

УДК 531.781.2. 087; 620.017.08

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОПЕРЕЧНОЙ ПЬЕЗОЭДС В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ДАТЧИКОВ ВНУТРЕННИХ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

С.В. ЛЕСКОВЕЦ

(Полоцкий государственный университет)

*Предложены новые конструктивные решения полупроводниковых преобразователей для датчиков внутренних касательных напряжений. В разработанных конструкциях преобразователей касательных напряжений используется сдвиговой пьезорезистивный эффект. Впервые в работе решена задача селективного измерения одной или двух компонент касательных напряжений полупроводниковыми преобразователями, находящимися в условиях объемного напряженного состояния. Для исключения влияния на результат измерения нормальных компонент тензора механических напряжений предложено использовать стабилизатор электрического напряжения в цепи питания преобразователя.*

*В предложенных схемах преобразователей, у которых значение выходного сигнала обуславливается влиянием одной или двух компонент касательных напряжений, можно применять объёмные или пленочные преобразователи и использовать широко распространенные полупроводниковые материалы – кремний и германий.*

**Введение.** Физико-математическая модель основы пьезорезистивного эффекта в полупроводниках, принятая в разработках полупроводниковых датчиков механических величин, предложена Р. Терстоном и У. Пфанном в работах [1, 2].

В измерительной технике известны полупроводниковые тензопреобразователи типа «X-duser», состоящие из полупроводниковой пластины с двумя парами взаимно перпендикулярных контактов [3, 4]. Одна пара контактов подключена к источнику тока, а другая к измерительному прибору, измеряющему ЭДС. Если на пластину воздействовать механическими напряжениями, то по величине ЭДС судят о величине этих напряжений. Этот эффект называют эффектом поперечной пьезоЭДС

В работе [3] приведено выражение для пьезоЭДС в случае нахождения полупроводникового преобразователя в условиях одноосного напряженного состояния при воздействии нормального механического напряжения  $\sigma_1$ . Выражение для напряженности электрического поля  $E$ , возникающего в кристаллографическом направлении  $L(m, n, l)$  при плотности тока  $I$ , проходящего через объемный полупроводниковый кристалл с удельным сопротивлением  $\rho$  в направлении  $(\xi, \zeta, \eta)$  и нормальном механическом напряжении  $\sigma_1$  в направлении  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , имеет вид:

$$E_1 = I\rho(m\xi + n\zeta + l\eta) + I\rho\sigma_1\{[(m\xi\alpha^2 + n\zeta\beta^2 + l\eta\gamma^2)]\pi_{11} + [m\xi(\beta^2 + \gamma^2) + n\zeta(\alpha^2 + \gamma^2) + l\eta(\alpha^2 + \beta^2)]\pi_{12} + [m\alpha(\zeta\beta + \eta\gamma) + n\beta(\xi\alpha + \eta\gamma) + l\gamma(\xi\alpha + \zeta\beta)]\pi_{44}\}, \quad (1)$$

где  $(m, n, l)$ ,  $(\xi, \zeta, \eta)$  и  $(\alpha, \beta, \gamma)$  – направляющие косинусы соответственно электрического поля, тока и механического напряжения в кристаллографической системе координат: [100], [010], [001];  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$ ,  $\pi_{44}$  – продольный поперечный и сдвиговой пьезорезистивные коэффициенты. На основе этого эффекта разработаны некоторые виды преобразователей для датчиков давления.

Датчики внутренних механических напряжений существенно отличаются от датчиков давления. Их показания являются функцией векторной величины – напряжений в зоне контактного взаимодействия двух твёрдых тел. Показания зависят от материала датчика и среды, формы и размеров датчика и соотношения размеров среды и датчика.

Л.Н. Фомица в работах [5, 6] рассмотрел некоторые возможности использования этой теоретической основы для разработки преобразователей датчиков внутренних механических напряжений. В то же время, по нашему мнению, существуют дополнительные возможности в разработке преобразователей для датчиков напряжений с использованием эффекта поперечной пьезоЭДС, которые в этих работах не рассматриваются.

**Преобразователи напряжений.** Рассмотрим модель преобразователя (рисунок) из полупроводникового монокристаллического материала класса симметрии  $m\bar{3}m$ ,  $\bar{4}3m$ ,  $432$  в виде прямоугольной призмы с ориентацией в главных кристаллографических осях по направлениям 1, 2, 3 в соответствии с условными обозначениями, принятыми в [5, с. 38]. Если через такой полупроводниковый кристалл пропу-

стить, используя контакты на взаимно параллельных гранях, три тока ( $i_1, i_2, i_3$ ), то уравнения его электропроводности будут иметь вид:

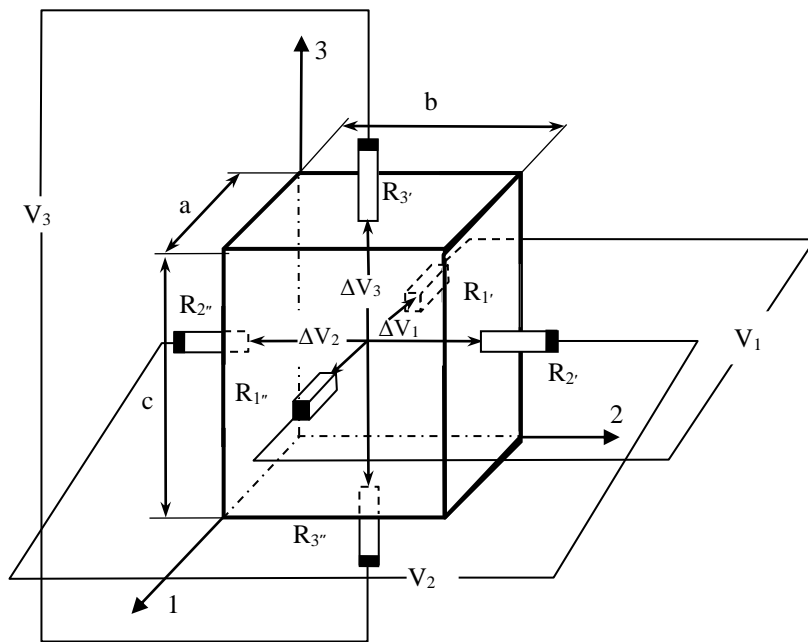
$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_1 [1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)] + \pi_{44}(i_2\sigma_{12} + i_3\sigma_{13}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_2 [1 + \pi_{11}\sigma_2 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_3)] + \pi_{44}(i_1\sigma_{12} + i_3\sigma_{23}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_3 [1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_1)] + \pi_{44}(i_1\sigma_{13} + i_2\sigma_{23}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ,  $(i_1, i_2, i_3)$ ,  $(E_1, E_2, E_3)$  – соответственно нормальные напряжения, величина плотности тока и распределенной ЭДС, действующие по направлениям 1, 2, 3;  $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$  – касательные напряжения.

Если через преобразователь пропускать только ток  $i_3$  в направлении 3, то система уравнений (2) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = \pi_{44}i_3\sigma_{13}; \\ \frac{E_2}{\rho_0} = \pi_{44}i_3\sigma_{23}; \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_3 [1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_1)]. \end{cases} \quad (3)$$

Проходящий через полупроводниковый кристалл ток от внешнего источника создает на внутреннем сопротивлении призмы по направлению 3 между электроконтактами падение напряжения  $\Delta V_3$ .



Конструктивная схема полупроводникового преобразователя механических напряжений и схема его электрических цепей

Если в первые два уравнения (3) произведем подстановку их значений из выражений:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\Delta V_1}{a}; \quad E_2 = \frac{\Delta V_2}{b}; \quad E_3 = \frac{\Delta V_3}{c}; \\ \rho_0 &= \frac{R_1cb}{a} = \frac{R_2ac}{b} = \frac{R_3ab}{c}; \quad i_3 = \frac{\Delta V_3}{R_3ab}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – размеры призмы в направлениях 1, 2, 3 соответственно;  $R_1, R_2, R_3$  – сопротивление преобразователя между электроконтактами в направлениях 1, 2, 3;  $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3$  – падение напряжения соответ-

ственно по размеру образца  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , то получим зависимости величин выходных напряжений  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  от величины питающего напряжения  $\Delta V_3$ , размеров образца преобразователя, коэффициента пьезоспротивления  $\pi_{44}$  и значений касательных напряжений  $\sigma_{13}$  и  $\sigma_{23}$ :

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta V_3 a}{c} \pi_{44} \sigma_{13}; \quad \Delta V_2 = \frac{\Delta V_3 b}{c} \pi_{44} \sigma_{23}. \quad (5)$$

Величины напряжений на выводах преобразователя (см. рисунок), без учета падения напряжения на соединительных проводах, будут равны:

$$V_1 = \Delta V_1 - \Delta V_{1(R'_1)} - \Delta V_{1(R''_1)};$$

$$V_2 = \Delta V_2 - \Delta V_{2(R'_2)} - \Delta V_{2(R''_2)};$$

$$V_3 = \Delta V_3 + \Delta V_{3(R'_3)} + \Delta V_{3(R''_3)}.$$

где  $\Delta V_{1(R'_1)}$ ,  $\Delta V_{1(R''_1)}$ ,  $\Delta V_{2(R'_2)}$ ,  $\Delta V_{2(R''_2)}$ ,  $\Delta V_{3(R'_3)}$ ,  $\Delta V_{3(R''_3)}$  – падение напряжения на соответствующих сопротивлениях  $R'_1, R''_1, R'_2, R''_2, R'_3, R''_3$  контактов преобразователя.

Падение напряжения  $\Delta V_3$  по размеру образца  $c$  в выражениях (5), согласно последней формуле из системы уравнений (3), зависит от величины нормальных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . Значение  $\Delta V_3$  – падение напряжения в цепи внешнего источника. Регулируя ток в цепи этого источника, можно падение напряжения считать величиной постоянной ( $\Delta V_3 = \text{const}$ ). В этом случае значение тока  $i_3$  не будет зависеть от  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . Эту функцию может выполнить стабилизатор напряжения. Его можно устроить в не нагруженной механическим напряжением части полупроводникового кристалла, поддерживая постоянное значение напряжения  $\Delta V_3$ , или применить внешний стабилизатор, стабилизируя величину  $V_3$ . В последнем случае механические напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  также не будут влиять на величину сигнала о значении касательных напряжений  $\sigma_{13}$  и  $\sigma_{23}$ , если значения сопротивлений контактов  $R'_3, R''_3$  будут оставаться постоянными. Современные технологии позволяют изготавливать «омические» контакты к полупроводниковым материалам с низкими и стабильными значениями сопротивлений.

Как известно, электропроводимость полупроводникового преобразователя при действии механических напряжений обусловлена в основном изменением его внутреннего сопротивления. Размеры преобразователя ввиду высокой жесткости полупроводникового материала меняются незначительно. Поэтому в расчетах напряжений значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  можно принять равными  $\text{const}$ .

В предлагаемой схеме величины выходных напряжений  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  определяются только значением касательных напряжений  $\sigma_{13}$  и  $\sigma_{23}$ . Токи в измерительной цепи вольтметра  $i_2$  и  $i_1 \ll i_3$ . Напряжения  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  можно последовательно измерять вольтметром с высоким входным сопротивлением. В этом случае сопротивление контактов и соединительных проводов будет незначительно влиять на величину выходных напряжений  $V_1$ ,  $V_2$ . Чувствительность преобразователя к касательным напряжениям определяется значением пьезорезистивного коэффициента  $\pi_{44}$ . Согласно [3] высокие значения  $\pi_{44}$  в главных кристаллографических направлениях характерны для p-Si, p-Ge и n-Ge.

Значения выходных напряжений  $V_1$ ,  $V_2$  рассчитываются по выражениям [5] при устройстве точечных электроконтактов к полупроводниковому материалу преобразователя, без учета размеров контактов и нагрузочных характеристик цепей. В реальных конструкциях преобразователей контакты имеют определенные размеры и конечные значения сопротивлений. Методика учета их параметров изложена в [7].

При высоких значениях входных сопротивлений измерительной цепи, что обычно имеет место, величины выходных сигналов  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  существенно не уменьшаются.

Конструкция преобразователя датчика касательных напряжений может иметь и другие кристаллографические ориентации. Если оси преобразователя 1 и 2 повернуть вокруг оси 3 на угол  $\varphi$  [5, с. 38], то матрица коэффициентов пьезосоппротивления будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & 0 & 0 & \pi_{16} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} & 0 & 0 & \pi_{26} \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{55} & 0 \\ \pi_{61} & \pi_{62} & 0 & 0 & 0 & \pi_{66} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \pi_{11} - \frac{1}{2} \pi_A \sin^2 2\varphi & \pi_{12} + \frac{1}{2} \pi_A \sin^2 2\varphi & \pi_{12} & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \pi_A \sin 4\varphi \\ \pi_{12} + \frac{1}{2} \pi_A \sin^2 2\varphi & \pi_{11} - \frac{1}{2} \pi_A \sin^2 2\varphi & \pi_{12} & 0 & 0 & \frac{1}{2} \pi_A \sin 4\varphi \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ -\frac{1}{4} \pi_A \sin 4\varphi & \frac{1}{4} \pi_A \sin 4\varphi & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Значения  $\pi'$  указывают на то, что они зависят от углов поворота.

При угле  $\varphi = 45^\circ$ , что соответствует направлениям 1 – [110], 2 – [ $\bar{1}$  10], 3 – [001],  $\pi'_{16} = \pi'_{26} = \pi'_{62} = \pi'_{61} = 0$ .

Система уравнений при таких поворотах будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{E'_1}{\rho_0} = i_1(1 + \pi'_{12}\sigma_1 + \pi'_{12}\sigma_2 + \pi_{12}\sigma_3) + i_2\pi_{44}\sigma_{12} + i_3\pi_{44}\sigma_{13}; \\ \frac{E'_2}{\rho_0} = i_1\pi_{44}\sigma_{12} + i_2(1 + \pi'_{12}\sigma_1 + \pi'_{22}\sigma_2 + \pi_{12}\sigma_3) + i_3\pi_{44}\sigma_{23}; \\ \frac{E'_3}{\rho_0} = i_1\pi_{44}\sigma_{13} + i_2\pi_{44}\sigma_{23} + i_3[1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_2)]. \end{cases} \quad (7)$$

При пропускании только тока  $i_3$  система уравнений (7) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{E'_1}{\rho_0} = i_3\pi_{44}\sigma_{13}; \\ \frac{E'_2}{\rho_0} = i_3\pi_{44}\sigma_{23}; \\ \frac{E'_3}{\rho_0} = i_3[1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_2)]. \end{cases} \quad (8)$$

Такой преобразователь, как и по уравнениям (3), можно выполнить из тех же материалов с использованием стабилизатора напряжения в цепи тока  $i_3$ ; он будет измерять две компоненты касательных напряжений и иметь аналогичную передаточную характеристику и характеристику чувствительности.

При пропускании только тока  $i_2$  система уравнений (7) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{E'_1}{\rho_0} = i_2\pi_{44}\sigma_{12}; \\ \frac{E'_2}{\rho_0} = i_2(1 + \pi'_{12}\sigma_1 + \pi'_{22}\sigma_2 + \pi_{12}\sigma_3); \\ \frac{E'_3}{\rho_0} = i_2\pi_{44}\sigma_{23}. \end{cases} \quad (9)$$

Аналогичная ситуация происходит и при пропускании тока  $i_1$ :

$$\begin{cases} \frac{E'_1}{\rho_0} = i_1(1 + \pi'_{11}\sigma_1 + \pi'_{12}\sigma_2 + \pi_{12}\sigma_3); \\ \frac{E'_2}{\rho_0} = i_1\pi_{44}\sigma_{12}\sigma_{23}; \\ \frac{E'_3}{\rho_0} = i_1\pi_{44}\sigma_{13}. \end{cases} \quad (10)$$

Используя данные значений пьезорезистивных коэффициентов для разных полупроводниковых материалов [8], наиболее целесообразным является применение в качестве материала для преобразователя  $p$ -типа кремния,  $n$ - и  $p$ -типа германия.

Высокие значения сдвиговых коэффициентов  $\pi_{44}$  для данных материалов определяют высокую чувствительность изготовленных из них преобразователей к сдвиговым напряжениям.

Если ось преобразователя 2' расположить в кристаллографическом направлении [110] и выполнить поворот вокруг этого направления на угол  $\theta$ , то матрица коэффициентов пьезосопротивления будет иметь вид [1]:

$$\begin{pmatrix} \pi_{11}' & \pi_{12}' & \pi_{13}' & 0 & \pi_{15}' & 0 \\ \pi_{12}' & \pi_{22}' & \pi_{23}' & 0 & \pi_{25}' & 0 \\ \pi_{31}' & \pi_{32}' & \pi_{33}' & 0 & \pi_{35}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44}' & 0 & \pi_{46}' \\ \pi_{51}' & \pi_{52}' & \pi_{53}' & 0 & \pi_{55}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{64}' & 0 & \pi_{66}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{11} - \left(\frac{1}{4}\cos^4\theta + \sin^2\theta\cos^2\theta\right)2\pi_A & \pi_{12} + \frac{1}{2}\pi_A\cos^2\theta & \pi_{12} + \frac{3}{2}\pi_A\sin^2\theta & 0 & \pi_A\left(\frac{3}{2}\cos^2\theta - 1\right)\sin 2\theta & 0 \\ \pi_{12} + \frac{1}{2}\pi_A\cos^2\theta & \pi_{11} - \frac{1}{2}\pi_A & \pi_{12} - \pi_A\sin^2\theta & 0 & \frac{1}{2}\pi_A\sin 2\theta & 0 \\ \pi_{12} + \frac{3}{8}\pi_A\sin^2\theta & \pi_{12} - \pi_A\sin^2\theta & \pi_{11} - \left(\frac{1}{4}\sin^4\theta + \sin^2\theta\cos^2\theta\right)2\pi_A & 0 & \pi_A\left(\frac{3}{2}\sin^2\theta - 1\right)\sin 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} - 2\pi_A\sin^2\theta & 0 & \frac{1}{2}\pi_A\sin 2\theta \\ \frac{1}{2}\pi_A\left(\frac{3}{2}\cos^2\theta - 1\right)\sin 2\theta & \frac{1}{4}\pi_A\sin 2\theta & \frac{1}{2}\pi_A\left(\frac{3}{2}\sin^2\theta - 1\right)\sin 2\theta & 0 & \pi_{44} + \frac{6}{8}\sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\pi_A\sin 2\theta & 0 & \pi_{44} + \pi_A\cos^2\theta \end{pmatrix}$$

Система уравнений при вращении на угол  $\Theta$  в плоскости [110]:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_1(1 + \pi_{11}'\sigma_1 + \pi_{12}'\sigma_2 + \pi_{13}'\sigma_3 + \pi_{15}'\sigma_{13}) + i_2(\pi_{64}'\sigma_{23} + \pi_{66}'\sigma_{12}) + i_3(\pi_{51}'\sigma_1 + \pi_{52}'\sigma_2 + \pi_{53}'\sigma_3 + \pi_{55}'\sigma_{13}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_1(\pi_{64}'\sigma_{23} + \pi_{66}'\sigma_{12}) + i_2(1 + \pi_{21}'\sigma_1 + \pi_{22}'\sigma_2 + \pi_{23}'\sigma_3 + \pi_{25}'\sigma_{13}) + i_3(\pi_{44}'\sigma_{23} + \pi_{46}'\sigma_{12}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_1(\pi_{51}'\sigma_1 + \pi_{52}'\sigma_2 + \pi_{53}'\sigma_3 + \pi_{55}'\sigma_{13}) + i_2(\pi_{44}'\sigma_{23} + \pi_{46}'\sigma_{12}) + i_3(1 + \pi_{31}'\sigma_1 + \pi_{32}'\sigma_2 + \pi_{33}'\sigma_3 + \pi_{35}'\sigma_{13}). \end{cases} \quad (12)$$

В системе уравнений (12) представляет интерес для конструирования преобразователя касательных напряжений только случай с пропуском тока  $i_2$ .

Система уравнений (12) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_2(\pi_{64}'\sigma_{23} + \pi_{66}'\sigma_{12}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_2(1 + \pi_{21}'\sigma_1 + \pi_{22}'\sigma_2 + \pi_{23}'\sigma_3 + \pi_{25}'\sigma_{13}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_2(\pi_{44}'\sigma_{23} + \pi_{46}'\sigma_{12}). \end{cases} \quad (13)$$

Значения пьезорезистивных коэффициентов  $\pi_{64}'$ ,  $\pi_{66}'$ ,  $\pi_{44}'$ ,  $\pi_{46}'$  зависят от угла поворота  $\Theta$  в плоскости [110] и определяются значениями [2]:

$$\pi_{64}' = \pi_{46}' = \pi_A \frac{1}{2} \sin 2\Theta; \pi_{66}' = \pi_{44}' + \pi_A \cos^2 \Theta; \pi_{44}' = \pi_{44} - 2\pi_A \sin^2 \Theta,$$

где  $\pi_A = \pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}$ .

Анализ этих коэффициентов показывает, что первое и третье уравнения системы (13) имеют решения для двух измеряемых компонент тензора напряжений  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_{23}$  при условии, что значение  $\pi_{66}' \neq \pi_{44}'$ . Это условие выполняется для любых значений угла поворота  $\Theta$ , кроме  $\Theta = 0$ .

Как известно из [1], значения коэффициентов  $\pi_{64}'$ ,  $\pi_{46}'$  изменяются в пределах от  $-0,5[\pi_A]$  до  $0,5[\pi_A]$  и равны 0 при  $\Theta = 0$  и система уравнений становится аналогичной (9);  $\pi_{44}'$  и  $\pi_{66}'$  изменяются от  $\pi_{44}$  до  $\pi_{11} - \pi_{12}$ .

Применив подстановки (4) и (5) в систему уравнений (12) и учитывая то, что в данном случае продольным направлением в преобразователе будет являться направление 2, из первого и третьего выражения системы уравнений (13) получим:

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= \frac{\Delta V_2 a}{b} (\pi'_{44} \sigma_{23} + \pi'_{46} \sigma_{12}); \\ \Delta V_3 &= \frac{\Delta V_2 c}{b} (\pi'_{64} \sigma_{23} + \pi'_{66} \sigma_{12}). \end{aligned} \tag{14}$$

В этой конструкции преобразователя можно использовать *p*- и *n*-типа кремний, *n*- и *p*-типа германий и другие полупроводниковые материалы с высокими значениями  $\pi_{44}$  и  $\pi_A$ .

Если направление 3' совместить с направлением [111] и повернуть вокруг него на угол  $\beta$ , то в соответствии с [1] получим матрицу коэффициентов пьезосопротивления (15) и систему уравнений (16):

$$\begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & \pi_{14} & 0 & 0 \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} & 0 & \pi_{25} & 0 \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{41} & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & \pi_{46} \\ 0 & \pi_{52} & 0 & 0 & \pi_{55} & \pi_{56} \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{64} & \pi_{65} & \pi_{66} \end{pmatrix} = \tag{15}$$

$$= \begin{pmatrix} \pi_{11} - \frac{1}{2} \pi_A & \pi_{12} + \frac{1}{6} \pi_A & \pi_{12} + \frac{1}{3} \pi_A & \frac{2}{3} \frac{\pi_A}{\sqrt{2}} \sin 3\beta & 0 & 0 \\ \pi_{12} + \frac{1}{6} \pi_A & \pi_{11} - \frac{1}{2} \pi_A & \pi_{12} + \frac{1}{3} \pi_A & 0 & \frac{2}{3} \frac{\pi_A}{\sqrt{2}} \cos 3\beta & 0 \\ \pi_A + \frac{1}{3} \pi_A & \pi_{12} + \frac{1}{3} \pi_A & \pi_{11} - \frac{2}{3} \pi_A & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\pi_A}{3\sqrt{2}} \sin 3\beta & 0 & 0 & \pi_{44} + \frac{1}{3} \pi_A & 0 & \frac{2}{3} \frac{\pi_A}{\sqrt{2}} \cos 3\beta \\ 0 & \frac{\pi_A}{3\sqrt{2}} \cos 3\beta & 0 & 0 & \pi_{44} + \frac{1}{3} \pi_A & \frac{2}{3} \frac{\pi_A}{\sqrt{2}} \sin 3\beta \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3} \frac{\pi_A}{\sqrt{2}} \cos 3\beta & \frac{2}{3} \frac{\pi_A}{\sqrt{2}} \sin 3\beta & \pi_{44} + \frac{1}{6} \pi_A \end{pmatrix};$$

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_1 (1 + \pi_{11} \sigma_1 + \pi_{12} \sigma_2 + \pi_{13} \sigma_3 + \pi_{14} \sigma_{23}) + i_2 (\pi_{64} \sigma_{23} + \pi_{65} \sigma_{13} + \pi_{66} \sigma_{12}) + i_3 (\pi_{52} \sigma_2 + \pi_{55} \sigma_{13} + \pi_{56} \sigma_{12}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_1 (\pi_{64} \sigma_{23} + \pi_{65} \sigma_{13} + \pi_{66} \sigma_{12}) + i_2 (1 + \pi_{21} \sigma_1 + \pi_{22} \sigma_2 + \pi_{23} \sigma_3 + \pi_{25} \sigma_{13}) + i_3 (\pi_{41} \sigma_1 + \pi_{44} \sigma_{23} + \pi_{46} \sigma_{12}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_1 (\pi_{52} \sigma_2 + \pi_{55} \sigma_{13} + \pi_{56} \sigma_{12}) + i_2 (\pi_{41} \sigma_1 + \pi_{44} \sigma_{23} + \pi_{46} \sigma_{12}) + i_3 (1 + \pi_{31} \sigma_1 + \pi_{32} \sigma_2 + \pi_{33} \sigma_3). \end{cases} \tag{16}$$

В этой системе уравнений представляют интерес кристаллографические ориентации, у которых значение отдельных пьезорезистивных коэффициентов зависят от угла поворота  $\beta$  и могут принимать нулевые значения. Так, если пропускать через полупроводниковый кристалл ток от источника в направлении 2, то система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_2 (\pi_{64} \sigma_{23} + \pi_{65} \sigma_{13} + \pi_{66} \sigma_{12}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_2 (1 + \pi_{21} \sigma_1 + \pi_{22} \sigma_2 + \pi_{23} \sigma_3 + \pi_{25} \sigma_{13}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_2 (\pi_{41} \sigma_1 + \pi_{44} \sigma_{23} + \pi_{46} \sigma_{12}). \end{cases} \tag{17}$$

Значения пьезорезистивных коэффициентов  $2\pi'_{41} = \pi'_{65} = \frac{2\pi_A}{3\sqrt{2}} \sin 3\beta = 0$  при  $\beta = 0$  и система (17) преобразуется:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_2(\pi'_{64}\sigma_{23} + \pi'_{66}\sigma_{12}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_2(1 + \pi'_{21}\sigma_1 + \pi'_{22}\sigma_2 + \pi'_{23}\sigma_3 + \pi'_{25}\sigma_5); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_2(\pi'_{44}\sigma_{23} + \pi'_{46}\sigma_{12}). \end{cases} \quad (18)$$

Значения пьезорезистивных коэффициентов  $\pi'_{64} = \pi'_{46} = \frac{2\pi_A}{3\sqrt{2}} \cos 3\beta$  зависят от угла поворота  $\beta$ , а  $\pi'_{44} = \pi_{44} + \frac{1}{3}\pi_A$  и  $\pi'_{66} = \pi_{66} + \frac{1}{6}\pi_A$  имеют постоянные значения и их величины определяются типом используемого полупроводникового материала. При  $\beta = 0^\circ$   $\pi'_{64} = \pi'_{46} = \frac{2\pi_A}{3\sqrt{2}}$ .

Можно также пропускать ток в направлении 1. Система уравнений (16) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_1(1 + \pi'_{11}\sigma_1 + \pi'_{12}\sigma_2 + \pi'_{13}\sigma_3 + \pi'_{14}\sigma_{23}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_1(\pi'_{64}\sigma_{23} + \pi'_{65}\sigma_{13} + \pi'_{66}\sigma_{12}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_1(\pi'_{52}\sigma_2 + \pi'_{55}\sigma_{13} + \pi'_{56}\sigma_{12}). \end{cases} \quad (19)$$

Значение пьезорезистивных коэффициентов  $\pi'_{64} = \pi'_{52} = \frac{2\pi_A}{3\sqrt{2}} \cos 3\beta$ . Для  $\beta = 30^\circ$   $\pi'_{64} = \pi'_{52} = 0$ , и системе уравнений (19) запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{\rho_0} = i_1(1 + \pi'_{11}\sigma_1 + \pi'_{12}\sigma_2 + \pi'_{13}\sigma_3 + \pi'_{14}\sigma_{23}); \\ \frac{E_2}{\rho_0} = i_1(\pi'_{65}\sigma_{13} + \pi'_{66}\sigma_{12}); \\ \frac{E_3}{\rho_0} = i_1(\pi'_{55}\sigma_{13} + \pi'_{56}\sigma_{12}). \end{cases} \quad (20)$$

Значения пьезорезистивных коэффициентов  $\pi'_{65} = \pi'_{56} = \frac{2\pi_A}{3\sqrt{2}} \sin 3\beta$  зависят от угла поворота, а  $\pi'_{55} = \pi_{55} + \frac{1}{3}\pi_A$  и  $\pi'_{66} = \pi_{66} + \frac{1}{6}\pi_A$  имеют постоянные значения. При  $\beta = 30^\circ$   $\pi'_{65} = \pi'_{56} = \frac{2\pi_A}{3\sqrt{2}}$ , а система уравнений (20) становится подобной (18).

Значения выходного сигнала преобразователя по зависимостям (18) и (20) будут зависеть от двух величин касательных напряжений.

Рассмотренные выше кристаллографические ориентации преобразователя для датчика касательных напряжений предполагают размещение такого преобразователя в среде в условиях объемного напряженного состояния и передачи на него всех компонент тензора механических напряжений за счет контакта со средой.

Возможности передачи напряжений измерителю зависят от свойств контакта, основным из которых является наличие сцепления со средой. Это состояние должно сохраняться во время деформирования.

Возможны также конструктивные формы датчика, у которых применяются элементы, защищающие преобразователь или его зоны контактов от влияния на выходной сигнал отдельных мешающих компонент тензора напряжений.

**Выводы**

1. При воздействии всех компонент тензора механических напряжений на полупроводниковый преобразователь с отдельными цепями питания и измерения стабилизация величины электрического напряжения на электродах питающей цепи позволяет исключить влияние нормальных механических напряжений на величину выходного сигнала на измерительных электродах преобразователя. В этом случае величина выходных напряжений на измерительных электродах зависит только от значений касательных механических напряжений.

2. Анализ кристаллографических ориентаций выявил возможности создания схем преобразователей, у которых значение выходного сигнала обуславливается влиянием одной или двух компонент касательных напряжений.

3. В предложенных схемах можно применять объёмные или плёночные преобразователи и использовать широко распространённые полупроводниковые материалы – кремний и германий.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Терстон, Р.Н. Применение полупроводниковых преобразователей для измерения деформаций, ускорений, смещений / Р.Н. Терстон // Физическая акустика: сб. ст. / под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1, Ч. Б. – С. 187 – 209.
2. Pfann, W.G., Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effects / W.G. Pfann, R.N. Therston // Journal of Applied Physics. – 1961. – Vol. 32, № 10. – P. 2008 – 2019.
3. Козеев, Е.В. Тензоэлемент с отдельными цепями питания и измерения / Е.В. Козеев, А.Ф. Кравченко // Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1980. – С. 147 – 150.
4. Козеев, Е.В. Поперечная пьезоЭДС в кубических кристаллах / Е.В. Козеев, Е.А. Макаров // Физика и техника полупроводников: сб. науч. докл. – Новосибирск: НЭТИ, 1968. – С. 3 – 8.
5. Фомица, Л.Н. Полупроводниковые преобразователи для измерения механических напряжений / Л.Н. Фомица. – Минск: Выш. шк., 1983. – 123 с.
6. Фомица, Л.Н. Измерение напряжений в железобетонных конструкциях / Л.Н. Фомица, Р.А. Сумбатов. – Киев: Будівельник, 1994. – 165 с.
7. Гридчин, В.А. Проектирование тензопреобразователей на эффекте поперечной пьезоЭДС с учетом размеров потенциальных контактов / В.А. Гридчин // Физические основы полупроводниковой тензометрии: сб. / под ред. В.С. Шадрина. – Новосибирск: НЭТИ, 1984. – С. 109 – 119.
8. Лесковец, С.В. Использование продольного и поперечного пьезорезистивных эффектов для конструирования преобразователей нормальных механических напряжений / С.В. Лесковец // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2003. – Т. II, № 2. – С. 48 – 54.

Поступила 26.10.2006