C

Экспериментально полученные зависимости $\epsilon(t)$ позволяют установить ключевые характеристики материала, включая температуры фазовых переходов t_{\max} при нагревании ($t_{\text{н max}}$) и охлаждении ($t_{\text{о max}}$), пиковое значение диэлектрической проницаемости (ϵ_{\max}) и размер температурного гистерезиса ($\Delta T_{\text{гист}}$). Отличительная черта этих зависимостей – наличие различных температур максимума диэлектрической проницаемости при нагреве и охлаждении (так называемый температурный гистерезис). Этот эффект наблюдался во всех изученных образцах. Влияние температуры спекания на размер температурного гистерезиса $\Delta T_{\text{гист}}$ показано на рис. 3.

Температурный гистерезис $\Delta T_{\text{гист}}$ слабо зависит от частоты и сохраняет практически постоянное значение во всем диапазоне частот (рис. 8). Эта закономерность характерна для всех температур спекания.

Сопоставление графиков зависимостей плотности, температурного гистерезиса и среднего размера зерна от температуры обжига показывает, что все они имеют ступенчатый характер и области перехода на всех графиках хорошо согласуются, т. е. структура и диэлектрические свойства образцов определяются кинетикой спекания материала (ВТО).

При температурах обжига ниже 1325 °С (соответствует минимальной температуре плавления по фазовой диаграмме) частицы исходного порошка в образцах практически не взаимодействуют между собой и сами образцы

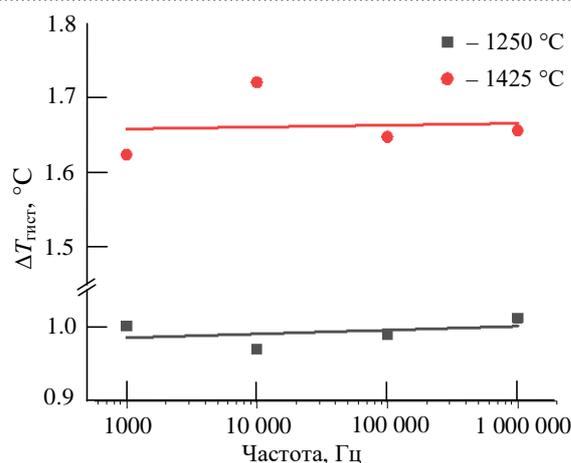


Рис. 8. Зависимость размера температурного гистерезиса от частоты

Fig. 8. Dependence of the temperature hysteresis on frequency

имеют высокую пористость, частицы контактируют между собой только в отдельных местах [25]. Указанное приводит к ухудшению диэлектрических свойств материала.

При температурах спекания 1325 °C и выше исходный порошок подвергается частичному расплавлению, в результате чего поры уходят и образуются плотно прилегающие кристаллиты титаната бария со структурой преимущественно перовскитного типа.

Оценка связи диэлектрической проницаемости и плотности дается формулой [26]:

$$\varepsilon^{1/2} = m\rho + 1, \quad (1)$$

где m – константа для данного материала; ρ – плотность. Сопоставление результатов плотности и диэлектрической проницаемости показывает хорошее согласие с формулой (рис. 9). Маркером обозначены экспериментальные данные, аппроксимирующая прямая соответствует уравнению (1).

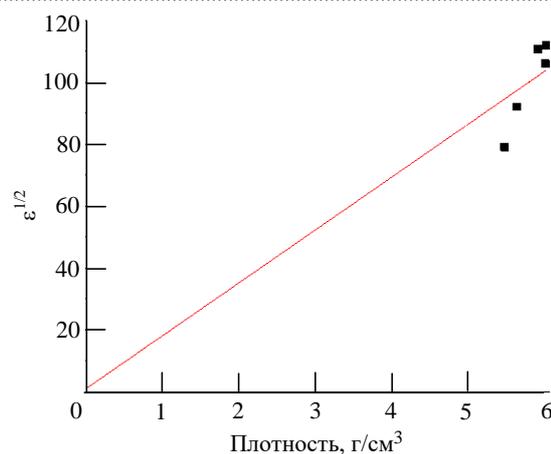


Рис. 9. Диаграмма "диэлектрическая проницаемость – плотность"

Fig. 9. Dielectric permittivity–density diagram

Выводы. Выявлено, что температура спекания 1325 °C играет ключевую роль в изменении структуры и морфологии образцов титаната бария.

Для образцов, спеченных при температурах ниже 1300 °C, характерны размеры зерен, сопоставимые с размерами зерен в исходном порошке (~1 мкм), а также низкие показатели диэлектрической проницаемости (~6000) и температурного гистерезиса (~1 °C).

При спекании в диапазоне температур 1325...1425 °C размер зерен увеличивается примерно до 100 мкм, одновременно достигаются значения диэлектрической проницаемости около 12 000 и температурного гистерезиса примерно 1.7 °C. Значение $\Delta T_{\text{гист}}$ в данном случае оказывается близким к показателям температурного гистерезиса для монокристаллического ВТО [12].

Различие диэлектрической проницаемости объясняется пористостью образцов. Изменение структуры и морфологии образцов связывается с фазовым переходом ВТО при температуре 1320...1325 °C.

Авторский вклад

Мыльников Иван Леонидович – подготовка текста статьи; измерение температурных зависимостей диэлектрической проницаемости керамических образцов титаната бария.

Сошников Илья Петрович – исследование морфологии керамических образцов титаната бария.

Дедык Антонина Ивановна – подготовка текста статьи; обсуждение результатов.

Павлова Юлия Валерьевна – обработка результатов измерений.

Анохин Александр Сергеевич – изготовление керамических образцов титаната бария; подготовка образцов к измерениям.

Еськов Андрей Владимирович – изготовление керамических образцов титаната бария; подготовка образцов к измерениям; обсуждение результатов.

Белявский Павел Юрьевич – обработка результатов измерений.

Антонова Анна Сергеевна – оценка среднего размера зерен в керамиках.

Семенов Александр Анатольевич – постановка задачи, обсуждение результатов.

Author's contribution

- Ivan L. Mylnikov**, preparation of the paper text; measurement of temperature dependences of prepared samples.
Ilya P. Soshnikov, investigation of the morphology of ceramic samples of barium titanate.
Antonina I. Dedyk, preparation of the paper text; discussion of the results.
Yuliya V. Pavlova, processing of measurement results.
Alexander S. Anokhin, production of ceramic samples of barium titanate; preparation of samples for measurements.
Andrej V. Es'kov, production of ceramic samples of barium titanate; preparation of samples for measurements, discussion of the results.
Pavel Yu. Belyavskiy, processing of measurement results.
Anna S. Antonova, estimation of the average grain size in ceramic.
Alexander A. Semenov, the problem definition; discussion of the results.

Список литературы

1. Thermal Conductivity Reduction and Thermoelectric Figure of Merit Increase by Embedding Nanoparticles in Crystalline Semiconductors / W. Kim, J. Zide, A. Gossard, D. Klenov, S. Stemmer, A. Shakouri, A. Majumdar // *Physical Rev. Lett.* 2006. Vol. 96, № 4. Art. № 045901.
doi: 10.1103/PhysRevLett.96.045901
2. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies // *Progress in Materials Science.* 2012. Vol. 57, № 6. P. 980–1009.
doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.02.001
3. Electrocaloric refrigeration: thermodynamics, state of the art and future perspectives / M. Ožbolt, A. Kitanovski, J. Tušek, A. Poredoš // *Int. J. of refrigeration.* 2014. Vol. 40. P. 174–188.
doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.11.007
4. Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ / A. S. Mischenko, Q. Zhang, J. F. Scott, R. W. Whatmore, N. D. Mathur // *Science.* 2006. Vol. 311, № 5765. P. 1270–1271.
doi: 10.1126/science.1123811
5. Shaobo L., Yanqiu L. Research on the electrocaloric effect of PMN/PT solid solution for ferroelectrics MEMS microcooler // *Materials Science and Engineering: B.* 2004. Vol. 113, № 1. P. 46–49.
doi: 10.1016/j.mseb.2004.06.010
6. Pyroelectric and electrocaloric effect of $\langle 111 \rangle$ -oriented 0.9 PMN–0.1 PT single crystal / L. Luo, H. Chen, Y. Zhu, W. Li, H. Luo, Y. Zhang // *J. of alloys and compounds.* 2011. Vol. 509, № 32. P. 8149–8152.
doi: 10.1016/j.jallcom.2011.05.111
7. Investigation of the electrocaloric effect in a $\text{PbMg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3}\text{O}_3$ – PbTiO_3 relaxor thin film / T. M. Correia, J. S. Young, R. W. Whatmore, J. F. Scott, N. D. Mathur, Q. Zhang // *Applied Physics Lett.* 2009. Vol. 95, № 18. Art. № 182904.
doi: 10.1063/1.3257695
8. Direct and indirect measurement of large electrocaloric effect in B_2O_3 – ZnO glass modified $\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{TiO}_3$ bulk ceramics / S. B. Wang, G. Z. Dai, Y. B. Yao, X. B. Zhao, T. Tao, B. Liang, S. G. Lu // *Scripta Materialia.* 2021. Vol. 193. P. 59–63.
doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.10.033
9. Xu Z., Qiang H. Enhanced electrocaloric effect in Mn+Y co-doped BST ceramics near room temperature // *Materials Lett.* 2017. Vol. 191. P. 57–60.
doi: 10.1016/j.matlet.2016.12.120
10. Electrocaloric effects in spark plasma sintered $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ -based ceramics: effects of domain sizes and phase constitution / X. Q. Liu, T. T. Chen, M. S. Fu, Y. J. Wu, X. M. Chen // *Ceramics Intern.* 2014. Vol. 40, № 7. P. 11269–11276.
doi: 10.1016/j.ceramint.2014.03.175
11. Исследование диэлектрических свойств керамик титаната бария, изготовленных при разных температурах спекания / И. Л. Мылъников, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова, В. Ю. Нурмухаметов // *Материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ", Санкт-Петербург, 29 мая–03 июня 2023.* СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2023. С. 383–387.
12. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов, Н. Н. Крайник, Р. Е. Пасынков, А. И. Соколов, Н. К. Юшин. Л.: Наука, 1985. 396 с.
13. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы / пер. с англ. Л. А. Фейгина и Б. К. Севастьянова; под ред. Л. А. Шувалова. М.: Мир, 1965. 555 с.
14. $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$ solid solutions sintered from sol gel derived powders: An insight into the composition and temperature dependent dielectric behavior / R. E. Patru, C. P. Ganea, C. A. Stanciu, V. A. Surdu, R. Trusca, A. C. Ianculescu, I. Pintilie, L. Pintilie // *Ceramics Intern.* 2020. Vol. 46, № 4. P. 4180–4190.
doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.136
15. Observation of a negative thermal hysteresis in relaxor ferroelectric polymers / Y. Liu, A. Haibibu, W. Xu, Z. Han, Q. Wang // *Advanced Functional Materials.* 2020. Vol. 30, № 25. Art. № 2000648.
doi: 10.1002/adfm.202000648
16. Martirena H. T., Burfoot J. C. Grain-size effects on properties of some ferroelectric ceramics // *J. of Physics C: Solid State Physics.* 1974. Vol. 7, № 17. P. 3182–3192.
doi: 10.1088/00223719/7/17/024
17. Kim B. C., Chae K. W., Cheon C. I. Effect of sintering temperature on the ferroelectric properties and the electro-caloric effect in barium-titanate ceramics // *J. of the Korean Physical Society.* 2020. Vol. 76, № 3. P. 226–230.

doi: 10.3938/jkps.76.226

18. Исследования физических свойств и электрокалорического эффекта в нано- и микрокерамике BaTiO₃ / А. В. Карташев, В. С. Бондарев, И. Н. Флёров, М. В. Горев, Е. И. Погорельцев, А. В. Шабанов, М. С. Молокеев, S. Guillemet-Fritsch, И. П. Раевский // ФГТ. 2019. Т. 61, № 6. С. 1128–1137.

doi: 10.21883/ФГТ.2019.06.47689.309

19. Grain-size effects on dielectric and piezoelectric properties of poled BaTiO₃ ceramics / P. Zheng, J. L. Zhang, Y. Q. Tan, C. L. Wang // Acta Materialia. 2012. Vol. 60, № 13–14. P. 5022–5030.

doi: 10.1016/j.actamat.2012.06.015

20. Зависимость диэлектрических свойств керамики титаната бария и композита на его основе от температуры спекания / О. В. Мальшкينا, А. И. Иванова, Г. С. Шишков, А. А. Мартыанов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24, № 1. С. 40–47.

doi: 10.17073/1609_3577_2021-1-40-47

21. Ritter J. J., Roth R. S., Blendell J. E. Alkoxide precursor synthesis and characterization of phases in the barium-titanium oxide system // J. of the American Ceramic Society. 1986. Vol. 69, № 2. P. 155–162.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1986.tb04721.x

22. Kirby K. W., Wechsler B. A. Phase relations in the barium titanate-titanium oxide system // J. of the American Ceramic Society. 1991. Vol. 74, № 8. P. 1841–1847.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb07797.x

23. Lu X., Jin Z. Thermodynamic assessment of the BaO–TiO₂ quasibinary system // Calphad. 2000. Vol. 24, № 3. P. 319–338.

doi: 10.1016/S0364-5916(01)00008-6

24. Gong W., Jin Z. Thermodynamic description of BaO–SrO–TiO₂ system // Calphad. 2002. Vol. 26, № 3. P. 403–418.

doi: 10.1016/S0364-5916(02)00053-6

25. Джонс В. Д. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание / пер. М. А. Маураха, Б. С. Лысова; под ред. М. Ю. Бальшина, А. К. Натансона. М.: Мир, 1965. 404 с.

26. Nelson S. O. Density-permittivity relationships for powdered and granular materials // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2005. Vol. 54, № 5. P. 2033–2040.

doi: 10.1109/TIM.2005.853346

Информация об авторе

Мыльников Иван Леонидович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2013, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), ассистент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; мультиферроики.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: mylnikov.il@gmail.com

https://orcid.org/0000-0003-3084-3394

Сошников Илья Петрович – кандидат физико-математических наук (1997), ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН/Алферовский университет/ Институт аналитического приборостроения РАН. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – характеристика структуры наноматериалов (электронная микроскопия, микроанализ); постростовые технологии; пьезоматериалы.

Адрес: Алферовский университет, ул. Хлопина, д. 8, к. 3, Санкт-Петербург, 194021, Россия

E-mail: ipsosh@beam.ioffe.ru

https://orcid.org/0000-0002-9001-7599

Дедык Антонина Ивановна – кандидат физико-математических наук (1986), доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; мультиферроики; тонкие пленки; керамика; монокристаллы; электрофизические свойства сегнетоэлектриков.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: dedyk_ai@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-7360-1267

Павлова Юлия Валерьевна – кандидат технических наук (2008), доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; титанат бария; гистерезис; сегнетокерамика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: yulia.pavlova@gmail.com

https://orcid.org/0009-0001-7261-1551

Анохин Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2022), инженер образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы" Университета ИТМО. Автор 25 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пироэлектрический эффект; мультиферроики. Адрес: Университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49 А, Санкт-Петербург, 197101, Россия
E-mail: asanokhin@itmo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0499-4159>

Еськов Андрей Владимирович – кандидат технических наук (2014), руководитель лаборатории технологии материалов и элементов интегральной радиофотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорический эффект; пироэлектрический эффект; мультиферроики; интегральная радиофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aeskow@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Белявский Павел Юрьевич – кандидат физико-математических наук (2008), инженер кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 75 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; электрокалорика; сегнетоэлектрические пленки. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: pybelyavskiy@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9136-0831>

Антонова Анна Сергеевна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирантка кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; керамика; титанат бария. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: as.antonova17@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-6098-9677>

Семенов Александр Анатольевич – доктор технических наук (2017), заведующий кафедрой физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – электроника СВЧ; сегнетоэлектрики; технология тонких пленок; мультиферроики; интегральная радиофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aasemenov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>

References

1. Kim W., Zide J., Gossard A., Klenov D., Stemmer S., Shakouri A., Majumdar A. Thermal Conductivity Reduction and Thermoelectric Figure of Merit Increase by Embedding Nanoparticles in Crystalline Semiconductors. *Physical Rev. Lett.* 2006, vol. 96, no. 4, art. no. 045901. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.045901
2. Valant M. Electrocaloric Materials for Future Solid-State Refrigeration Technologies. *Progress in Materials Science.* 2012, vol. 57, no. 6, pp. 980–1009. doi: 10.1016/j.pmatsci.2012.02.001
3. Ožbolt M., Kitanovski A., Tušek J., Poredoš A. Electrocaloric Refrigeration: Thermodynamics, State of the Art and Future Perspectives. *Int. J. of Refrigeration.* 2014, vol. 40, pp. 174–188. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.11.007
4. Mischenko A. S., Zhang Q., Scott J. F., Whatmore R. W., Mathur N. D. Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$. *Science.* 2006, vol. 311, no. 5765, pp. 1270–1271. doi: 10.1126/science.1123811
5. Shaobo L., Yanqiu L. Research on the Electrocaloric Effect of PMN/PT Solid Solution for Ferroelectrics MEMS Microcooler. *Materials Science and Engineering: B.* 2004, vol. 113, no. 1, pp. 46–49. doi: 10.1016/j.mseb.2004.06.010
6. Luo L., Chen H., Zhu Y., Li W., Luo H., Zhang Y. Pyroelectric and Electrocaloric Effect of $\langle 111 \rangle$ -Oriented 0.9 PMN–0.1 PT Single Crystal. *J. of Alloys and Compounds.* 2011, vol. 509, no. 32, pp. 8149–8152. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.05.111
7. Correia T. M., Young J. S., Whatmore R. W., Scott J. F., Mathur N. D., Zhang Q. Investigation of the Electrocaloric Effect in a $\text{PbMg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3}\text{O}_3$ – PbTiO_3 Relaxor Thin Film. *Applied Physics Lett.* 2009, vol. 95, no. 18,

art. no. 182904.

doi: 10.1063/1.3257695

8. Wang S. B., Dai G. Z., Yao Y. B., Zhao X. B., Tao T., Liang B., Lu S. G. Direct and Indirect Measurement of Large Electrocaloric Effect in B_2O_3 -ZnO Glass Modified $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$ Bulk Ceramics. *Scripta Materialia*. 2021, vol. 193, pp. 59–63.

doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.10.033

9. Xu Z., Qiang H. Enhanced Electrocaloric Effect in Mn+Y Co-doped BST Ceramics Near Room Temperature. *Materials Lett.* 2017, vol. 191, pp. 57–60.

doi: 10.1016/j.matlet.2016.12.120

10. Liu X. Q., Chen T. T., Fu M. S., Wu Y. J., Chen X. M. Electrocaloric Effects in Spark Plasma Sintered $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ -Based Ceramics: Effects of Domain Sizes and Phase Constitution. *Ceramics Intern.* 2014, vol. 40, no. 7, pp. 11269–11276.

doi: 10.1016/j.ceramint.2014.03.175

11. Mylnikov I. L., Dedyk A. I., Pavlova Yu. V., Nurmuhametov V. Yu. *Issledovanie dielektricheskikh svoystv keramik titanata bariya, izgotovlennykh pri raznykh temperaturah spekaniya* [Study of Dielectric Properties of Barium Titanate Ceramics Produced at Different Sintering Temperatures]. Proc. of the XII All-Russ. Scientific and Technical Conf. "Microwave Electronics and Microelectronics", St Petersburg, 29 May–03 June 2023. St Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University, 2023, pp. 383–387. (In Russ.)

12. Smolenskiy G. A. *Fizika segnetoelektricheskikh yavlenij* [Physics of Ferroelectric Phenomena]. L.: Nauka, 1985, 396 p. (In Russ.)

13. Jona F., Shirane G. *Ferroelectric Crystals*. New York, Pergamon Press, 1962, 402 p.

14. Patru R. E., Ganea C. P., Stanciu C. A., Surdu V. A., Trusca R., Ianculescu A. C., Pintilie I., Pintilie L. (Ba,Sr)TiO₃ Solid Solutions Sintered from Sol Gel Derived Powders: An Insight into the Composition and Temperature Dependent Dielectric Behavior. *Ceramics Intern.* 2020, vol. 46, no. 4, pp. 4180–4190.

doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.136

15. Liu Y., Haibibu A., Xu W., Han Z., Wang Q. Observation of a Negative Thermal Hysteresis in Relaxor Ferroelectric Polymers. *Advanced Functional Materials*. 2020, vol. 30, no. 25, art. no. 2000648.

doi: 10.1002/adfm.202000648

16. Martirena H. T., Burfoot J. C. Grain-Size Effects on Properties of Some Ferroelectric Ceramics. *J. of Physics C: Solid State Physics*. 1974, vol. 7, no. 17, pp. 3182–3192.

doi: 10.1088/0022 3719/7/17/024

17. Kim B. C., Chae K. W., Cheon C. I. Effect of Sintering Temperature on the Ferroelectric Properties and the Electro-Caloric Effect in Barium-Titanate Ceramics. *J. of the Korean Physical Society*. 2020, vol. 76, no. 3, pp. 226–230.

doi: 10.3938/jkps.76.226

18. Kartashev A. V., Bondarev V. S., Flyorov I. N., Gorev M. V., Pogorel'cev E. I., SHabanov A. V., Molokeyev M. S., Guillemet-Fritsch S., Raevskij I. P. Study of the Physical Properties and Electrocaloric Effect in the BaTiO₃ Nano- and Microceramics. *Physics of the Solid State*. 2019, vol. 61, pp. 1052–1061.

doi: 10.1134/S1063783419060088

19. Zheng P., Zhang J. L., Tan Y. Q., Wang C. L. Grain-Size Effects on Dielectric and Piezoelectric Properties of Poled BaTiO₃ Ceramics. *Acta Materialia*. 2012, vol. 60, no. 13–14, pp. 5022–5030.

doi: 10.1016/j.actamat.2012.06.015

20. Malyshkina O. V., Ivanova A. I., Shishkov G. S., Mart'yanov A. A. Dependence of the Dielectric Properties of Barium Titanate Ceramics and a Composite Based on It on the Sintering Temperature. *Materials of Electronics Engineering*. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 40–47. (In Russ.)

doi: 10.17073/1609 3577 2021-1-40-47

21. Ritter J. J., Roth R. S., Blendell J. E. Alkoxide Precursor Synthesis and Characterization of Phases in the Barium-Titanium Oxide System. *J. of the American Ceramic Society*. 1986, vol. 69, no. 2, pp. 155–162.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1986.tb04721.x

22. Kirby K. W., Wechsler B. A. Phase Relations in the Barium Titanate-Titanium Oxide System. *J. of the American Ceramic Society*. 1991, vol. 74, no. 8, pp. 1841–1847.

doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb07797.x

23. Lu X., Jin Z. Thermodynamic Assessment of the BaO–TiO₂ Quasibinary System. *Calphad*. 2000, vol. 24, no. 3, pp. 319–338.

doi: 10.1016/S0364-5916(01)00008-6

24. Gong W., Jin Z. Thermodynamic Description of BaO–SrO–TiO₂ System. *Calphad*. 2002, vol. 26, no. 3, pp. 403–418.

doi: 10.1016/S0364-5916(02)00053-6

25. Jones W. D. *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. London, E. Arnold, 1960, 1032 p.

26. Nelson S. O. Density-Permittivity Relationships for Powdered and Granular Materials. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 2005, vol. 54, no. 5, pp. 2033–2040.

doi: 10.1109/TIM.2005.853346

Information about the authors

Ivan L. Mylnikov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2013, Saint Petersburg Electrotechnical University), Assistant of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; multiferroics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: mylnikov.il@gmail.com

https://orcid.org/0000-0003-3084-3394

Илья П. Soshnikov, Cand. Sci. (Eng.) (1997), Leading Researcher of Ioffe Institute /Alferov University/ Institute of Analytical Instrumentation. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: characterization of the structure of nanomaterials (electron microscopy, microanalysis); post-construction technologies; piezo materials. Address: Alferov University, 8, Khlopina St., St Petersburg 194021, Russia
E-mail: ipsosh@beam.ioffe.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9001-7599>

Antonina I. Dedyk, Cand. Sci. (Eng.) (1986), Associate Professor of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; multiferroics; thin films; ceramics; single crystals; electrophysical properties of ferroelectrics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: dedyk_ai@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7360-1267>

Yuliya V. Pavlova, Cand. Sci. (Eng.) (2008), Associate Professor of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; barium titanate; hysteresis; ferroceramics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: yulia.pavlova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-7261-1551>

Alexander S. Anokhin, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Engineer of educational center "Energy Effective engineering systems" of ITMO University. The author of 25 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics. Address: ITMO University, 49 A, Kronverkskii Ave., St Petersburg 197101, Russia
E-mail: asanokhin@itmo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0499-4159>

Andrej V. Es'kov, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Head of the Laboratory of Technology of Materials and Elements of Integrated Microwave Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocaloric effect; pyroelectric effect; multiferroics; integrated microwave photonics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aeskow@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5770-1543>

Pavel Yu. Belyavskiy, Cand. Sci. (Eng.) (2008), Engineer of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 75 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; electrocalorics; ferroelectric films. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: pybelyavskiy@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9136-0831>

Anna S. Antonova, Master in Electronics and Nanoelectronics (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; ceramics; barium titanate. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: as.antonova17@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-6098-9677>

Alexander A. Semenov, Dr Sci. (Eng.) (2017), Head of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics; thin films technology; ferroelectrics; multiferroics; integrated microwave photonics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aasemenov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2348-3773>
