

УДК 620.3:535.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЗЕРКАЛ КАРТРИДЖНОГО ТИПА

© 2023 г. В. В. Топоровский¹, *, В. В. Самаркин¹, А. В. Кудряшов¹, И. В. Галактионов¹, А. Ю. Малыхин², А. А. Панич²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук”, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Южный федеральный университет”, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: topor@activeoptics.ru

Поступила в редакцию 07.07.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Рассмотрены электрофизические и механические параметры пьезокерамических материалов, изготовленных на основе цирконата-титаната свинца. В соответствии с полученными данными были разработаны модули с многослойными актюаторами с площадью поперечного сечения 4×4 мм, номинальным перемещением до 4.3 мкм и емкостью элемента 12 нФ для создания деформируемых зеркал картриджного типа.

DOI: 10.31857/S0367676523702836, EDN: FGATNY

ВВЕДЕНИЕ

Многообразие областей применения корректоров волнового фронта предопределяет необходимость улучшения характеристик существующих или создания новых устройств по компенсации искажений лазерного излучения. Более того, намечена тенденция на создание надежных и миниатюрных корректоров с высокой плотностью управляющих элементов [1, 2]. В целях увеличения пространственного разрешения актюаторов корректоров волнового фронта существуют различные технические и технологические возможности: путем травления, литографии, методами химического, физического осаждения [3], использование жидкокристаллических (ЖК) элементов [4], лазерной гравировки, сварки расщепленным электродом [5]. Подобные технологии используются для создания деформируемых МЭМС-зеркал [6], ЖК-модуляторов света [7] или биморфных корректоров волнового фронта [8, 9]. Тем не менее, в конструкции гибких зеркал пьезоактюаторного типа [10–] увеличение плотности управляющих элементов сопряжено с проблемой создания надежных пьезоэлементов на базе материалов с высоким значением пьезомодуля для получения необходимой локальной деформации отражающей поверхности.

В данной работе рассмотрена возможность создания новых материалов на основе цирконата-титаната свинца с улучшенными электрофизическими

и механическими свойствами с целью создания деформируемых зеркал пьезоактюаторного типа.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗМЫТЫМ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

При изготовлении пьезоэлектрических деформируемых зеркал в качестве материала для создания управляющих элементов применяются твердые растворы на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) ввиду их высоких электрофизических свойств (пьезокерамических коэффициентов d_{31} , d_{33}) [13]. Тем не менее, возникает необходимость создания материалов с возможностью точной корректировки параметров пьезокерамических материалов. ЦТС-керамика является уникальной сегнетоэлектрической системой, где могут быть реализованы “размытые” фазовые переходы с целью увеличения морфотропной области [14]. Такие системы называются сегнетоэлектриками-релаксорами [15]. Подобного эффекта можно достичь путем легирования в систему ЦТС комбинированных добавок магнониобата свинца, который в свою очередь является ярким представителем сегнетоэлектриков-релаксоров [16], а также титаната бария-стронция. Установлено, что уникальные свойства релаксоров обусловлены возникновением и ростом нанодоменов в кристалле вследствие беспорядка в окру-

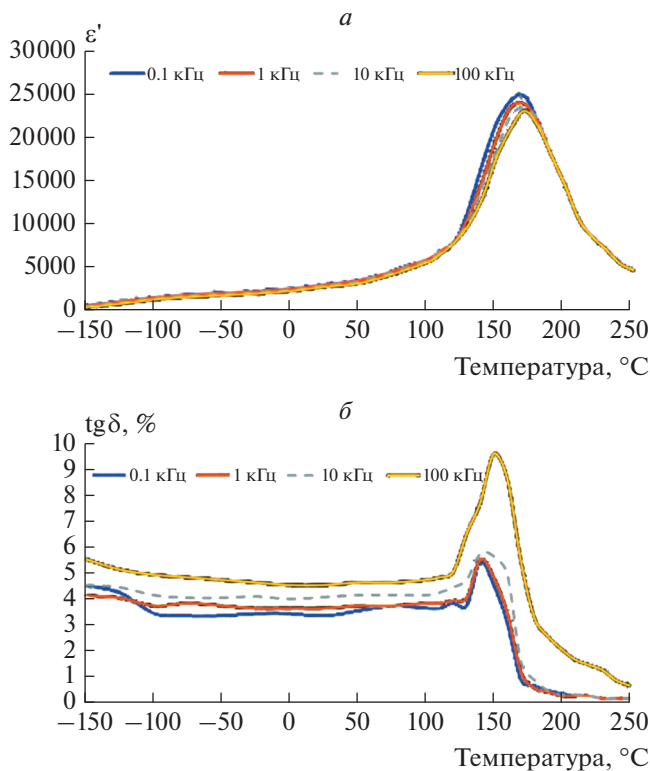


Рис. 1. Температурно-частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$ (a) и тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta(T)$ (б) исследуемого неполяризованного состава.

жении разных ионов, находящихся в кристаллографически эквивалентных положениях [17].

Был изготовлен материал ПКП-12 на основе цирконата-титаната с легированием магния-ниобата свинца и титаната бария-стронция на предмет исследования его электрофизических и механических свойств с целью установления и выявления подобия поведения разработанного материала с сегнетоэлектриками-релаксорами.

Чтобы определить основные параметры материала был изготовлен ряд образцов по обычной керамической технологии. На поверхность всех разработанных образцов, за исключением элементов с продольной поляризацией, были нанесены серебряные электроды путем вжигания серебро-содержащей пасты. Путем прикладывания электрического поля 8 кВ/см в течение 10 мин при температуре 120 $^{\circ}\text{C}$ с последующим прямым естественным охлаждением до комнатной температуры образцы были поляризованы в воздушной среде.

Для получения образцов с продольной поляризацией спеченный блок разделялся на отдельные элементы с электродами, нанесенными путем химического осаждения [18].

При помощи динамических методов измерения были исследованы основные электромеханические свойства материала: относительная ди-

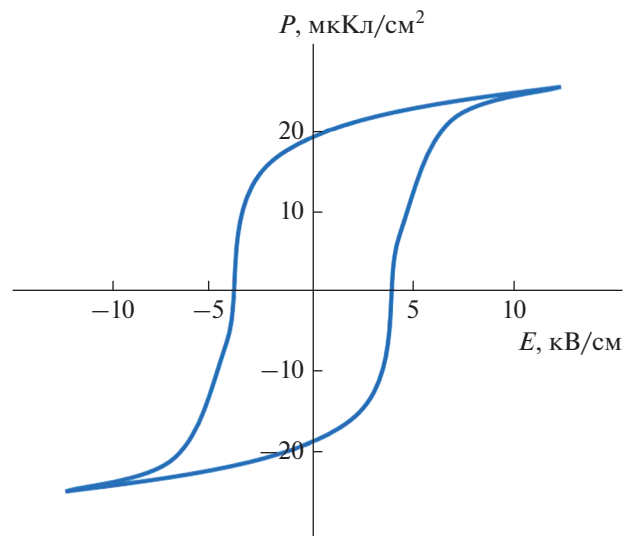


Рис. 2. Петля диэлектрического гистерезиса материала ПКП-12.

электрическая проницаемость $\epsilon_{33}^T/\epsilon^0$ и $\epsilon_{11}^T/\epsilon^0$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, коэффициенты электромеханической связи $k_p, k_{15}, k_{33}, k_{31}, k_t$ пьезомодули d_{31}, d_{33}, d_{15} , скорости звука V_1^E, V_4^D, V_3^D , механическая добротность Q_m , коэффициент Пуассона $\delta\rho$ и плотность ρ .

Для получения значений электрической емкости, частоты резонанса и антирезонанса поляризованных пьезокерамических образцов использовался прецизионный измеритель импеданса Wayne Kerr Electronics WK 6510B.

На рис. 1 представлены температурно-частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon' = \epsilon/\epsilon_0$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость материала) и $\text{tg}\delta$ неполяризованной керамики на частотах 0.1, 1, 10 и 100 кГц.

В рассматриваемом диапазоне частот явно прослеживается локальный сдвиг T_m по мере изменения частоты (рис. 1a), что в явном виде характерно для сегнетоэлектриков-релаксоров. Помимо этого, наблюдается появление эффекта дисперсии, можно выделить появление дисперсии (расщепление кривых на разных частотах) при температуре существенно ниже T_m . Максимум дисперсии диэлектрической проницаемости наблюдается при температуре порядка 130 $^{\circ}\text{C}$. Также стоит отметить, что максимум $\text{tg}\delta(T)$ имеет несимметричный вид (рис. 1б), что также является отличительной чертой сегнетоэлектрических материалов с размытым фазовым переходом [19].

Также было исследовано поведение поляризации полученного материала в зависимости от приложенного внешнего поля. На рис. 2 приведена петля диэлектрического гистерезиса исследуе-

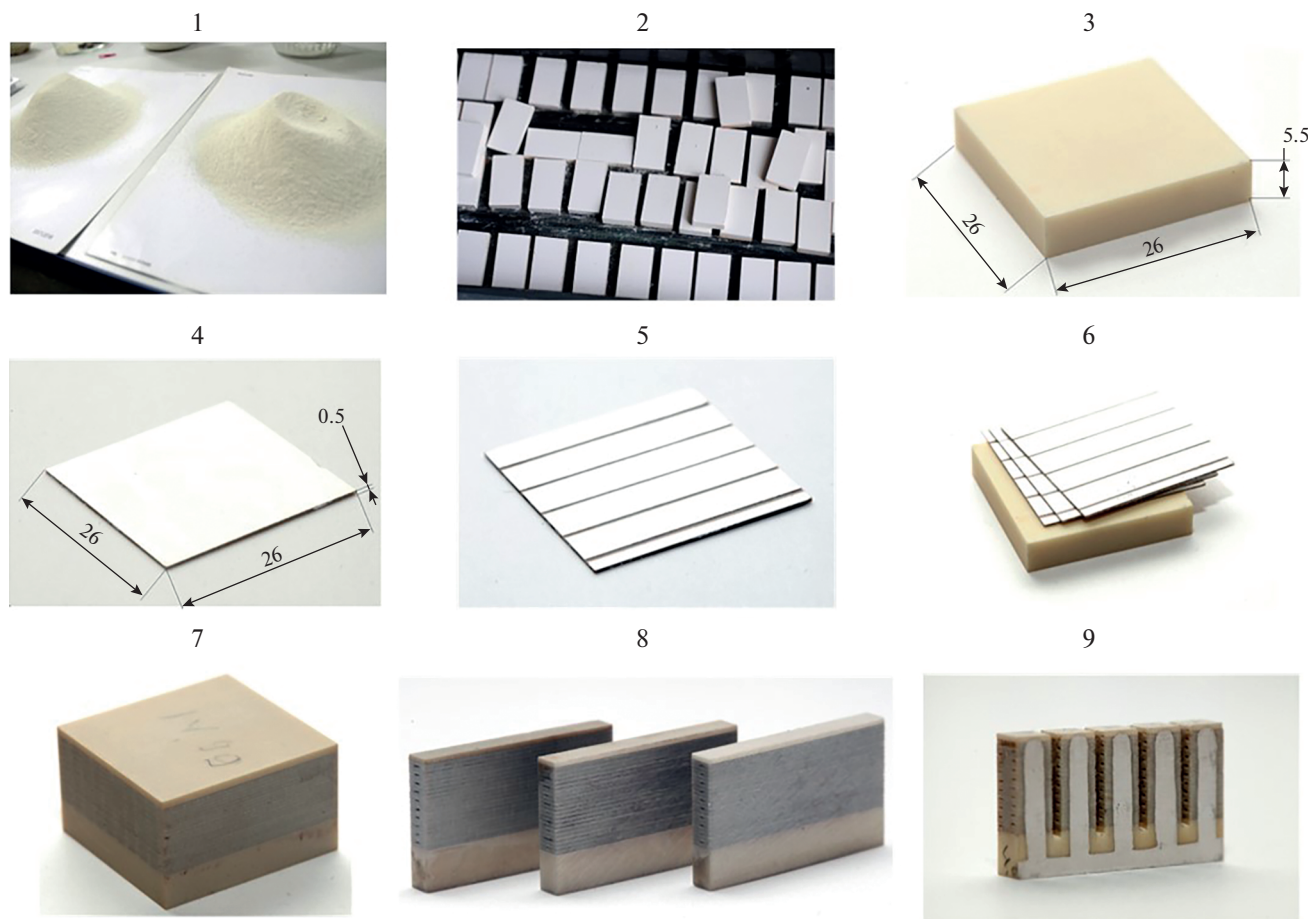


Рис. 3. Схема технологического цикла производства пьезокерамических модулей для деформируемого зеркала картриджного типа.

мого материала, из которой определена величина коэрцитивного поля $E_C \approx 4$ кВ/см. Петля гистерезиса является насыщенной и близка по форме к петлям, характерным для сегнетомягких керамик.

После этого были измерены электрофизические характеристики данного состава при нормальных условиях ($T = 20 \pm 5^\circ\text{C}$). Измеренные данные представлены в табл. 1. На основании полученных данных можно установить, что исследуемый материал обладает высокими значениями диэлектрической проницаемости, пьезомодулей и коэффициентов электромеханической связи, что в итоге позволяет использовать данный материал при изготовлении устройств для задач актюаторной техники.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ С МНОГОСЛОЙНЫМИ АКТЮАТОРАМИ ДЛЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЗЕРКАЛ КАРТРИДЖНОГО ТИПА

На основании данных исследования характеристик пьезоматериалов были изготовлены мно-

гослойные модули с 5 отдельными управляющими элементами. Процесс производства многоэлементных пьезокерамических актюаторов показан на рис. 3 и состоит из следующих этапов:

Сначала была приготовлена шихта (смесь исходных материалов) пьезокерамического материала ПКП-12 по классической керамической технологии из оксидов металлов. Материал был синтезирован методом твердофазных реакций путем обжига шихты в муфельной печи при температуре 850°C . После чего полученная шихта измельчалась в порошок и гранулировалась (1).

Затем, гранулированный материал ПКП-12 прессовался в блоки, которые впоследствии высушивались в сушильном шкафу и обжигались в муфельной печи при температуре 1230°C (2). Спеченные блоки шлифовались по всем сторонам, затем были распилены на базовые элементы толщиной 5 мм (3) и активные слои толщиной 0.5 мм (4).

После этого, на активные пьезоэлектрические слои была нанесена серебросодержащая паста, которая вжигалась путем плавного отжига при

Таблица 1. Электрофизические характеристики исследуемого материала

Параметр	Единица измерения	Значение
T_c	°C	160
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ (1 кГц)	—	4950
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$ (1 кГц)	—	4400
$\text{tg}\delta$ (1 кГц)	%	1.5
k_p	—	0.66
k_{15}	—	0.71
k_{33}	—	0.70
k_{31}	—	0.38
kt	—	0.53
$ d_{31} $	10^{-12} C/N	325
d_{33}	10^{-12} C/N	660
d_{15}	10^{-12} C/N	940
V_1^E	10^3 м/с	2770
V_4^D	10^3 м/с	2470
V_3^D	10^3 м/с	3700
Q_m	—	60
δp	—	0.34
ρ	кг/м ³	7400

Таблица 2. Основные параметры изготовленных пьезокерамических модулей

Параметр	Значение
Емкость одного актюатора в модуле, $C_{\text{ном}}$	11–12 нФ
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, не более	0.015
Перемещение при управляющем напряжении 300 В	4.1–4.3 мкм

температуре до 700°С. Далее, часть серебряного покрытия снималась с целью разделения дорожек (5).

Подготовленные базовые элементы размером $26 \times 26 \times 5.5$ мм собирались в пакет с активными слоями ($26 \times 26 \times 0.5$ мм), после чего происходила компрессионная сварка пьезокерамического блока (6). Собранный и сваренный блок снова подвергался механической обработке (шлифовке торцевых поверхностей) (7), после чего происходила его распиловка на отдельные модули (8).

Далее, разрезанные части блока подвергались дальнейшей распиловке на отдельные актюаторы таким образом, что активные слои разделялись между собой зазором в 1 мм, но оставались при этом жестко закреплены на базовом элементе (9).

Каждый актюатор полученного модуля покрывался слоем серебросодержащей пасты (методом вжигания) с целью коммутации электродов активных слоев. Затем к каждому токовыводу припаивался провод МГТФ толщиной 0.4 мм (рис. 4). Далее осуществлялся процесс поляризации пьезокерамики и измерение характеристик отдельных актюаторов в модуле. Полученные значения приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлены подобные и отличительные черты в поведении электрофизических свойств пьезокерамического материала ПКП-12. Показано, что по упругим свойствам данный материал стоит очень близко к сегнетоэлектрикам-релаксорам, имея высокую податливость в широком температурном интервале. Также полученный материал имел высокое значение продольного пьезокерамического коэффициента 660 пКл/Н и низкое значение тангенса диэлектрических потерь (не более 1.5%).

На основе исследования электрофизических и механических параметров полученных материалов были изготовлены пьезокерамические модули с 5 многослойными актюаторами размером $4 \times 4 \times 15$ мм. Емкость отдельного актюатора составила 12 нФ. Максимальное перемещение при управляющем напряжении в 300 В лежало в диапазоне 4.1–4.3 мкм.

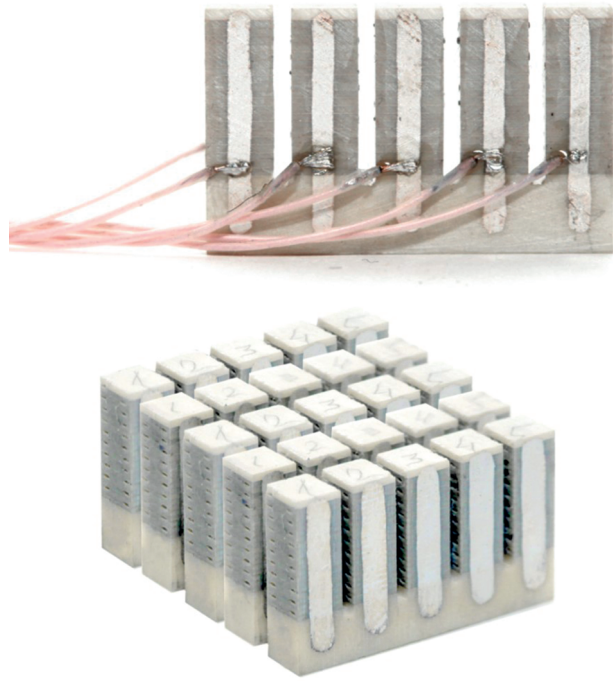


Рис. 4. Общий вид изготовленных пьезокерамических модулей с коммутированными проводами для приложения управляющих напряжений.

Разработанные пьезоэлементы будут использованы для создания деформируемого зеркала картриджного типа с возможностью получения необходимой конфигурацией управляющих элементов путем комбинирования полученных пьезокерамических модулей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00706П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmerbauch A.E.M., Vasquez-Beltran M.A., Vakis A.I. et al. // Appl. Optics. 2020. V. 59. P. 8077.
2. Топоровский В.В., Скворцов А.А., Кудряшов А.В. и др. // Опт. журн. 2019. Т. 86. № 1. С. 40; Toporovskii V.V., Skvortsov A.A., Kudryashov A.V. et al. // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. No. 1. P. 32.
3. Bifano T. // Nature Photonics. 2011. V. 5. P. 21.
4. Wernicke G., Krueger S., Gruber H. et al. // Proc. SPIE. 2001. V. 4596. P. 182.
5. Toporovsky V., Kudryashov A., Skvortsov A. et al. // Photonics. 2022. V. 9. No. 5. Art. No. 321.
6. Cornelissen S., Bifano T., Bierden P. // Proc. SPIE. 2012. V. 8253. Art. No. 825306.
7. Notaros M., Dyer T., Raval M. et al. // Opt. Express. 2022. V. 30. P. 13790.
8. Toporovskiy V., Kudryashov A., Samarkin V. et al. // Appl. Optics. 2019. V. 58. No. 22. P. 6019.
9. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I. et al. // Appl. Sci. 2022. V. 12. No. 3. Art. No. 1144.
10. Samarkin V., Sheldakova J., Toporovsky V. et al. // Appl. Optics. 2021. V. 60. P. 6719.
11. Ahn K., Rhee H.-G., Yang H.-S., Kihm H. // Opt. Express. 2018. V. 26. P. 9724.
12. Ahn K., Kihm H. // Opt. Lasers Eng. 2020. V. 126. Art. No. 105864.
13. Немыкин В.В., Бурханов А.И., Панич А.Е. // Инж. вестн. Дона. 2021. № 12. С. 1276.
14. Lushnikov S.G., Fedoseev A.I., Gvasaliya S.N. et al. // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. Art. No. 104122.
15. Viehland D., Jang S.J., Cross L.E. et al. // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. Art. No. 8003.
16. Смоленский Г.А., Юшин Н.К., Смирнов С.И. // ФТТ. 1985. Т. 27. С. 801.
17. Bokov A. A., Ye Z.-G. // J. Mater. Sci. 2006. V. 41. P. 31.
18. Ильин В.А. Металлизация диэлектриков. Ленинград: Машиностроение, 1977. 80 с.
19. Isupov V.A. // Ferroelectrics. 1992. V. 131. P. 41.

Investigation of electrophysical and mechanical parameters of piezoceramic materials for cartridge-type deformable mirrors

V. V. Toporovsky^{a, *}, V. V. Samarkin^a, A. V. Kudryashov^a, I. V. Galaktionov^a,
A. Yu. Malykhin^b, A. A. Panich^b

^aSadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

^bSouthern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia

*e-mail: topor@activeoptics.ru

We investigated electrophysical and mechanical parameters of the piezoceramic materials based on lead zirconate titanate. In correspondence with obtained data, modules with multilayer actuators with cross-section area of 4×4 mm, nominal displacement up to $4.3 \mu\text{m}$ and capacitance of the element with 12 nF for cartridge-type deformable mirror were produced.

Keywords: lead zirconate titanate, piezoceramic module, cartridge-type deformable mirror