

05:12:08

## Прогнозирование пьезоэлектрического отклика новых анизотропных 1–2-композигов

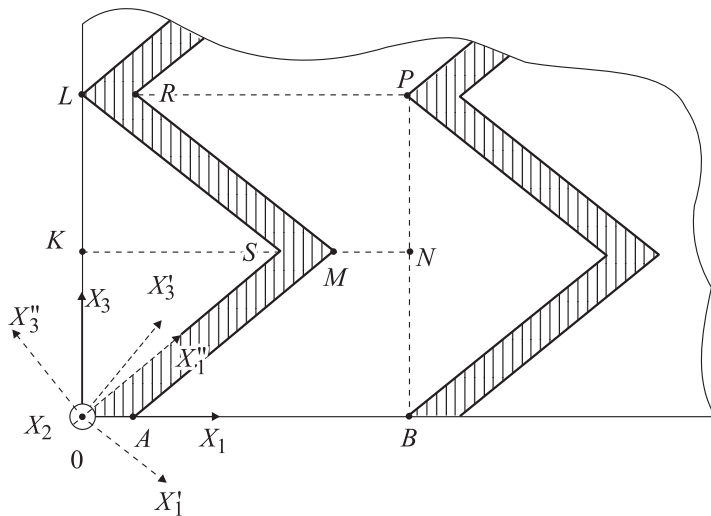
© С.В. Глушанин, В.Ю. Тополов

Ростовский государственный университет, Ростов-на-Дону  
E-mail: topolov@phys.rsu.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2002 г.

Предложена модель 1–2-композигов, состоящего из зигзагообразных сегнетопьезокерамических включений и пьезопассивной полимерной матрицы. Проанализированы ориентационно-концентрационные зависимости эффективных пьезокоэффициентов  $d_{3j}^*$  и  $g_{3j}^*$ , рассчитанных при параметрическом задании характеристик микроструктуры композигов. Показано, что микроструктура способствует немонотонному и знакопеременному поведению  $d_{3j}^*$  и  $g_{3j}^*$ , а следовательно, изменению пьезоэлектрической анизотропии и пьезочувствительности 1–2-композигов в широких пределах.

Прогресс в области физики активных диэлектриков невозможен без создания новых гетерогенных материалов с наперед заданными свойствами. Важная роль при этом отводится пьезоактивным композигам (ПК), которые являются более эффективными по сравнению с многочисленными сегнетопьезокерамиками (СПК) [1,2] и находят применения в акустике, твердотельной электронике, пьезоэлектрической и медицинской технике. Одно из основных достоинств двухкомпонентных ПК — высокая пьезочувствительность — исследовалась для связностей 1–3 [3–7], 2–2 [8] и 1–1 [9,10]. Вопрос об эффективности ПК типа 1–2 остается открытым из-за разнообразия схем [11,12] непрерывного распределения компонентов вдоль одной и двух осей прямоугольной системы координат  $(X_1X_2X_3)$  и сложности соответствующих процедур усреднения физических свойств компонентов при учете электромеханического взаимодействия последних. Цель настоящего сообщения — проанализировать особенности пьезоэлектрического отклика и преимущества 1–2-ПК на основе СПК.



**Рис. 1.** Сечение 1–2-ПК „СПК-полимер“ плоскостью  $(X_1OX_3)$ . СПК-пластины выделены штриховкой,  $\angle KSL = \angle KSO = \varphi$  — угол поворота пластин,  $|OB| = |OL|$  — „период идентичности“ ПК.

Идея построения 1–2-ПК с помощью зигзагообразных СПК-элементов связана с распространенностью зигзагообразных доменных границ в сегнетоэлектрических и родственных кристаллах (например, типа  $Gd_2(MoO_4)_3$ ), которые используются в качестве элементов различных акустоэлектронных и электромеханических устройств [13]. Важно упомянуть и то, что недавно [6,7] на примере 1–3-ПК исследовалась роль СПК-включений (стержней), ориентированных под разными углами относительно оси поляризации. В предлагаемом нами 1–2-ПК СПК-пластины, пронизывающие полимерную матрицу вдоль оси  $OX_2$ , повернуты на угол  $\varphi$  по часовой стрелке или против нее вокруг этой оси, образуя систему зигзагов (рис. 1) вдоль оси поляризации  $OX_3$ . Объемная концентрация СПК-пластин  $t = |OA|/|OB| = |LR|/|LP|$  изменяется так, что выполняется условие  $|KM| < |KN|$ , т.е. полимерный компонент в интервале  $MN$  является непрерывным вдоль осей  $OX_2$  и  $OX_3$  (двухсвязным), а СПК-компонент в интервале  $KM$  — непрерывным вдоль оси  $OX_2$  (односвязным). При равных толщинах слоев с повернутыми

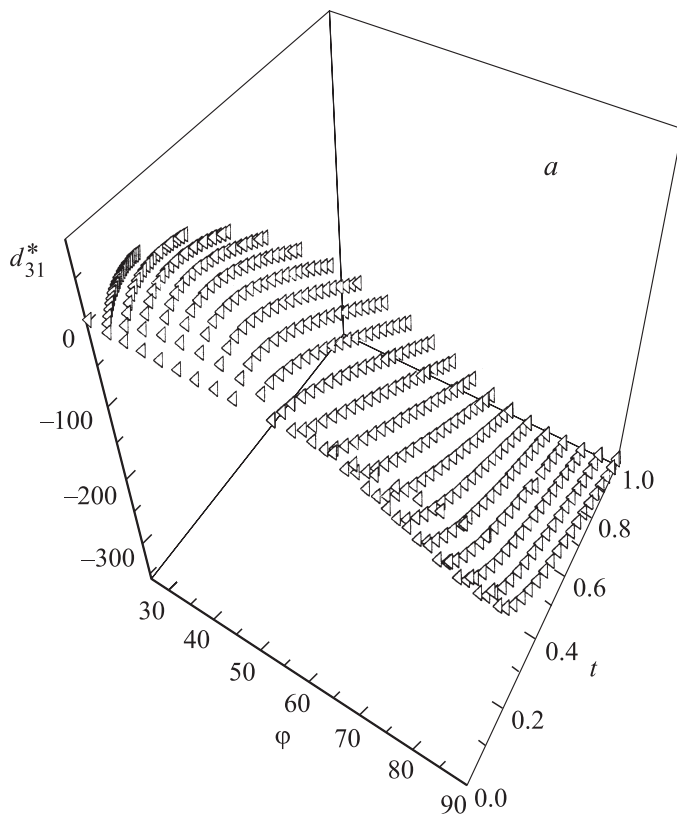
на угол  $\pm\varphi$  пластинами  $|OK| = |KL|$ , а объемная концентрация СПК удовлетворяет неравенству

$$0 < t < 1 - 0.5 \operatorname{ctg} \varphi. \quad (1)$$

Нарушение условия (1) в области  $t < 1$  приводит к связности 1–1. Отметим, что в отличие от других ПК типа 1– $\beta$  [3–7,9,10,12] характеристики микроструктуры данного 1–2-ПК задаются углом поворота в интервале  $\operatorname{arccstg} 2 < \varphi < 90^\circ$ .

Для определения эффективных упругих, пьезо- и диэлектрических свойств 1–2-ПК последовательно усредняются электромеханические константы компонентов по концентрации  $t$ , а затем усредняются электромеханические константы слоев типов  $KLPN$  и  $OKNB$  при учете равенства их толщин  $|OK|$  и  $|KL|$  (рис. 1). Связность каждого из вышеупомянутых слоев в отдельности — 2–2, и к нему применима процедура усреднения [14] в повернутой системе координат  $(X'_1 X'_2 X'_3)$  или  $(X''_1 X''_2 X''_3)$ , где  $OX'_3 \perp LS$  и  $OX''_3 \perp OS$ . Граничные условия для электрических и механических полей [8,14] задаются при  $x'_3 = \operatorname{const}$  (слои типа  $KLPN$ ) или  $x''_3 = \operatorname{const}$  (слои типа  $OKNB$ ). Полученные наборы электромеханических констант указанных слоев используются при дальнейшем усреднении по толщине ПК-образца и учете граничных условий при  $x_3 = \operatorname{const}$ . В результате все компоненты тензоров упругих податливостей  $s_{ab}^{*E}$ , пьезомодулей  $d_{ij}^*$  и диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_{pp}^{*\sigma}$  1–2-ПК „СПК-полимер“ определяются в системе координат  $(X_1 X_2 X_3)$  в зависимости от параметров  $(\varphi, t)$ . Соответствующие расчетные ориентационно-концентрационные зависимости эффективных электромеханических свойств указывают на то, что изображенный на рис. 1 1–2-ПК описывается точечной группой симметрии  $mm2$ . Это означает, что его пьезоэлектрические свойства вдоль оси поляризации  $OX_3$  характеризуются ненулевыми пьезокоэффициентами  $d_{3j}^*(\varphi, t)$ ,  $e_{3j}^*(\varphi, t)$ ,  $g_{3j}^*(\varphi, t)$  и  $h_{3j}^*(\varphi, t)$ , где  $j = 1; 2; 3$ . Приведенные на рис. 2 зависимости  $d_{31}^*(\varphi, t)$  и  $g_{3j}^*(\varphi, t)$  рассчитаны при использовании электромеханических констант ПКР-7М (СПК на основе  $\operatorname{Pb}(\operatorname{Zr}, \operatorname{Ti})\operatorname{O}_3$ ) и аральдита [15], соответствующих комнатной температуре;  $d_{3j}^*(\varphi, t)$  с  $j = 2; 3$  определяются из соотношения  $d_{3j}^* = g_{3j}^* d_{31}^* / g_{31}^*$ .

Отличительной особенностью пьезокоэффициентов 1–2-ПК является их знакопеременное и немонотонное поведение (рис. 2,  $a, b, d$ ). Равенства  $g_{31}^* = 0$  и  $g_{33}^* = 0$  или  $d_{31}^* = 0$  и  $d_{33}^* = 0$ , обусловленные



**Рис. 2.** Расчетные ориентационно-концентрационные зависимости эффективных пьезокоэффициентов 1–2-ПК „СПК ПКР-7М–аральдит“:  $a$  —  $d_{31}^*(\varphi, t)$  (в  $\text{pC/N}$ );  $b$  —  $g_{31}^*(\varphi, t)$ ;  $c$  —  $g_{32}^*(\varphi, t)$ ;  $d$  —  $g_{33}^*(\varphi, t)$  (в  $\text{mV} \cdot \text{m/N}$ ).

определенной ориентацией СПК-пластин относительно  $OX_3$  и влиянием полимерного компонента на внутренние поля вдоль  $OX_1$ , позволяют варьировать пьезоэлектрическую анизотропию ПК  $g_{33}^*/g_{31}^* = d_{33}^*/d_{31}^*$  в широких пределах даже при небольших изменениях параметров  $(\varphi, t)$  и малой анизотропии пьезомодулей ПКР-7М [15]  $d_{33}/d_{31} \approx -2$ . Вместе с тем выполнение условия  $\text{sgn} d_{32}^* = \text{sgn} g_{32}^* < 0$  во всей области допустимых значений  $(\varphi, t)$  (рис. 2,  $c$ ) объясняется непрерывностью

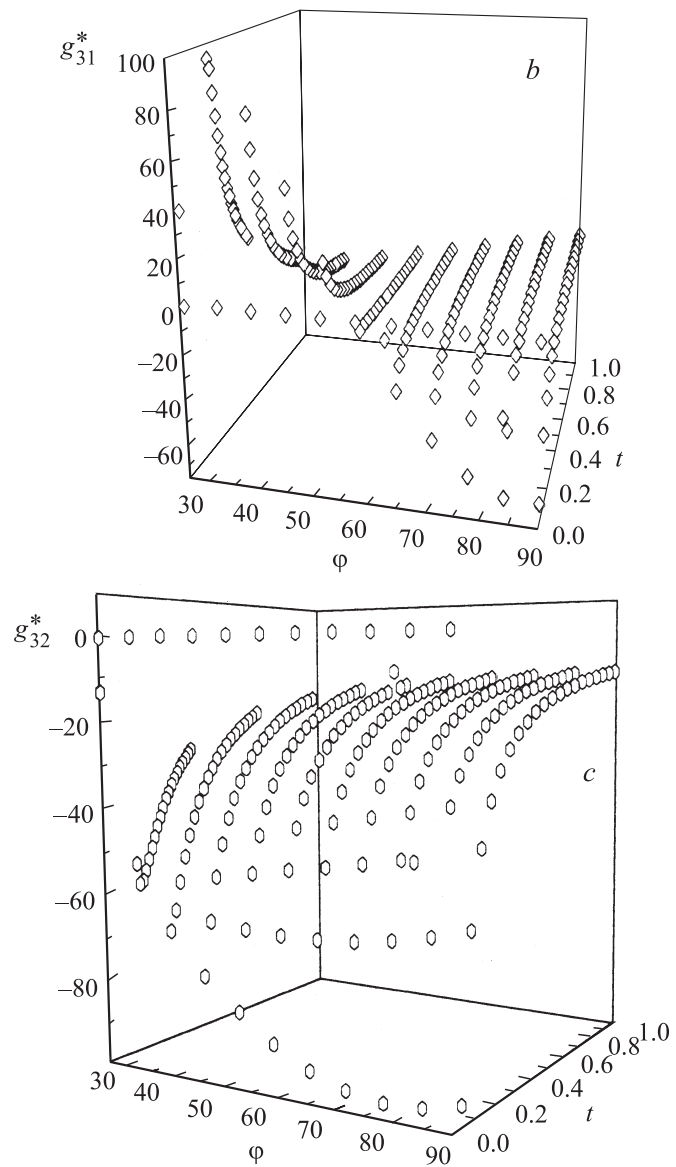


Рис. 2 (продолжение).

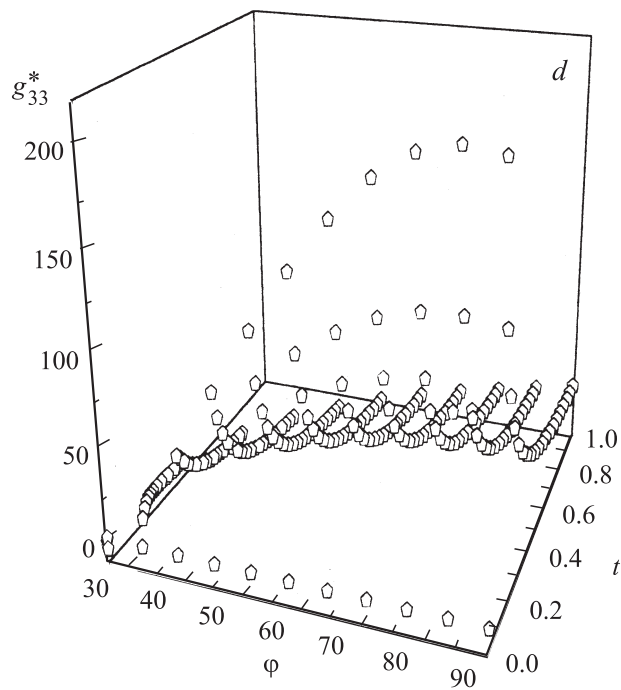


Рис. 2 (продолжение).

СПК-компонента вдоль оси  $OX_2$ . При  $\varphi \gtrsim 58^\circ \text{sgn } d_{31}^* = \text{sgn } d_{31} < 0$  и  $\text{sgn } g_{33}^* = \text{sgn } g_{33} > 0$  независимо от  $t$ , что в некоторой степени сближает данный 1–2-ПК с исследовавшимся в работе [8] 2–2-ПК на основе СПК типа  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ .

На поведение пьезокоэффициентов  $g_{3j}^*(\varphi, t) = d_{3j}^*(\varphi, t)/\varepsilon_{33}^{*\sigma}(\varphi, t)$  существенно влияет ориентация СПК-пластин. Именно изменение угла их поворота  $\varphi$  приводит к изменениям значений локальных  $\max g_{3j}^*(\varphi, t)$  ( $j = 1; 3$ ) и  $\min g_{3j}^*(\varphi, t)$ , имеющих место в узком интервале концентраций  $0 < t < 0.1$  (рис. 2, *b–d*). При  $t \ll 1$  диэлектрическая проницаемость ПК  $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$  на 1–3 порядка меньше  $\varepsilon_{33}^\sigma$  СПК, а модули производных  $|\partial d_{3j}^*/\partial t|$  достигают наибольших значений. Кроме того, с возрастанием  $\varphi$  наиболее заметно изменяется пьезокоэффициент  $g_{31}^*(\varphi, t)$  (рис. 2, *b*), что связано как с ролью полимерного компонента, так и с из-

менением баланса между пьезомодулями  $d_{3j}$  СПК-компонента. Этот баланс играет решающую роль в формировании зависимостей  $d_{3j}^*(\varphi, t)$  и, как следствие, приводит к разнообразным комбинациям пьезокоэффициентов (например, имеющих знаки  $\text{sgn } g_{31}^* = -\text{sgn } g_{32}^* = -\text{sgn } g_{33}^* > 0$  или  $\text{sgn } g_{31}^* = -\text{sgn } g_{32}^* = \text{sgn } g_{33}^* > 0$ , рис. 2, *b-d*), не свойственным СПК [1,15] и ранее исследованным двухкомпонентным ПК [3,4,6–10]. Расчетные значения  $\max |g_{3j}^*(\varphi, t)|$  более чем в 10 раз превышают  $|g_{3j}|$  СПК ПКР-7М, что свидетельствует о несомненных преимуществах данного 1–2-ПК и позволяет охарактеризовать его как высокочувствительный анизотропный материал.

Таким образом, результаты исследования пьезоэлектрического отклика 1–2-ПК „СПК-полимер“ указывают на нетривиальность поведения эффективных пьезокоэффициентов  $d_{3j}^*(\varphi, t)$  и  $g_{3j}^*(\varphi, t)$  и их анизотропии в области допустимых значений  $(\varphi, t)$ . Наличие зигзагообразных СПК-включений, обуславливающих симметрию  $mm2$ , является основным фактором, влияющим на пьезочувствительность и анизотропию пьезоэлектрических свойств 1–2-ПК. Наконец, при рассмотрении связности 1–2 обнаружены новые возможности практического использования электромеханических свойств низкосимметричных ПК.

Авторы признательны д. т. н. А.Е. Паничу и д. ф.-м. н., проф. А.В. Турику за постоянный интерес к тематике исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке по теме 11.01.02 НИР РГУ.

## Список литературы

- [1] *Uchino K.* Piezoelectric actuators and ultrasonic motors. Boston etc.: Kluwer Acad. Publ., 1997. 349 p.
- [2] *Safari A.* // Mater. Res. Innov. 1993. V. 2. N 5. P. 263–269.
- [3] *Греков А.А., Крамаров С.О., Куприенко А.А.* // Механика композитных материалов. 1989. № 1. P. 62–69.
- [4] *Bennett J., Hayward G.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., a. Freq. Contr. 1996. V. 43. N 1. P. 98–107.
- [5] *Тополов В.Ю., Турик А.В.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 84–89.
- [6] *Nan C.-W., Weng G.J.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N 1. P. 416–423.
- [7] *Nan C.-W., Liu L., Guo D., Li L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. N 22. P. 2977–2984.

- [8] Grekov A.A., Kramarov S.O., Kuprienko A.A. // *Ferroelectrics*. 1987. V. 76. N 1–2. P. 43–48.
- [9] Глушанин С.В., Тополов В.Ю. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 15. С. 15–21.
- [10] Glushanin S.V., Topolov V.Yu. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 34. N 16. P. 2518–2529.
- [11] Newnham R.E., Skinner D.P., Cross L.E. // *Mater. Res. Bull.* 1978. V. 13. N 5. P. 525–536.
- [12] Topolov V.Yu., Glushanin S.V. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002. V. 35. N 16. P. 2008–2014.
- [13] Алексеев А.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. N 6. С. 92–97.
- [14] Аксакава Е., Farnell G.W. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. N 9. P. 4469–4473.
- [15] Тополов В.Ю., Турик А.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В 9. С. 26–32.