

## Электродинамические свойства цирконата-титаната свинца в СВЧ-диапазоне в окрестности высокотемпературных фазовых переходов

П. А. Астафьев<sup>✉</sup>, К. П. Андрияшин, А. М. Лерер, Л. А. Резниченко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>✉</sup> Astafev@sfedu.ru

**Аннотация.** Посвящена определению механизмов дисперсии диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц в твердых растворах системы  $\text{PbZr}_{(1-x)}\text{Ti}_x\text{O}_3$  (ЦТС) в зависимости от температуры, учитывая фазовые переходы. В качестве объекта исследования выбран мелкодисперсный порошок состава  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$ , имеющий два фазовых перехода в диапазоне температур 25...250 °С: из антисегнетоэлектрического в сегнетоэлектрическое состояние при температуре ~127 °С и из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние при температуре ~220 °С. Коэффициенты отражения и пропускания в указанном диапазоне температур измерялись при помощи прямоугольного волновода, расчет комплексной диэлектрической проницаемости выполнялся методом Николсона–Росса–Вейера. Обнаружена диэлектрическая релаксация в исследуемом диапазоне частот, предположительно связанная с механизмом мягкой моды. Наибольшие релаксационные потери возникают в параэлектрическом и сегнетоэлектрическом состояниях в окрестностях фазового перехода. Наименьшими потерями исследуемый материал обладает, будучи в антисегнетоэлектрическом состоянии при температурах близких к комнатным.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрик, антисегнетоэлектрик, параэлектрик, фазовый переход, СВЧ, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери

**Для цитирования:** Электродинамические свойства цирконата-титаната свинца в СВЧ-диапазоне в окрестности высокотемпературных фазовых переходов / П. А. Астафьев, К. П. Андрияшин, А. М. Лерер, Л. А. Резниченко // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 8. С. 40–47. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-40-47.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-22-00229.

Original article

## Electrodynamic Properties of Lead Zirconate Titanate in the Microwave Range in the Vicinity of High-Temperature Phase Transitions

P. A. Astafev<sup>✉</sup>, K. P. Andryushin, A. M. Lerer, L. A. Reznichenko

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>✉</sup> Astafev@sfedu.ru

**Abstract.** Devoted to determining the mechanisms of dielectric constant dispersion in the frequency range 8.2...12.4 GHz in solid solutions of the  $\text{PbZr}_{(1-x)}\text{Ti}_x\text{O}_3$  (PZT) system depending on temperature, taking into account phase transitions. The object of study was a finely dispersed powder of the composition  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$ , which has two phase transitions in the temperature range 25...250 °C: from antiferroelectric to ferroelectric state at a temperature of ~227 °C and from ferroelectric to paraelectric state at a temperature of ~240 °C. Measurements of reflection and transmittance coefficients in the specified temperature range were carried out using a rectangular waveguide, and the complex dielectric constant was calculated using the Nicholson–Ross–

Weir method. Dielectric relaxation was detected in the frequency range under study, presumably associated with the soft mode mechanism. The greatest relaxation losses occur in the paraelectric and ferroelectric states in the vicinity of the phase transition. The material under study has the least losses when it is in an antiferroelectric state at temperatures close to room temperature.

**Keywords:** ferroelectric, antiferroelectric, paraelectric, phase transition, microwave, dielectric constant, dielectric loss

**For citation:** Electrodynamic Properties of Lead Zirconate Titanate in the Microwave Range in the Vicinity of High-Temperature Phase Transitions / P. A. Astafev, K. P. Andryushin, A. M. Lerer, L. A. Reznichenko // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 8. P. 40–47. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-40-47.

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

**Funding:** The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 23-22-00229.

**Введение.** Сегнетоэлектрические (СЭ) керамики или монокристаллы системы  $PbZr_{(1-x)}Ti_xO_3$  (ЦТС) уже более двух десятков лет рассматриваются в качестве перспективного материала для применения в пассивных или активных СВЧ-компонентах. Многослойные подложки с промежуточными слоями из тонких пленок ЦТС могут быть использованы для изготовления микрополосковых СВЧ-фильтров, перестраиваемых напряжением [1], [2]. Параболические антенны с пьезоэлектрическим покрытием имеют более высокую эффективность отражения за счет пассивного гашения механических колебаний [3]. Кроме того, благодаря высоким значениям пьезокоэффициентов материалы системы ЦТС могут применяться в микроэлектромеханических системах, которые могут быть использованы в составе СВЧ-устройств [4], например в качестве СВЧ-переключателей [5], [6].

Для того чтобы все вышеуказанные компоненты нашли применение в опытных конструкторских работах и в серийных промышленных устройствах к материалам предъявляется требование высокой стабильности электрических параметров в широком интервале температур. Указанное требование приводит к необходимости исследования зависимости электрических свойств твердых растворов (ТР) системы ЦТС в СВЧ-диапазоне от температуры. Температурные исследования ЦТС особенно важны, так как система ЦТС обладает сложной фазовой диаграммой (ФД), как в концентрационной, так и в температурной области. При различных температурах могут происходить фазовые переходы (ФП), при которых меняется кристаллическая структура материала, что приводит к изменению свойств в

СВЧ-диапазоне. Кроме того, механизмы, влияющие на формирование электрических свойств сегнетоэлектриков на высоких частотах исследованы крайне поверхностно.

В связи с вышесказанным, целью настоящей статьи стало определение механизмов дисперсии диэлектрической проницаемости в твердых растворах системы ЦТС в зависимости от температуры, учитывая фазовые переходы.

**Объекты исследования.** Объектом настоящего исследования послужил ТР системы ЦТС состава  $PbZr_{0.97}Ti_{0.03}O_3$ . Указанный состав был выбран в связи наличием двух ФП в температурной области 100...250 °С: из антисегнетоэлектрического (АСЭ) состояния (ромбическая – Р-симметрия) в СЭ (ромбоэдрическая – Рэ-симметрия) и из СЭ в параэлектрическое (ПЭ) (кубическая – К-симметрия) [7]. Первый ФП из АСЭ состояния в СЭ осуществляется при температуре ~127 °С и сопровождается возникновением морфотропной области (МО) – кристаллического состояния, в котором происходит изменение кристаллической структуры, сопровождающееся разрывами исходных и возникновением новых химических связей, при этом сосуществуют несколько различных фаз. Второй ФП из состояния СЭ в ПЭ осуществляется при температуре ~227 °С. Во всех трех состояниях материал имеет различную доменную структуру, что позволило в рамках настоящей работы оценить характер влияния доменной структуры на электрические свойства в СВЧ-диапазоне. Технология изготовления исследуемого материала, рентгенографические исследования и измерения электрических характеристик на низких частотах представлены в [7]–[9]. Материал представлял собой мелкодисперсный порошок со средним размером частиц ~100 мкм.

**Методы исследования.** Радиофизические измерения выполнялись с помощью векторного анализатора цепей P9375A «Keysight» (USA, California), имеющего рабочий диапазон частот 300 кГц...26.5 ГГц. Измерительные коаксиальные кабели прибора соответствовали стандарту PC 3.5 и имели предельную рабочую частоту 26.5 ГГц. Калибровка прибора для прямоугольных волноводов поперечного сечения  $23 \times 10$  мм (WR-90) осуществлялась при комнатной температуре с помощью калибровочного набора X11644A «Keysight» (USA, California) в диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц. Для соединения измерительной ячейки (ИЯ) с измерительными кабелями векторного анализатора цепей использовались коаксиально-волноводные СВЧ-переходы из состава калибровочного набора.

Для исследований электрических свойств материала при высоких температурах использовалась ИЯ, представляющая собой три последовательно соединенных прямых секции волновода с поперечными размерами  $a = 23$  мм,  $b = 10$  мм (рис. 1). В средней секции размещался исследуемый материал, полностью заполняя секцию без зазоров. Плотность заполнения составила  $\sim 80\%$ , длина средней секции  $l_2 = 10$  мм. Нагрев секции проводился внешним нагревательным элементом, контроль температуры осуществлялся вблизи внешней поверхности секции при помощи термопары. Две боковые секции служили температурным буфером и позволили ограничить распространение тепла от средней секции к коаксиально-волноводным переходам. Длина буферных секций составила  $l_1 = 130$  мм.

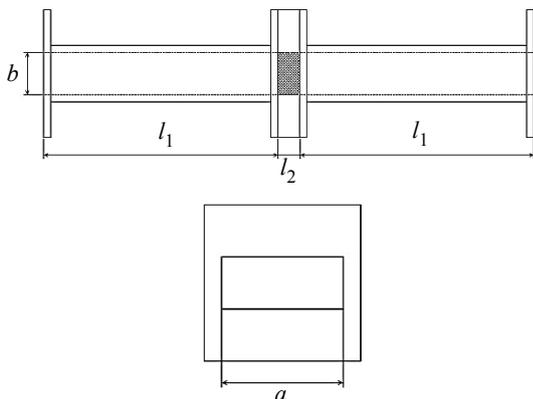


Рис. 1. Волноводная измерительная ячейка  
Fig. 1. Waveguide measuring cell

Измерения коэффициентов пропускания и отражения проводились в автоматическом режиме при различных температурах в диапазоне

25...250 °С с шагом  $\sim 30$  °С. Первое измерение проводилось при комнатной температуре. Затем осуществлялся нагрев ИЯ на 30 °С с последующей выдержкой длительностью 1 ч. Выдержка была необходима для установления равномерной температуры по всему объему материала. По окончании температурной выдержки выполнялось измерение. Процедура повторялась при нагревании ИЯ до максимальной температуры, а затем при охлаждении ИЯ до комнатной температуры. Впоследствии значения диэлектрической проницаемости, рассчитанные из коэффициентов пропускания и отражения при нагревании и охлаждении, усреднялись в случае отсутствия гистерезиса свойств.

Расчет диэлектрической проницаемости выполнялся методом Никольсона–Росса–Вейра с полиномиальным фитингом для ликвидации разрывов, возникающих на зависимостях диэлектрической проницаемости от частоты в связи с особенностями метода, при помощи коммерческой программы N1500A «Keysight» (USA, California).

**Результаты и обсуждение.** Измерения и расчеты показали, что диэлектрическая проницаемость и потери в мелкодисперсном порошке ЦТС состава  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  в диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц составляют около 13 и 3 соответственно (рис. 2), что практически на порядок ниже, чем в керамике схожего состава [9], [10]. Указанные значения ожидаемы для мелкодисперсного порошка в связи с тем, что такой материал можно рассматривать как композит связности 0...3 с наполнителем, имеющим высокие значения диэлектрической проницаемости, и связующим компонентом с низкими значениями таковой. Эффективная диэлектрическая проницаемость указанных композитов сильно снижается с уменьшением массовой доли наполнителя [11], [12].

В области температур 25...80 °С значения действительной части диэлектрической проницаемости мелкодисперсного порошка  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  составляют  $\epsilon' \approx 12.3$  во всем измеряемом диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц, а значения потерь  $\epsilon'' \approx 0.5$  (рис. 3). При температурах 60...80 °С на высоких частотах возникает отчетливый релаксационный максимум потерь со значением  $\epsilon'' \approx 1.3$ . При дальнейшем увеличении температуры диэлектрическая проницаемость растет и достигает максимума  $\epsilon' \approx 13.75$  при температуре около 150 °С. В диапазоне температур 90...150 °С в области высоких частот 11...12 ГГц наблюдается

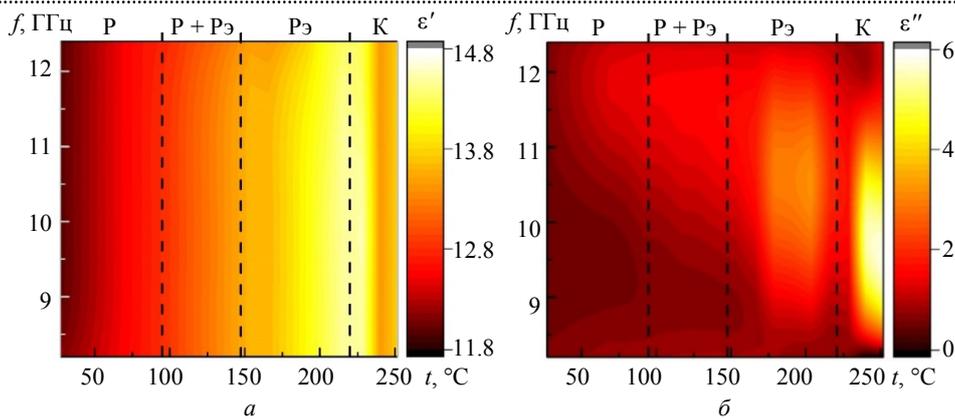


Рис. 2. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости мелкодисперсного порошка  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  от частоты и температуры  
 Fig. 2. Dependence of the real (a) and imaginary (b) parts of the dielectric constant of finely dispersed  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  powder on frequency and temperature

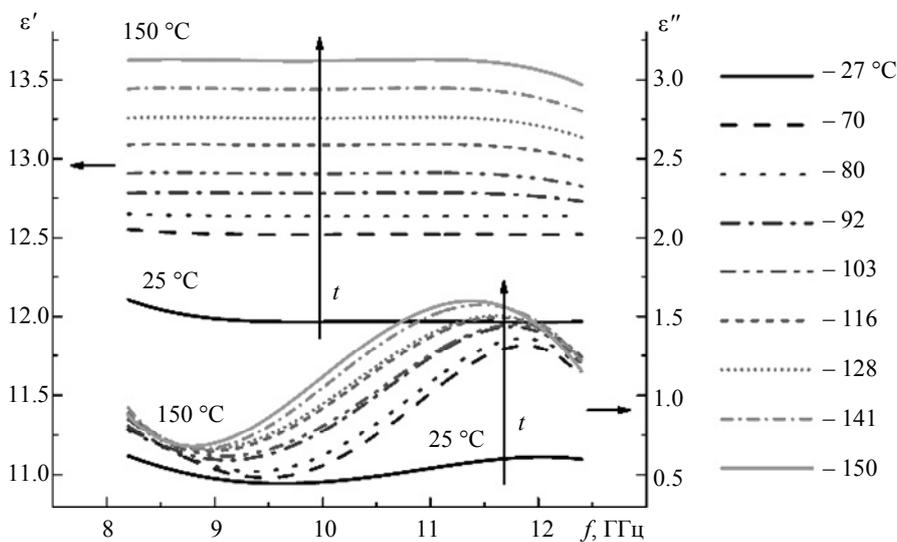


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости мелкодисперсного порошка  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  от частоты при различных температурах  
 Fig. 3. Dependence of the real and imaginary parts of the dielectric constant of fine powder  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  on frequency at different temperatures

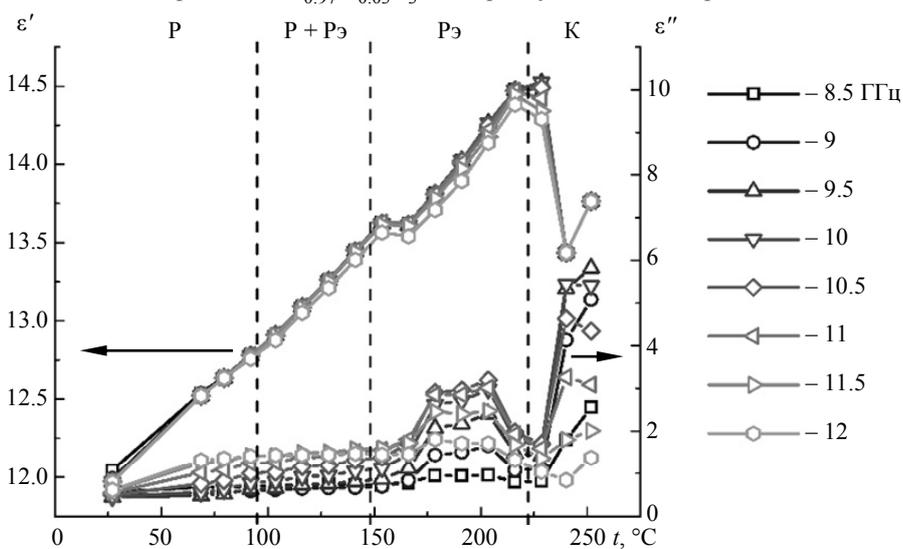


Рис. 4. Зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости мелкодисперсного порошка  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  от температуры на различных частотах  
 Fig. 4. Dependence of the real and imaginary parts of the dielectric constant of fine powder  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  on temperature at different frequencies

дисперсия диэлектрической проницаемости, которая сопровождается возникновением релаксационного максимума потерь при  $f \approx 11.2$  ГГц. Увеличение температуры приводит к смещению указанного релаксационного максимума потерь в область более низких частот.

Несмотря на то, что в исследуемом материале при температуре  $\sim 100$  °С возникает переход в МО [7], диэлектрическая проницаемость продолжает меняться линейно как в Р-фазе, так и в МО, где сосуществуют фазы Р и Рэ.

В области температур 170...200 °С возникает рост потерь, который выражается в увеличении уровня релаксационного максимума до  $\epsilon'' \approx 3$ . Вместе с этим наблюдается стремительный рост  $\epsilon'$ , вплоть до значений 14.5. При достижении температуры ФП из Рэ- в К-симметрию  $\sim 225$  °С обнаружено резкое снижение потерь до  $\epsilon'' \approx 1.5$ . Диэлектрическая проницаемость исследуемого материала в К-фазе при более высоких температурах снижается до уровня 13.2, при этом потери остаются сравнительно высокими и составляют  $\sim 6$  в окрестностях релаксационного максимума.

В [13]–[16] говорится о влиянии доменных стенок на частоту релаксации (в составах ЦТС, близких к МО, в окрестностях  $x = 0.5$ ). Например, в [14] предполагается, что механизм роста потерь связан с преобразованием ЭМ-энергии в энергию акустических волн на доменных стенках. Однако данный вывод делается только касательно релаксации около 1 ГГц, и лишь в некоторых публикациях распространяется на более высокие частоты.

В данном же случае частота релаксации вероятнее всего не зависит от доменных стенок, так как при нагревании ФП проходит из АСЭ- в СЭ-состояние, при приближении к которому доменная структура должна перестраиваться в связи с переходом между симметриями с различной полярностью. Если бы доменные стенки влияли на частоту релаксации, то наблюдались бы аномалии в частоте релаксации при приближении к ФП. Однако подобных аномалий не замечено, а частота релаксации меняется с температурой практически равномерно (рис. 4). По тем же причинам поляризационный механизм, связанный с доменами, также маловероятно существенно повлияет на наблюдаемую релаксацию.

Вероятно, релаксация в исследуемом частотном диапазоне зависит от колебаний отдельных атомов или малых групп атомов соседних элементарных ячеек.

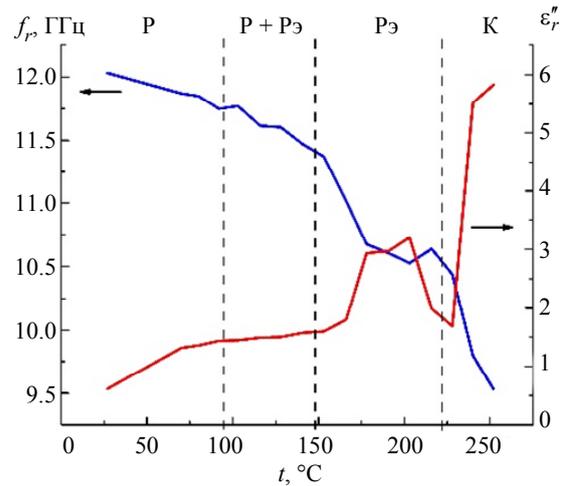


Рис. 5. Зависимость частоты релаксации  $f_r$  и уровня максимума мнимой части диэлектрической проницаемости  $\epsilon''_r$  мелкодисперсного порошка  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  от температуры  
Fig. 5. Dependence of the relaxation frequency  $f_r$  and the level of the maximum of the imaginary part of the dielectric constant  $\epsilon''_r$  of fine powder  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  on temperature

Наиболее вероятно, что основной механизм, дающий вклад в потери на исследуемых частотах, – это независимые колебания атомов в В-подрешетке. Указанное можно объяснить следующим образом.

При нахождении материала в АСЭ- или СЭ-состоянии атом В-подрешетки имеет малое количество степеней свободы, т. е. подвижность отдельного атома сильно ограничена. В связи с этим преобразование энергии электрического поля в колебательную энергию отдельных атомов В-подрешетки происходит слабо. Об этом свидетельствует низкий уровень потерь как в АСЭ- так и в СЭ-фазе (рис. 5). При приближении к ФП из СЭ- в ПЭ-состояние, потенциальный барьер между двумя устойчивыми положениями атома В-подрешетки сужается. Указанное приводит к росту вероятности переполаризации отдельных элементарных ячеек в переменном электрическом поле электромагнитной волны (механизм мягкой моды). Об этом свидетельствует рост потерь в СЭ-состоянии вблизи ФП при температурах 170...200 °С. При ФП кристаллическая структура материала перестраивается, при этом механизм, связанный с переполаризацией элементарных ячеек, перестает работать, из-за чего наблюдается снижение уровня потерь в области температур 210...230 °С (рис. 5). В фазе ПЭ атом В-подрешетки приобретает большее количество степеней свободы, и, соответственно, большую подвижность. Следовательно,

но, потери электромагнитной энергии за счет механизма преобразования таковой в энергию колебаний отдельных атомов В-подрешетки возрастают. Указанное проявляется в высоком уровне потерь в окрестности релаксационного максимума.

**Выводы и заключение.** Диэлектрическая проницаемость и потери в мелкодисперсном порошке ЦТС состава  $\text{PbZr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}\text{O}_3$  составляют 12 и 0.5 соответственно в диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц. Значения указанных параметров в интервале температур 25...50 °С не испытывают дисперсии.

При температуре в окрестностях ФП из СЭ- в ПЭ-состояние значения диэлектрической проницаемости и потерь возрастают, при этом максимум потерь наблюдается в диапазоне частот 9.5...11.5 ГГц. Указанный максимум обусловлен релаксационным механизмом, наиболее вероятно связанным с переполаризацией элементарных ячеек (мягкая мода).

В ПЭ-фазе материал обладает низкой диэлектрической проницаемостью и наивысшими потерями. Наиболее вероятный механизм, определяющий потери в данной симметрии и в данном диапазоне частот, – релаксационный, связанный с колебаниями атомов В-подрешетки.

Ожидается, что керамика исследуемого состава также будет обладать высокой температурной стабильностью в области температур 25...50 °С.

Для увеличения потерь в диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц в системе ЦТС необходимо выбирать такие составы и такие модификаторы, которые переводили бы материал в Рэ-состояние с параметрами элементарной ячейки, близкими к параметрам К-ячейки. Для снижения потерь необходимо выбирать составы с Р-кристаллической структурой, отстоящие как можно дальше от ФП на ФД.

#### Список литературы

1. A tunable ferroelectric based unreleased RF resonator / Y. He, B. Bahr, M. Si, P. Ye, D. Weinstein // *Microsystems & Nanoengin.* 2020. Т. 6, № 8. С. 1–7. doi: 10.1038/s41378-019-0110-1.
2. Ahmad M. A., Coccetti F., Plana R. Piezoelectric materials for advanced integrated RF components // *MRS Online Proc. Library.* 2008. Vol. 1075. Art. 10750301. doi: 10.1557/PROC-1075-J03-01.
3. Munjal B. S., Trivedi H. V., Sarma P. V. B. A. S. Passive damping characterization of parabolic composite reflectors with hybrid PZT-coated layers // *J. of Intelligent Material Systems and Structures.* 2008. Vol. 19, iss. 11. P. 1281–1294. doi: 10.1177/1045389X07085515.
4. Muralt P. Recent progress in materials issues for piezoelectric MEMS // *J. of the Am. Ceramic Society.* 2008. Vol. 91, iss. 5. С. 1385–1396. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02421.x.
5. Piezoelectric PZT MEMS technologies for small-scale robotics and RF applications / J. S. Pulskamp, R. G. Polcawich, R. Q. Rudy, S. S. Bedair, R. M. Proie, T. Ivanov, G. L. Smith // *MRS Bulletin.* 2012. Vol. 37. P. 1062–1070. doi: 10.1557/mrs.2012.269.
6. PZT-based piezoelectric MEMS technology / G. L. Smith, J. S. Pulskamp, L. M. Sanchez, D. M. Potrepka, R. M. Proie, T. G. Ivanov, R. Q. Rudy, W. D. Nothwang, S. S. Bedair, C. D. Meyer, R. G. Polcawich // *J. of the Am. Ceramic Society.* 2012. Vol. 95, iss. 6. P. 1777–1792. doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05155.x.
7. The PZT system ( $\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ ,  $0 \leq x \leq 1.0$ ): High temperature X-ray diffraction studies. Complete xT phase diagram of real solid solutions (Part 3) / I. N. Andryushina, L. A. Reznichenko, L. A. Shilkina, K. P. Andryushin, S. I. Dudkina // *Ceramics Intern.* 2013. Vol. 39, iss. 3. P. 2889–2901. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.09.063.
8. The PZT system ( $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ,  $0.0 \leq x \leq 1.0$ ): specific features of recrystallization sintering and microstructures of solid solutions (Part 1) / I. N. Andryushina, L. A. Reznichenko, V. A. Alyoshin, L. A. Shilkina, S. V. Titov, V. V. Titov, K. P. Andryushin, S. I. Dudkina // *Ceramics Intern.* 2013. Vol. 39, iss. 1. P. 753–761. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.06.088.
9. The PZT system ( $\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ ,  $0 \leq x \leq 1.0$ ): Dielectric response of solid solutions in broad temperature ( $10 \leq T \leq 1000$  K) and frequency ( $10^{-2} \leq f \leq 10^7$  Hz) ranges (Part 4) / I. N. Andryushina, L. A. Reznichenko, I. M. Shmytko, L. A. Shilkina, K. P. Andryushin, Yu. I. Yurasov, S. I. Dudkina // *Ceramics Intern.* 2013. Vol. 39, iss. 4. P. 3979–3986. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.10.246.
10. Microwave dielectric properties of antiferroelectric lead zirconate / M. T. Lanagan, J. H. Kim, S.-J. Jang, R. E. Newnham // *J. of the Am. Ceramic Society.* 1988. Vol. 71, iss. 4. P. 311–316. doi: 10.1111/j.1151-2916.1988.tb05864.x.
11. Dielectric properties of PZT-epoxy composite thick films / V. Pascariu, L. Padurariu, O. Avadanei, L. Mitoseriu // *J. of Alloys and Compounds.* 2013. Vol. 574. С. 591–599. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.05.136.
12. Piezoelectric properties of ferroelectric PZT-polymer composites / E. Venkatragavaraj, B. Satish, P. R. Vinod, M. S. Vijaya // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34, iss. 4. P. 487–492. doi: 10.1088/0022-3727/34/4/308.
13. Böttger U., Arlt G. Dielectric microwave dispersion in PZT ceramics // *Ferroelectrics.* 1992. Vol. 127, iss. 1. P. 95–100. doi: 10.1080/00150199208223353.
14. Arlt G., Böttger U., Witte S. Dielectric dispersion of ferroelectric ceramics and single crystals at microwave frequencies // *Annalen der Physik.* 1994. Vol. 506, iss. 7–8. P. 578–588. doi: 10.1002/andp.19945060703.

15. Dielectric relaxations of lead zirconate titanate films up to millimeter-wave frequencies / S. Manikandan, N. Aruchamy, L. Allilol, S. Girod, S. Glinsek, E. Defay, T. Granzow // J. of the Am. Ceramic Society. 2022. Vol. 105, iss. 10. P. 6149–6157. doi: 10.1111/jace.18535.

16. Jin L., Porokhonsky V., Damjanovic D. Domain wall contributions in  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  ceramics at morphotropic phase boundary: A study of dielectric dispersion // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96, iss. 24. Art. 242902. doi: 10.1063/1.3455328.

#### Информация об авторах

**Астафьев Павел Андреевич** – научный сотрудник Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону, 344090, Россия.  
E-mail: Astafev@sfedu.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-5022-8309>

**Андрюшин Константин Петрович** – д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону, 344090, Россия.  
E-mail: kprandryushin@sfedu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0147-8359>

**Лерер Александр Михайлович** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры прикладной электродинамики и компьютерного моделирования, физический факультет, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 5, Ростов-на-Дону, 344090, Россия.  
E-mail: lerer@sfedu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6788-3045>

**Резниченко Лариса Андреевна** – д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, зав. отделом интеллектуальных материалов и нанотехнологий Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону, 344090, Россия.  
E-mail: lareznichenko@sfedu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4591-1601>

#### Вклад авторов:

Астафьев П. А. – постановка проблемы, анализ литературы, описание результатов, формирование выводов, подготовка и редактирование текста, табличное и графическое представление результатов.

Андрюшин К. П. – разработка концепции статьи, постановка эксперимента, обработка экспериментальных данных, описание результатов, формирование выводов, научное редактирование текста.

Лерер А. М. – описание результатов, научное редактирование текста.

Резниченко Л. А. – описание результатов, научное редактирование текста.

#### References

1. A tunable ferroelectric based unreleased RF resonator / Y. He, B. Bahr, M. Si, P. Ye, D. Weinstein // Microsystems & Nanoengin. 2020. T. 6, № 8. С. 1–7. doi: 10.1038/s41378-019-0110-1.

2. Ahmad M. A., Coccetti F., Plana R. Piezoelectric materials for advanced integrated RF components // MRS Online Proc. Library. 2008. Vol. 1075. Art. 10750301. doi: 10.1557/PROC-1075-J03-01.

3. Munjal B. S., Trivedi H. V., Sarma P. V. B. A. S. Passive damping characterization of parabolic composite reflectors with hybrid PZT-coated layers // J. of Intelligent Material Systems and Structures. 2008. Vol. 19, iss. 11. P. 1281–1294. doi: 10.1177/1045389X07085515.

4. Muralt P. Recent progress in materials issues for piezoelectric MEMS // J. of the Am. Ceramic Society. 2008. Vol. 91, iss. 5. С. 1385–1396. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02421.x.

5. Piezoelectric PZT MEMS technologies for small-scale robotics and RF applications / J. S. Pulskamp, R. G. Polcawich, R. Q. Rudy, S. S. Bedair, R. M. Proie, T. Ivanov, G. L. Smith // MRS Bulletin. 2012. Vol. 37. P. 1062–1070. doi: 10.1557/mrs.2012.269.

6. PZT-based piezoelectric MEMS technology / G. L. Smith, J. S. Pulskamp, L. M. Sanchez, D. M. Potrepka, R. M. Proie, T. G. Ivanov, R. Q. Rudy, W. D. Nothwang, S. S. Bedair, C. D. Meyer, R. G. Polcawich // J. of the Am. Ceramic Society. 2012. Vol. 95, iss. 6. P. 1777–1792. doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05155.x.

7. The PZT system ( $\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ ,  $0 \leq x \leq 1.0$ ): High temperature X-ray diffraction studies. Complete xT phase diagram of real solid solutions (Part 3) / I. N. Andryushina, L. A. Reznichenko, L. A. Shilkina, K. P. Andryushin, S. I. Dudkina // Ceramics Intern. 2013. Vol. 39, iss. 3. P. 2889–2901. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.09.063.

8. The PZT system ( $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ,  $0.0 \leq x \leq 1.0$ ): specific features of recrystallization sintering and microstructures of solid solutions (Part 1) / I. N. Andryushina, L. A. Reznichenko, V. A. Alyoshin, L. A. Shilkina, S. V. Titov, V. V. Titov, K. P. Andryushin, S. I. Dudkina // *Ceramics Intern.* 2013. Vol. 39, iss. 1. P. 753–761. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.06.088.
9. The PZT system ( $\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ ,  $0 \leq x \leq 1.0$ ): Dielectric response of solid solutions in broad temperature ( $10 \leq T \leq 1000$  K) and frequency ( $10^{-2} \leq f \leq 10^7$  Hz) ranges (Part 4) / I. N. Andryushina, L. A. Reznichenko, I. M. Shmytko, L. A. Shilkina, K. P. Andryushin, Yu. I. Yurasov, S. I. Dudkina // *Ceramics Intern.* 2013. Vol. 39, iss. 4. P. 3979–3986. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.10.246.
10. Microwave dielectric properties of antiferroelectric lead zirconate / M. T. Lanagan, J. H. Kim, S.-J. Jang, R. E. Newnham // *J. of the Am. Ceramic Society.* 1988. Vol. 71, iss 4. P. 311–316. doi: 10.1111/j.1151-2916.1988.tb05864.x.
11. Dielectric properties of PZT-epoxy composite thick films / V. Pascariu, L. Padurariu, O. Avadanei, L. Mitoseriu // *J. of Alloys and Compounds.* 2013. Vol. 574. C. 591–599. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.05.136.
12. Piezoelectric properties of ferroelectric PZT-polymer composites / E. Venkatragavaraj, B. Satish, P. R. Vinod, M. S. Vijaya // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34, iss. 4. P. 487–492. doi: 10.1088/0022-3727/34/4/308.
13. Böttger U., Arlt G. Dielectric microwave dispersion in PZT ceramics // *Ferroelectrics.* 1992. Vol. 127, iss. 1. P. 95–100. doi: 10.1080/00150199208223353.
14. Arlt G., Böttger U., Witte S. Dielectric dispersion of ferroelectric ceramics and single crystals at microwave frequencies // *Annalen der Physik.* 1994. Vol. 506, iss. 7–8. P. 578–588. doi: 10.1002/andp.19945060703.
15. Dielectric relaxations of lead zirconate titanate films up to millimeter-wave frequencies / S. Manikandan, N. Aruchamy, L. Allirrol, S. Girod, S. Glinsek, E. Defay, T. Granzow // *J. of the Am. Ceramic Society.* 2022. Vol. 105, iss. 10. P. 6149–6157. doi: 10.1111/jace.18535.
16. Jin L., Porokhonsky V., Damjanovic D. Domain wall contributions in  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  ceramics at morphotropic phase boundary: A study of dielectric dispersion // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, iss. 24. Art. 242902. doi: 10.1063/1.3455328.

#### Information about the authors

**Pavel A. Astafev** – researcher, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Stachki av., 194, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

E-mail: [Astafev@sfedu.ru](mailto:Astafev@sfedu.ru)

<https://orcid.org/0009-0008-5022-8309>

**Konstantin P. Andryushin** – Dr Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Stachki av., 194, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

E-mail: [kpandryushin@sfedu.ru](mailto:kpandryushin@sfedu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-0147-8359>

**Alexander M. Lerer** – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Applied Electrodynamics and Computer Modeling, The Faculty of Physics, Southern Federal University, Zorge St., 5, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

E-mail: [lerer@sfedu.ru](mailto:lerer@sfedu.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6788-3045>

**Larisa A. Reznichenko** – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Smart Materials and Nanotechnologies, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Stachki av., 194, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

E-mail: [lareznichenko@sfedu.ru](mailto:lareznichenko@sfedu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-4591-1601>

#### Author contribution statement:

Astafiev P. A. – problem statement, literature analysis, description of results, drawing conclusions, preparation and editing of text, tabular and graphical presentation of results.

Andryushin K. P. – development of the concept of the article, setting up an experiment, processing experimental data, description of results, drawing conclusions, scientific editing of the text.

Lerer A. M. – description of results, scientific editing of the text.

Reznichenko L. A. – description of results, scientific editing of the text.

Статья поступила в редакцию 08.08.2024; принята к публикации после рецензирования 28.08.2024; опубликована онлайн 24.10.2024.

Submitted 08.08.2024; accepted 28.08.2024; published online 24.10.2024.