

05.2

© 1991

## ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ЧАСТИЧНО ЗАЖАТЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКАХ

Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева

Пьезоэлектричество в 20 ацентричных классах кристаллов обусловлено их внутренней полярностью, нескомпенсированной в 10 пьезоэлектрических классах (имеющих особенное полярное направление) и полностью скомпенсированной в остальных 10 классах. Предполагалось, что в последних возможен только третичный пьезоэффект [1] – результат неоднородного напряженного состояния, индуцированного векторным тепловым воздействием (градиентом температуры). Однородное (скалярное) изменение температуры в механически свободных пьезоэлектриках не приводит к векторному (пьезоэлектрическому) отклику, поскольку различные пьезоэлектрические вклады от термических деформаций электрически полностью компенсируются. Очевидно, что теплоэлектрическая реакция отсутствует и в полностью зажатых пьезоэлектриках.

Нами показано, что в случае исключения части термических деформаций (частичного зажатия) пьезоэлектрик ведет себя подобно пьезоэлектрику даже при однородном тепловом возбуждении. Разрешенная термодформация индуцирует нескомпенсированную электрическую поляризацию, причем состояние кристалла является одинаковым во всех его точках (однородно-напряженным). Этот эффект отличается как от вторичного пьезоэффекта, свойственного только свободным пьезоэлектрическим кристаллам, так и от третичного пьезоэффекта и может быть определен как термопьезоэлектричество (ТПЭЛ), которое может быть реализовано в любом пьезоэлектрике. Эффективный пьезокоэффициент в различных пьезоэлектриках лежит в пределах 0.5–500 мкКл/(м<sup>2</sup> К), т.е. в некоторых пьезоэлектриках сравним по величине с пьезокоэффициентом сегнетоэлектриков. Частичное зажатие реализуется различными способами: закреплением тонкой пьезоэлектрической пластинки на жесткой подложке или естественным ограничением радиальных деформаций тонкого диска выше частоты электромеханического резонанса и др.

Для расчета эффективного пьезокоэффициента  $p_i = dP_i/dT$  использованы термодинамические уравнения состояния ацентричного, но не пьезоэлектрического кристалла при  $E=0$  (кристалл предполагается электрически свободным):

$$dS_n = S_{mn}^{E,T} dT_n + \alpha_n^E dT, \quad dP_i = d_{in}^T dT_n, \quad (1)$$

где  $T$  - температура,  $P_i$  - поляризованность,  $S_n$  и  $T_m$  - компоненты тензоров деформации и механического напряжения;  $S_{mn}^{E,T}$ ,  $d_{in}^T$  и  $\alpha_n^E$  - компоненты тензоров упругой податливости, пьезомодуля и термического расширения;  $i=1, 2, 3$  и  $n=1, 2, \dots, 6$ . Индексы  $E$  и  $T$  указывают на постоянство этих параметров при определении компонент тензоров. Таким образом, параметр  $P_i$  представляет собой традиционно определяемый изотермический токовый пьезокоэффициент.

Уравнения (1) конкретизируются при задании граничных условий. В случае тонкой пластины, закрепленной на идеально жесткой подложке, полностью подавляющей тангенциальные деформации, термодеформации  $dS_1 = dS_2 = 0$ . Разрешенной является только термодеформация по толщине пластины ( $dS_3 \neq 0$ ), поскольку сдвиговые деформации однородным тепловым потоком не возбуждаются. При этих граничных условиях  $dT_1 \neq 0$ ,  $dT_2 \neq 0$ , но  $dT_3 = 0$ . Выбранной оси 3 соответствует одно из полярных направлений ацентричного кристалла, которое вследствие ограничения планарных деформаций пластины становится „особенным полярным“. В свободных пьезоэлектриках внутренняя полярность полностью скомпенсирована, а в частично зажатых - определяет направление максимального ТПЭЛ отклика.

Выражения для „пирокоэффициентов“, получаемые из решения уравнений (1) при указанных граничных условиях различаются для пьезоэлектриков различных классов. Например, для кубической системы (классы  $43m$  и  $23$ ), где полярные направления соответствуют четырем осям третьего порядка

$$P_{111} = \frac{2\sqrt{3} d_{14}^T \alpha^E}{4 S_{11}^{E,T} + 8 S_{12}^{E,T} + S_{44}^{E,T}} \quad (2)$$

К классу  $23$ , например, принадлежат широко используемые в технике силлениты - кристаллы  $Bi_{12}GeO_{20}$  и  $Bi_{12}SiO_{20}$ , для которых расчет по формуле (2) дает  $P_{111} = 25-30$  мкКл/(м<sup>2</sup> К). В пределах погрешности 30% эти данные согласуются с экспериментальными. К классу  $43m$  относятся полупроводники АШВ<sup>У</sup> и некоторые кристаллы АПВ<sup>У</sup> I со структурой сфалерита. Расчетные значения ТПЭЛ для большой группы кристаллов этой симметрии -  $P_{111} = 0.5 - 20$  мкКл/(м<sup>2</sup> К); данные для некоторых кристаллов этой группы приводятся в таблице.

В таблице приведены „пирокоэффициенты“ и для тригональной системы. Для неполярного класса  $32$ , к которому относится кварц, решение уравнений (1) для пластины среза Кюри дает:

$$P_{100} = \frac{d_{11}^T (\alpha_1^E S_{33}^{E,T} - \alpha_3^E S_{13}^{E,T})}{S_{11}^{E,T} S_{33}^{E,T} - (S_{13}^{E,T})^2} \quad (3)$$

Класс $\bar{3}m$		Класс $3m$		Класс $32$	
Кристалл	$p_{111}$	Кристалл	$p_{010}$	Кристалл	$p_{100}$
$ZnS$	1.9	Турмалин	0.3(?)	Теллур	10
$ZnSe$	0.7	Прустит	8-12	Селен	?
$GaAs$	1.5	Пираргирит	10-15	Берлинит	5.7
$GaP$	0.6	Тангалат лития	15-25	Каломель	8.7
$InSb$	0.5	Ниобат лития	30-50	Кварц	2.6

Из таблицы видно, что ТПЭЛ отклик в кристаллах класса  $32$  близок по величине или превосходит пироотклик линейных пироэлектриков ( $ZnO$ ,  $ZnSe$ ,  $CdS$ , турмалина и др.).

Относящийся к тригональной системе полярный класс  $3m$  интересен ТПЭЛ откликом в срезе  $(010)$ , который характеризуется

$$p_{010} = \frac{d_{22}^T (\alpha_1^{E, E, T} S_{33}^E - \alpha_3^E S_{13}^{E, T})}{S_{11}^{E, T} S_{33}^{E, T} - (S_{13}^{E, T})^2} \quad (4)$$

значения которого для ряда кристаллов приведены в таблице. Отметим, что в свободных кристаллах класса  $3m$  особым полярным направлением является  $[001]$ . Наши расчеты, подтвержденные экспериментом, показывают, что по порядку величины ТПЭЛ отклик в частично зажатом кристалле близок к пироотклику свободного кристалла (как известно, пирокоэффициент ниобата лития  $p_{001} \approx \approx 50$  мкКл/(м<sup>2</sup> К)).

Таким образом, ТПЭЛ – искусственно вызванное температурное изменение поляризованности путем частичного зажатия пьезоэлектриков – соизмеримо с первичным пироэффектом. Зависимость от граничных условий позволяет управлять величиной ТПЭЛ отклика, который может быть существенно усилен, если знак коэффициента термического расширения подложки отрицателен. Динамический ТПЭЛ отклик в окрестности пьезорезонанса может быть усилен в  $10^2 - 10^4$  раз в соответствии с высокой электромеханической добротностью пьезоэлектрических кристаллов (резонансное усиление обычного пироэффекта наблюдалось в [2]). За счет пьезоэлектриков существенно расширяется выбор кристаллов, которые могут быть использованы в неселективных приемниках излучения. При

этом можно ожидать снижения шумов вследствие отсутствия доменов в пьезоэлектриках. В пьезоэлектриках-полупроводниках, в частности в арсениде галлия термопьезоэлектричество открывает принципиальную возможность реализации интегральных (микроэлектронных) пьезоэлектрических детекторов. В высокоомном арсениде галлия вольтовая чувствительность  $\rho / (C_V \epsilon_0 \epsilon) \approx 0.015 \text{ В м}^2/\text{Дж}$ , т.е. такая же как и в пьезоэлектрической керамике. В других кристаллах группы 43 *m* этот параметр достигает  $0.1 \text{ В м}^2/\text{Дж}$ .

Авторы выражают признательность Л.А. Шувалову за обсуждение работы, а также В.Ф. Заворотному, С.К. Складенко и А.Г. Чепилко за помощь в проведении экспериментов.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Н а й Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967.  
[2] G l a s s А.М., А b r a m s R.L., // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 4455.

Киевский  
политехнический  
институт

Поступило в Редакцию  
23 июня 1991 г.