

## Лекция 7

### Пьезоэлектрический способ возбуждения и регистрации акустических волн

Наиболее распространенным способом возбуждения и регистрации упругих волн при УЗ контроле является *пьезоэлектрический способ*. Он основан на *прямом* и *обратном* пьезоэффекте.

*Прямой пьезоэффект* или *эффект Кюри*, открытый в 1880 году братьями Кюри, заключается в следующем. Если пьезоэлектрическую пластину с нанесенными на ее поверхность электродами, называемую *пьезоэлементом*, деформировать — сжимать или растягивать, в определенных направлениях, то она электрически поляризуется. На электродах появляются заряды, величина которых зависит от приложенного механического напряжения.

*Обратный пьезоэффект* заключается в деформация пьезоэлемента под действием электрического напряжения, приложенного к электродам.

Прямой пьезоэффект используется для регистрации УЗ-волн, обратный — для возбуждения.

Пьезоэлектрическими свойствами обладают многие природные анизотропные кристаллические диэлектрики — кварц, турмалин, сегнетова соль и др., примерно 1500 минералов. Для практических целей наибольшее применение получили кристаллический кварц и искусственные материалы — пьезокерамика, на основе цирконата-титаната свинца, обозначаемая аббревиатурой ЦТС, с указанием номера-марки материала. Отметим, что природный материал обладает пьезоэффектом, если его кристаллическая решетка не обладает центром симметрии.

Отличительная особенность пьезопреобразователей — высокая эффективность преобразования механической энергии в электрическую и наоборот, а также конструктивная простота.

### Основы пьезоэлектричества

Используя основные принципы термодинамики, рассмотрим основные соотношения, описывающие пьезоэффект. Для этого рассмотрим изменение энергии пьезоэлектрического кристалла при малых изменения параметров, определяющих его состояние.

1. Изменение энергии обусловлено изменением тепловых, электрических и механических параметров. Для единицы объема пьезоэлектрика можно записать:

$$dU = \mathfrak{A} d\sigma + T_{ij} dS_{ij} + E_k dD_k, \quad (1)$$

де  $\mathfrak{A}$  — температура;  $\sigma$  — энтропия;  $T_{ij}$  — тензор напряжения;  $S_{ij}$  — тензор деформации;  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля;  $\mathbf{D}$  — вектор электрической индукция,  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ ;  $\mathbf{P}$  — вектор поляризации. По повторяющимся индексам подразумевается суммирование. Таким образом, можно записать  $U = U(\sigma; S; \mathbf{D})$ . Независимыми параметрами являются  $\sigma$ ,  $S$  и  $\mathbf{D}$ , причем

$$\mathfrak{A} = (\partial U / \partial \sigma)_{S, D}; \quad T_{ij} = (\partial U / \partial S_{ij})_{\sigma, D}; \quad E_k = (\partial U / \partial D_k)_{\sigma, S}. \quad (2)$$

2. Перейдем от энергии  $U$  к термодинамическому потенциалу  $J$  —  $J = U - E_k D_k$ , тогда для дифференциала потенциала  $J$  можно записать

$$dJ = \mathfrak{A} d\sigma + T_{ij} dS_{ij} + E_k dD_k - E_k dD_k - D_k dE_k = \mathfrak{A} d\sigma + T_{ij} dS_{ij} - D_k dE_k. \quad (3)$$

Таким образом,  $J = J(\sigma; S; \mathbf{E})$ , и независимыми параметрами являются  $\sigma$ ,  $S$  и  $\mathbf{E}$ , причем

$$\mathfrak{A} = (\partial J / \partial \sigma)_{S, E}; \quad T_{ij} = (\partial J / \partial S_{ij})_{\sigma, E}; \quad D_k = -(\partial J / \partial E_k)_{\sigma, S}. \quad (4)$$

3. Перейдем к термодинамическому потенциалу  $F$ , называемому свободной энергией,

$$F = J - T_{ij} S_{ij} = U - E_k D_k - T_{ij} S_{ij},$$

тогда для дифференциала  $F$  получим

$$dF = \mathfrak{A} d\sigma - D_k dE_k - S_{ij} dT_{ij}. \quad (5)$$

Для свободной энергии  $F = F(\sigma; T; \mathbf{E})$ , и независимыми параметрами являются  $\sigma$ ,  $T$  и  $\mathbf{E}$ . Из (5) следует

$$\mathfrak{A} = (\partial F / \partial \sigma)_{T, E}; \quad S_{ij} = -(\partial F / \partial T_{ij})_{\sigma, E}; \quad D_k = -(\partial F / \partial E_k)_{\sigma, T}. \quad (6)$$

4. Введя термодинамический потенциал  $H$ , называемый энтальпией,  $H = U - T_{ij} S_{ij}$ . Нетрудно видеть, что дифференциал энтальпии равен

$$dH = \mathfrak{A} d\sigma - S_{ij} dT_{ij} + E_k dD_k. \quad (7)$$

Следовательно,  $H = H(\sigma; T; \mathbf{D})$ , независимыми параметрами являются  $\sigma$ ,  $T$  и  $\mathbf{D}$ . Из (7) следует

$$\mathfrak{A} = (\partial H / \partial \sigma)_{T, D}; \quad S_{ij} = -(\partial H / \partial T_{ij})_{\sigma, D}; \quad E_k = (\partial H / \partial D_k)_{\sigma, T}. \quad (8)$$

Соотношения (1) – (8) описывают состояние пьезоэлектрика для разных сочетаний независимых механических и электрических параметров, см. столбцы 2 и 3 табл. 5.1.

Дифференциалы термодинамических потенциалов  $U$ ,  $J$ ,  $F$  и  $H$  являются полными, поэтому их вторые смешанные производные не зависят от порядка дифференцирования. Например, из (2) следует

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial D_k} \left( \frac{\partial U}{\partial S_{ij}} \right) \right\}_{\sigma} = \left\{ \frac{\partial}{\partial S_{ij}} \left( \frac{\partial U}{\partial D_k} \right) \right\}_{\sigma} = \left( \frac{\partial T_{ij}}{\partial D_k} \right)_{\sigma, S} = \left( \frac{\partial E_k}{\partial S_{ij}} \right)_{\sigma, D} = -h_{kij}. \quad (9)$$

Вообще говоря,  $h_{kij}$  является функцией  $S_{ij}$  и  $D$ , то есть  $h_{kij} = h_{kij}(S_{ij}; D)$ . Однако в слабых механических и электрических полях, а именно такие используются в измерительной технике, можно считать  $h_{kij} = \text{const}$ . Эти коэффициенты, зависящие от тепловых параметров, например от температуры, называются *пьезомодулями*. Индексы пьезомодулей принимают значения  $k, i, j = 1, 2, 3$ . Из симметрии тензора деформации  $S_{ij} = S_{ji}$  следует симметрия  $h_{kij} = h_{kji}$ . Отсюда следует, что в общем случае число независимых пьезомодулей составляет  $3 \times 6 = 18$ . Однако в зависимости от степени симметрии кристалла на компоненты тензора пьезомодулей могут быть наложены дополнительные связи. Из-за этого число независимых пьезомодулей может быть существенно меньшим.

Таким образом, из (9) следует, что при постоянной электрической индукции  $D$  в результате деформации пьезоматериала возникает электрическое поле  $E$  — прямой пьезоэффект. Действительно, интегрируя при постоянных  $\sigma$  и  $D$  по  $S_{ij}$  последнее равенство в (9), получим

$$E_k = -h_{kij} S_{ij}. \quad (10)$$

Аналогично, при постоянной деформации — зажатом пьезоэлементе, электрическое поле внутри материала создает механическое напряжение  $T_{ij}$  — обратный пьезоэффект. Интегрируя при постоянных  $\sigma$  и  $S_{ij}$  предпоследнее равенство в (9) по  $D_k$ , находим

$$T_{ij} = -h_{kij} D_k. \quad (11)$$

Если в пьезокристалле существуют дополнительная деформация и электрические поля, то в соотношения (10) и (11) необходимо добавить соответствующие слагаемые, а именно, взаимосвязь электрической индукции с напряженностью электрического поля в (10) и взаимосвязь компонентов тензора деформации с компонентами тензора напряжения — обобщен-

ный закон Гука. Поэтому полные соотношения для описания пьезоэффекта в переменных  $S_{ij}$  и  $\mathbf{D}$  имеют вид

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijlm}^D S_{lm} - h_{kij} D_k; \\ E_k &= \beta_{kl}^S D_l - h_{kij} S_{ij}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $c_{ijlm}^D$  — компоненты тензора упругих характеристик пьезоматериала, определенные при постоянной электрической индукции  $\mathbf{D}$ ;  $\beta_{kl}^S$  — компоненты тензора обратного тензору диэлектрических постоянных пьезоматериала, определенные при постоянной деформации последнего. Следовательно,  $T_{ij} = T_{ij}(S_{lm}; \mathbf{D})$  и  $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{D}; S_{ij})$ .

Еще раз подчеркнем, что линейные соотношения (12) описывают пьезоэффект в слабых механических и электрических полях, в которых пьезомодули можно считать независимыми от механических и электрических полей.

Повторив аналогичные рассуждения для остальных термодинамических потенциалов, можно получить уравнения для описания пьезоэффекта и в других переменных. Они указаны в 6-ой графе табл. 5. 1.

В уравнения пьезоэффекта входят тензоры пьезомодулей, тензоры упругости и податливости, тензоры диэлектрической проницаемости и обратные к ним, определенные при различных условиях.

### Уравнения пьезоэффекта в разных переменных

№	Термодинамический потенциал	Независимые механические и электрические параметры	Зависимые механические и электрические параметры	Пьезомодули	Уравнения пьезоэффекта
1	2	3	4	5	6
1.	энергия $U = U(\sigma; S; \mathbf{D})$	$S_{ij}; \mathbf{D}$	$T_{ij} = (\partial U / \partial S_{ij})_{\sigma, \mathbf{D}};$ $E_k = (\partial U / \partial D_k)_{\sigma, S}$	$(\partial^2 U / \partial S_{ij} \partial D_k)_{\sigma} = (\partial T_{ij} / \partial D_k)_{\sigma, S} =$ $= (\partial E_k / \partial S_{ij})_{\sigma, \mathbf{D}} = -h_{kij}$	$T_{ij} = c_{ijkl}^D S_{lm} - h_{kij} D_k;$ $E_k = \beta_{kl}^S D_l - h_{kij} S_{ij}$
2.	$J = J(\sigma; S; \mathbf{E})$	$S_{ij}; \mathbf{E}$	$T_{ij} = (\partial J / \partial S_{ij})_{\sigma, \mathbf{E}};$ $D_k = -(\partial J / \partial E_k)_{\sigma, S}$	$(\partial^2 J / \partial S_{ij} \partial E_k)_{\sigma} = (\partial T_{ij} / \partial E_k)_{\sigma, S} =$ $= -(\partial D_k / \partial S_{ij})_{\sigma, \mathbf{E}} = -e_{kij}$	$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{lm} - e_{kij} E_k;$ $D_k = \varepsilon_{kl}^S E_l + e_{kij} S_{ij}$
3.	свободная энергия $F = F(\sigma; T; \mathbf{E})$	$T_{ij}; \mathbf{E}$	$S_{ij} = -(\partial F / \partial T_{ij})_{\sigma, \mathbf{E}};$ $D_k = -(\partial F / \partial E_k)_{\sigma, T}$	$-(\partial^2 F / \partial T_{ij} \partial E_k)_{\sigma} = (\partial S_{ij} / \partial E_k)_{\sigma, T} =$ $= (\partial D_k / \partial T_{ij})_{\sigma, \mathbf{E}} = d_{kij}$	$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{lm} + d_{kij} E_k;$ $D_k = \varepsilon_{kl}^T E_l + d_{kij} T_{ij}$
4.	энтальпия $H = H(\sigma; T; \mathbf{D})$	$T_{ij}; \mathbf{D}$	$S_{ij} = -(\partial H / \partial T_{ij})_{\sigma, \mathbf{D}};$ $E_k = (\partial H / \partial D_k)_{\sigma, T}$	$(\partial^2 H / \partial T_{ij} \partial D_k)_{\sigma} = -(\partial S_{ij} / \partial D_k)_{\sigma, T} =$ $= (\partial E_k / \partial T_{ij})_{\sigma, \mathbf{D}} = -g_{kij}$	$S_{ij} = s_{ijkl}^D T_{lm} + g_{kij} D_k;$ $E_k = \beta_{kl}^T D_l - g_{kij} T_{ij}$

Примечание:

$c_{ijkl}^E = (\partial T_{ij} / \partial S_{lm})_{\sigma, \mathbf{E}};$   $c_{ijkl}^D = (\partial T_{ij} / \partial S_{lm})_{\sigma, \mathbf{D}}$  — тензоры упругости, определенные соответственно при постоянной напряженности и индукции электрического поля;

$s_{ijkl}^E = (\partial S_{ij} / \partial T_{lm})_{\sigma, \mathbf{E}};$   $s_{ijkl}^D = (\partial S_{ij} / \partial T_{lm})_{\sigma, \mathbf{D}}$  — тензоры податливости, определенные соответственно при постоянной напряженности и индукции электрического поля;

$\varepsilon_{kl}^S = (\partial D_k / \partial E_l)_{\sigma, S};$   $\varepsilon_{kl}^T = (\partial D_k / \partial E_l)_{\sigma, T}$  — тензоры диэлектрической проницаемости, определенные соответственно при постоянной деформации и постоянном механическом напряжении;

$\beta_{kl}^S = (\partial E_k / \partial D_l)_{\sigma, S};$   $\beta_{kl}^T = (\partial E_k / \partial D_l)_{\sigma, T}$  — тензоры обратные тензорам диэлектрической проницаемости, определенные соответственно при постоянной деформации и постоянном механическом напряжении.

Очевидно, некоторые из них не являются независимыми, например, пары тензоров  $c_{ijlm}^E$  и  $s_{ijlm}^E$ , а также  $e_{kij}$  и  $d_{kij}$ . Действительно, рассмотрим первые уравнения из пар уравнений, приведенных во второй и третьей строках шестой графы табл. 5.1:

$$T_{ij} = c_{ijlm}^E S_{lm} - e_{kij} E_k \quad (13)$$

и

$$S_{ij} = s_{ijlm}^E T_{lm} + d_{kij} E_k. \quad (14)$$

Подставив (14) в соотношение (13), получим

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijnp}^E s_{nplm}^E T_{lm} + c_{ijlm}^E d_{klm} E_k - e_{kij} E_k = \\ &= c_{ijnp}^E s_{nplm}^E T_{lm} + (c_{ijlm}^E d_{klm} - e_{kij}) E_k. \end{aligned}$$

Поскольку компоненты тензора  $T_{ij}$  и вектора  $\mathbf{E}$  независимы, то равенство будет выполнено при условии:

$$c_{ijnp}^E s_{nplm}^E = \delta_{il} \delta_{jm};$$

$$e_{kij} = c_{ijlm}^E d_{klm}.$$

Из первого соотношения вытекает, что тензоры  $c_{ijlm}^E$  и  $s_{ijlm}^E$  являются обратным по отношению друг к другу. Второе выражение позволяет определить пьезомодуль  $e_{kij}$  через пьезомодуль  $d_{kij}$ . Кроме того,

$$d_{klm} = (c_{ijlm}^E)^{-1} e_{kij} = s_{ijlm}^E e_{kij}.$$

Очевидно, что аналогичным образом можно получить соотношения, связывающие компоненты других тензоров параметров в уравнениях пьезоэффекта.

Все уравнения пьезоэффекта удобно свести в таблицу.

$$\begin{pmatrix} T_{ij} \\ S_{ij} \\ E_k \\ D_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & c_{ijlm}^{E,D} & -e_{pij} & -h_{pij} \\ s_{ijlm}^{E,D} & \mathbf{0} & d_{pij} & g_{pij} \\ -g_{klm} & -h_{klm} & \mathbf{0} & \beta_{kp}^{S,T} \\ d_{klm} & e_{klm} & \varepsilon_{kp}^{S,T} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{lm} \\ S_{lm} \\ E_p \\ D_p \end{pmatrix}.$$

Например, если в качестве независимых переменных выбрать деформацию  $S$  и напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$ , то в вектор-столбце правой части соотношения полагаем  $T_{lm} = 0$  и  $D_p = 0$ , а в левой части считаем  $S_{ij} = 0$  и  $E_k = 0$ , тогда получим

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{lm} - e_{kij} E_k;$$

$$D_k = e_{kij} S_{ij} + \varepsilon_{kp}^S E_p.$$

Аналогично, если независимые переменные механические напряжения  $T$  и электрическая индукция  $D$ , находим

$$S_{ij} = s_{ijkl}^D T_{lm} + g_{pij} D_p;$$

$$E_k = -g_{klm} T_{lm} + \beta_{kp}^T D_p,$$

и т.п.

Довольно часто используется упрощенная матричная запись Фойта уравнений пьезоэффекта. В ее основе лежат следующие соображения. Тензоры  $T_{ij}$  и  $S_{ij}$  симметричны  $T_{ij} = T_{ji}$  и  $S_{ij} = S_{ji}$ , ( $i, j = 1, 2, 3$ ). Независимыми являются только 6 компонент этих тензоров, например,

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} S_1 & S_6 & S_5 \\ S_6 & S_2 & S_4 \\ S_5 & S_4 & S_3 \end{pmatrix},$$

то есть выполнена следующая замена индексов

$$(11) \rightarrow (1); (22) \rightarrow (2); (33) \rightarrow (3);$$

$$(23) = (32) \rightarrow (4); (13) = (31) \rightarrow (5);$$

$$(12) = (21) \rightarrow (6). \quad (15)$$

Аналогичная замена индексов проводится для тензора  $T_{ij}$ , тогда, в силу симметрии тензоров  $T_{ij}$  и  $S_{ij}$ , справедливы соотношения

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{lm} = c_{jilm} S_{lm} = c_{ijml} S_{ml} = c_{jiml} S_{ml}.$$

Следовательно, из 81 коэффициента  $c_{ijkl}$  не все являются независимыми. Используя правило замены индексов (15), обобщенный закон Гука можно записать в виде

$$T_\alpha = c_{\alpha\beta} S_\beta; \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6),$$

где  $c_{\alpha\beta}$  — матрица размером  $6 \times 6$ . Из этой формы записи тензора упругости следует, тензор упругости может содержать не более 36 независимых компонент, причем их число уменьшается с увеличением степени симметрии кристалла.

Используя обозначения Фойта, пьезомодули можно записать в виде

$$e_{pij} = e_{p\beta}; \quad h_{pij} = h_{p\beta}; \quad g_{pij} = g_{p\beta}; \quad d_{pij} = d_{p\beta}, \quad (p=1,2,3; \quad \beta=1,2,\dots,6).$$

Рассмотрим колебания пьезоэлемента в форме пластины. Если длина волны много больше характерных размеров пластины — длины или толщины, в зависимости от формы колебаний, то можно считать, что  $T_\alpha, S_\alpha \approx \text{const}$  во всем объеме пьезоэлемента. В этом случае уравнения пьезоэффекта часто записывают в форме:

$$E_k = -g_{k\beta} T_\beta; \quad E_k = -h_{k\beta} S_\beta; \quad S_\alpha = d_{k\alpha} E_k; \quad T_\alpha = e_{k\alpha} E_k.$$

В такой записи легко определить взаимосвязь между пьезомодулями. Например, последовательная подстановка дает

$$E_k = -g_{k\beta} T_\beta = -g_{k\beta} e_{l\beta} E_l,$$

отсюда находим связь между пьезомодулями  $e$  и  $g$ :

$$-g_{k\beta} e_{l\beta} = \delta_{kl}.$$

Аналогично,

$$E_k = -h_{k\beta} S_\beta = -h_{k\beta} d_{l\beta} E_l,$$

откуда следует

$$-h_{k\beta} d_{l\beta} = \delta_{kl}.$$

Последовательной подстановкой получаем

$$E_k = -g_{k\beta} T_\beta = -g_{k\beta} c_{\beta\alpha} S_\alpha = -g_{k\beta} c_{\beta\alpha} d_{l\alpha} E_l,$$

следовательно, связь между пьезомодулями  $d$ ,  $g$  и тензором упругости  $c$ :

$$-g_{k\beta} c_{\beta\alpha} d_{l\alpha} = \delta_{kl}.$$

Далее

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta} T_\beta = s_{\alpha\beta} e_{k\beta} E_k = d_{k\alpha} E_k,$$

таким образом,

$$s_{\alpha\beta} e_{k\beta} = d_{k\alpha}.$$

И наконец,

$$T_\alpha = c_{\alpha\beta} S_\beta = c_{\alpha\beta} d_{k\beta} E_k = e_{k\alpha} E_k,$$

поэтому

$$c_{\alpha\beta} d_{k\beta} = e_{k\alpha}.$$

Еще раз подчеркнем, что в зависимости от симметрии кристалла число отличных от нуля пьезомодулей может быть различно.

Покажем, что кристаллы с центром симметрии не могут обладать пьезоэффектом. Действительно, при преобразовании системы координат компоненты пьезомодулей изменяются по закону

$$e_{ijk} = \alpha_i^l \alpha_j^m \alpha_k^n e_{lmn},$$

где  $\alpha_i^l$  — матрица преобразования системы координат. Если имеется центр симметрии, то есть при преобразовании  $x \rightarrow -x$ ;  $y \rightarrow -y$ ;  $z \rightarrow -z$ , описываемыми соотношениями

$$\alpha_i^l = -\delta_{il},$$

пьезомодули остаются теми же. Поэтому

$$e_{ijk} = (-1)^3 \delta_{il} \delta_{jm} \delta_{kn} e_{lmn} = (-1)^3 e_{ijk} = -e_{ijk},$$

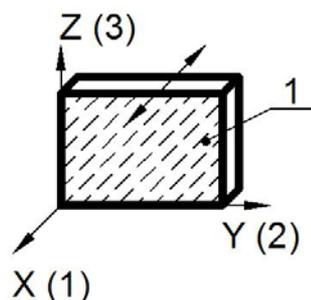
следовательно,

$$e_{ijk} = 0.$$

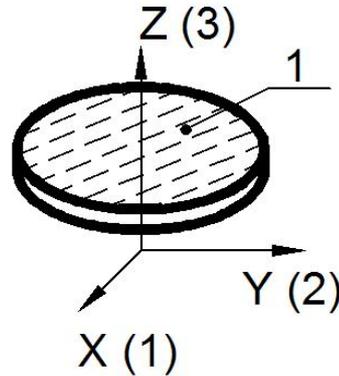
Как правило, в качестве пьезоэлементов используют пьезокристаллы, вырезанные определенным образом относительно кристаллографических осей.

Например, у кристаллического кварца в силу симметрии кристалла отличны от нуля пьезомодули  $d_{11}$  и  $d_{14}$ , а также другие пьезомодули с этими же индексами. Следовательно, пьезокварц может быть использован для возбуждения и регистрации продольных и сдвиговых колебаний.

Стержни из кварца вырезают вдоль оси  $X$ , а пластины — перпендикулярно к ней, причем электроды наносят на поверхности, перпендикулярные этой оси. Вырезанные подобным образом пьезоэлементы называют преобразователем  $X$ -среза. Кристаллы  $Y$ -среза служат для возбуждения и регистрации сдвиговых колебаний.



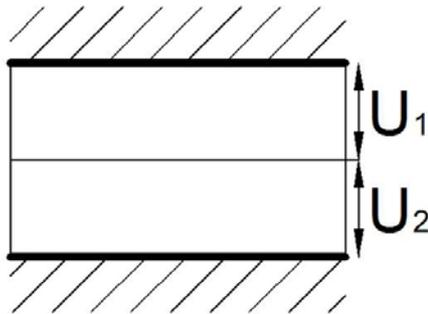
Пластины пьезокерамики из ЦТС изготавливают так, что ось поляризации направлена по оси  $Z$  и ориентирована перпендикулярно к граням, на которые нанесены электроды. Поэтому как и у  $X$ -кварца, у пластинах ЦТС при колебаниях по толщине ориентация механических напряжений и электрических полей совпадает. У пьезокерамики из ЦТС отличен от нуля пьезомодули с индексами «33», например  $d_{33}$  и т.п.



Рассмотрим две пластины пьезокварца плотно прижатые друг к другу с зафиксированными поверхностями. Если  $h$  — толщина пластин, то

$$U_1 = E_1 h; \quad T_1 = e_{11} E_1 = e_{11} U_1 / h;$$

$$E_2 = -g_{11} T_1 = -g_{11} e_{11} U_1 / h; \quad U_2 = E_2 h.$$



Отношение

$$U_2 / U_1 = -g_{11} e_{11} = -d_{11} h_{11} = K^2$$

называется коэффициентом электромеханической связи, который характеризует эффективность преобразования электрической энергии в механическую.

Можно показать, что

$$K^2 = U_2 / U_1 \approx W_M / W_{\mathcal{E}},$$

где  $W_M$ ,  $W_{\mathcal{E}}$  — механическая и электрическая энергия кварцевой пластины.

Для увеличения амплитуды возбуждаемых колебаний обычно используют резонансный режим работы пьезопреобразователей. Основная резонансная частота  $f_p$  колебаний пьезопластины толщиной  $h$  находится из условия, что на толщине пластины укладывается половина длины волны  $\lambda$

$$h = \lambda/2 = c/2f_p,$$

откуда параметр  $k_f = hf_p = c/2$ , где  $c$  — скорость звука, является константой материала.

В табл. 5.2 приведены основные характеристики двух пьезоматериалов, используемых в УЗ дефектоскопии.

**Основные пьезоконстанты**

Пьезоматериал	$d_{ik}$ , $10^{-12}$ м/В	$g_{ik}$ , В·м/Н	$e_{ik}$ , Н/В·м	$h_{ik}$ , $10^9$ В/м	$K$	$\epsilon_{отн}$	$k_f$	$T_K, ^\circ\text{C}$
Кварц	$d_{11} = 2,31$	$g_{11} = 0,057$	$e_{11} = 0,17$	$h_{11} = 4,8$	0,1	4,5	2870	576
ЦТС-19	$d_{33} = 300$	$g_{33} = 0,03$	$e_{33} = 17$	$h_{33} = 1,7$	0,5	1500	1900	290

Примечание:  $\epsilon_{отн}$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $T_K$  — температура Кюри.

В последнее время появились новые пленочные пьезоматериалы, например, фторлон-2. Эти материалы пока еще обладают более низкими техническими характеристиками по сравнению с кварцем и пьезокерамикой, в частности, у фторлона-2  $T_K \leq 80^\circ\text{C}$ , у них также не велики пьезомодули. Однако, поскольку толщина пленки мала, резонансные частоты созданных на их основе пьезодатчиков существенно выше традиционных пьезопреобразователей, а улучшение характеристик — это дело времени.