Нелинейность пьезорезистивного эффекта в пленках поликристаллического кремния

© В.А. Гридчин, В.М. Любимский¶

Новосибирский государственный технический университет,
630092 Новосибирск, Россия

(Получена 3 марта 2003 г. Принята к печати 13 мая 2003 г.)

Проведено феноменологическое описание пьезорезистивных свойств пленок поликристаллического кремния с помощью тензоров эластосопротивления и пьезосопротивления в квадратичном приближении, учитывающее симметрию пленки. Получены формулы для вычисления коэффициентов пьезосопротивления 2-го порядка поликремниевых пленок для некоторых текстур и изотропии через коэффициенты пьезосопротивления 2-го порядка монокристаллического кремния. Наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных и рассчитанных коэффициентов пьезосопротивления в области сильного легирования.

1. Введение

Пьезорезистивные свойства пленок поликристаллического кремния описаны в ряде работ [1–13], в которых определены или коэффициенты тензочувствительности, или коэффициенты пьезосопротивления в линейном приближении по деформации или механическому напряжению. Имеется несколько моделей, удовлетворительно объясняющих пьезорезистивные свойства пленок поликристаллического кремния. Модели основаны на следующих предположениях: а) кристаллиты в пленке имеют произвольную ориентацию и пленка изотропная или пленка имеет текстуру; б) деформации или механические напряжения полностью передаются в пленку; в) электрофизические свойства пленок при сильном легировании, когда вкладом барьеров можно пренебречь, определяются кристаллитами. Коэффициенты упругости, тензочувствительности и пьезоэластосопротивления при сильном легировании вычисляются в результате применения процедуры усреднения [2–13].

Нелинейность пьезорезистивных свойств поликремниевых пленок p-типа обсуждалась в [14]. В этой работе приведены экспериментальные результаты определения продольного и поперечного коэффициентов тензочувствительности в квадратичном приближении и величины этих коэффициентов, полученные в результате применения процедуры усреднения для текстуры $\langle 110\rangle$.

Цель данной работы — феноменологическое описание пьезорезистивных свойств пленок поликристаллического кремния с помощью тензоров эластосопротивления и пьезосопротивления в квадратичном приближении.

2. Теория

Предлагаемая модель пьезорезистивных свойств поликремниевых пленок основана на следующих предположениях: а) поликремниевые пленки или изотропны, или имеют текстуру с осью, которая перпендикулярна плоскости пленки; б) пленка много тоньше подложки и деформации в плоскости подложки полностью передаются в пленку; в) размеры кристаллитов вдоль оси, перпендикулярной плоскости пленки, равны толщине пленки (столбчатое приближение); г) изменение сопротивления пленки при ее деформации (действии механического напряжения) обусловлено только изменением сопротивлений кристаллитов. Границы раздела зерен вносят вклад только в величину сопротивления пленки и тем самым влияют на величины коэффициентов тензочувствительности или пьезосопротивления; д) для вычисления средних значений компонент тензора эластосопротивления и компонент тензора упругости изотропных поликремниевых пленок используется процедура, предложенная в [15]. В случае текстур средние значения вычисляются в результате интегрирования по углу в плоскости пленки [6].

Относительное изменение сопротивления $\left(\frac{\Delta\rho_{ij}}{\langle\rho\rangle}\right)$ при действии деформации (ε_{kl}) или механического напряжения (T_{mn}) в квадратичном приближении выражается через коэффициенты пьезосопротивления (π_{ijmn}, π_{ijmnst}) или коэффициенты эластосопротивления (m_{ijkl}, m_{ijklpr}), которые являются тензорами четвертого ранга и шестого рангов:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\langle\rho\rangle} = m_{ijkl}\cdot\varepsilon_{kl} + m_{ijklpr}\cdot\varepsilon_{kl}\cdot\varepsilon_{pr}$$
$$= \pi_{ijmn}\cdot T_{mn} + \pi_{ijmnst}\cdot T_{mn}\cdot T_{st}.$$

Тензоры $\pi_{ijmnst}(m_{ijklpr})$ симметричны по перестановке второй и третьей пар индексов и перестановке внутри пар:

$$\pi_{ijmnst} = \pi_{jimnst} = \pi_{ijnmst} = \pi_{ijmnts} = \pi_{ijstmn}.$$

Тензоры m_{ijkl}, m_{ijklpr} и π_{ijmn}, π_{ijmnst} при пренебрежении нелинейностью упругих свойств по сравнению с нелинейностью пьезорезистивного эффекта связаны между собой через тензор коэффициентов упругости (C_{mnkl}) или тензор коэффициентов упругой податливости (S_{klmn}):

$$\pi_{ijmn} = m_{ijkl}\cdot S_{klmn}, \quad \pi_{ijmnst} = m_{ijklpr}\cdot S_{klmn}\cdot S_{prst},$$
$$m_{ijkl} = \pi_{ijmn}\cdot C_{mnkl}, \quad m_{ijklpr} = \pi_{ijmst}\cdot C_{mnkl}\cdot C_{prst}.$$

Тензоры π_{ijmn}, π_{ijmnst}, m_{ijkl}, m_{ijklpr}, C_{mnkl}, S_{klmn} могут быть записаны в виде матриц π_{in}, m_{ik}, m_{ikp}, C_{nk}, S_{kn}.

¶ E-mail: lubvlm@ngs.ru

Коэффициенты $m_{\lambda\mu\nu}$ и $\pi_{\lambda\mu\nu}$ связаны с компонентами тензоров следующими правилами пересчета: $m_{\lambda\mu\nu} = m_{ijklpr}$ ($ij \leftrightarrow \lambda = 1, \dots, 6$; $kl \leftrightarrow \mu = 1, \dots, 6$; $pr \leftrightarrow \nu = 1, \dots, 6$).

$$\pi_{\lambda\mu\nu} = \left\{ \begin{aligned} &\pi_{ijmnst}(ij \leftrightarrow \lambda = 1, \dots, 6; mn \leftrightarrow \mu = 1, 2, 3; \\ &\qquad\qquad st \leftrightarrow \nu = 1, 2, 3) \\ &2\pi_{ijmnst}(ij \leftrightarrow \lambda = 1, \dots, 6; mn \leftrightarrow \mu = 1, 2, 3; \\ &\qquad\qquad st \leftrightarrow \nu = 4, 5, 6) \\ &2\pi_{ijmnst}(ij \leftrightarrow \lambda = 1, \dots, 6; mn \leftrightarrow \mu = 4, 5, 6; \\ &\qquad\qquad st \leftrightarrow \nu = 1, 2, 3) \\ &4\pi_{ijmnst}(ij \leftrightarrow \lambda = 1, \dots, 6; mn \leftrightarrow \mu = 4, 5, 6; \\ &\qquad\qquad st \leftrightarrow \nu = 4, 5, 6) \end{aligned} \right\}.$$

Пленки поликристаллического кремния, выращенные на окисленных кремниевых подложках, в зависимости от условий роста, имеют или произвольную ориентацию кристаллитов в пленке (изотропные пленки) или, при произвольной ориентации в плоскости пленки, имеют определенную ориентацию в направлении, перпендикулярном плоскости пленки (текстуры). В [10] приведены определенные оси текстур. Это — [100], [110], [111], [113], [331].

Текстуры относятся к одной из пяти предельных групп симметрии [16]. Анализ элементов симметрии текстурированных пленок поликристаллического кремния с осями [100], [110], [111], [113], [331] показывает, что эти пленки относятся к предельной группе симметрии ∞/mm.

Изотропные пленки поликристаллического кремния относятся к предельной группе симметрии $\infty\infty m$.

Для класса симметрии ∞/mm матрицы $C_{nk}(S_{kn})$, $\pi_{in}(m_{ik})$ имеют соответственно пять (C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}), семь (π_{11}, π_{12}, π_{13}, π_{31}, π_{32}, π_{33}, π_{44}) независимых компонент [16].

Для класса ∞mm число независимых компонент $C_{nk}(S_{kn})$ и $\pi_{in}(m_{ik})$ равно трем ($C_{13} = C_{23} = C_{12}$, $C_{33} = C_{11}$; $S_{13} = S_{23} = S_{12}$, $S_{33} = S_{11}$; $m_{13} = m_{23} = m_{31} = m_{32} = m_{12}$, $m_{33} = m_{11}$; $\pi_{13} = \pi_{23} = \pi_{31} = \pi_{32} = \pi_{12}$, $\pi_{33} = \pi_{11}$) и $\pi_{ins}(m_{ikp})$ равно четырем (π_{111}, π_{112}, π_{122}, π_{123}) [16].

Экспериментально целесообразно определять коэффициенты пьезосопротивления, в то же время процедуру усреднения удобнее проводить через деформации и коэффициенты эластосопротивления.

Удельное сопротивление поликремниевой пленки в случае, когда размер границы раздела кристаллитов много меньше ширины заряженного слоя, может быть записано как [17,18]

$$\rho_i = \rho_{bi} \frac{2w}{L} + \rho_{ci} \left(1 - \frac{2w}{L}\right),$$

где ρ_{bi} — удельное сопротивление барьера, ρ_{ci} — удельное сопротивление кристаллита, $2w$ — ширина заряженной области, L — размер кристаллита.

Полагая, что барьеры не вносят вклад в эффект пьезосопротивления, получим

$$\left\langle \frac{\Delta\rho_i}{\langle\rho\rangle} \right\rangle = \left(1 - \frac{2w}{L}\right) \frac{\langle\Delta\rho_{ci}\rangle}{\langle\rho\rangle} = \left(1 - \frac{2w}{L}\right) \frac{\langle\rho_c\rangle}{\langle\rho\rangle} \frac{\langle\Delta\rho_{ci}\rangle}{\langle\rho_c\rangle}.$$

Считая, что эффект пьезосопротивления в поликремниевой пленке связан только с изменением сопротивлений кристаллитов, средние значения относительных изменений удельных сопротивлений в плоскости пленки могут быть записаны как

$$\begin{aligned} \frac{\langle\Delta\rho_{ci}\rangle}{\langle\rho_c\rangle} = {} & \frac{\varepsilon_1}{\omega} \int m'_{i1} d\Omega + \frac{\varepsilon_2}{\omega} \int m'_{i2} d\Omega + \frac{1}{\omega} \int m'_{i3}\varepsilon'_3 d\Omega \\ & + \frac{\varepsilon_1^2}{\omega} \int m'_{i11} d\Omega + \frac{\varepsilon_2^2}{\omega} \int m'_{i22} d\Omega + \frac{1}{\omega} \int m'_{i33}\varepsilon'^2_3 d\Omega \\ & + \frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2}{\omega} \int m'_{i12} d\Omega + \frac{2\varepsilon_1}{\omega} \int m'_{i13}\varepsilon'_3 d\Omega \\ & + \frac{2\varepsilon_2}{\omega} \int m'_{i23}\varepsilon'_3 d\Omega + \frac{\varepsilon_6^2}{\omega} \int m'_{i66} d\Omega, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\langle\Delta\rho_{c6}\rangle}{\langle\rho_c\rangle} = {} & \frac{\varepsilon_6}{\omega} \int m'_{66} d\Omega + \frac{2\varepsilon_1\varepsilon_6}{\omega} \int m'_{616} d\Omega \\ & + \frac{2\varepsilon_2\varepsilon_6}{\omega} \int m'_{626} d\Omega + \frac{\varepsilon_6}{\omega} \int m'_{636}\varepsilon'_3 d\Omega, \end{aligned}$$

где m'_{ik}, m'_{ikp} — коэффициенты эластосопротивления монокристаллического кремния, записанные в осях подложки.

В случае текстур $\omega = 2\pi$, Ω — угол в плоскости пленки. В изотропном случае $\omega = 8\pi^2$, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi d\phi$, где θ, φ, ϕ — углы Эйлера.

Механические напряжения в кристаллите T'_n, с учетом того что деформации в плоскости подложки ε_1, ε_2 и ε_6 полностью передаются в пленку, в осях подложки могут быть записаны как

$$T'_1 = C'_{11} \cdot \varepsilon_1 + C'_{12} \cdot \varepsilon_2 + C'_{13} \cdot \varepsilon'_3$$

$$T'_2 = C'_{21} \cdot \varepsilon_1 + C'_{22} \cdot \varepsilon_2 + C'_{23} \cdot \varepsilon'_3,$$

$$T_3 = T'_3 = C'_{31} \cdot \varepsilon_1 + C'_{32} \cdot \varepsilon_2 + C'_{33} \cdot \varepsilon'_3 \quad T'_6 = C'_{66} \cdot \varepsilon_6,$$

где ε'_3 — деформации кристаллитов, записанные в осях подложки, C'_{nk} — упругие постоянные кристаллитов, записанные в осях подложки.

Тогда $\varepsilon'_3 = \dfrac{T_3 - C'_{31} \cdot \varepsilon_1 - C'_{32} \cdot \varepsilon_2}{C'_{33}}$ и $\langle\varepsilon_3\rangle = \dfrac{1}{\omega} \displaystyle\int \varepsilon'_3 d\Omega$.

В направлении, перпендикулярном плоскости подложки, механические напряжения T_3 во всех кристаллитах одинаковы. В случае плосконапряженного состояния $T_3 = 0$.

Коэффициенты пьезосопротивления поликремниевых пленок

	Текстура					
	$\langle 100\rangle$	$\langle 110\rangle$	$\langle 111\rangle$	$\langle 113\rangle$	$\langle 331\rangle$	Изотропия
1	2	3	4	5	6	7
$\langle\pi^p_{111}\rangle$	$.6250\pi_{111}+.2500\pi_{112}$ $+.1250\pi_{122}$ $+.7830\pi_{661}+.3065\pi_{166}$	$.09375\pi_{123}+.3906\pi_{111}$ $+.1719\pi_{122}+.3438\pi_{112}$ $+.2936\pi_{441}$ $+1.077\pi_{661}+.1150\pi_{144}$ $+.4215\pi_{166}+.4598\pi_{456}$	$.0556\pi_{123}+.2222\pi_{122}$ $+.4444\pi_{112}+.2778\pi_{111}$ $+.5450\pi_{166}$ $+1.392\pi_{661}+.1740\pi_{441}$ $+.0681\pi_{144}+.2725\pi_{456}$	$.04620\pi_{123}+.3216\pi_{112}$ $+.1608\pi_{122}+.4715\pi_{111}$ $+.2266\pi_{456}+.0567\pi_{144}$ $+.3943\pi_{166}$ $+.1447\pi_{441}+1.007\pi_{661}$	$.3568\pi_{111}+.3750\pi_{112}$ $+.1875\pi_{122}+.0807\pi_{123}$ $+.2527\pi_{441}$ $+1.174\pi_{661}+.3958\pi_{456}$ $+.4598\pi_{166}+.0989\pi_{144}$	$.1714\pi_{122}+.3429\pi_{112}$ $+.4286\pi_{111}+.0571\pi_{123}$ $+.1790\pi_{441}$ $+1.074\pi_{661}+.0701\pi_{144}$ $+.2803\pi_{456}+.4204\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{112}\rangle$	$.1250\pi_{111}+.7500\pi_{112}$ $+.1250\pi_{122}-.3065\pi_{166}$	$.07813\pi_{111}+.2188\pi_{123}$ $+.5938\pi_{112}+.1094\pi_{122}$ $+.2936\pi_{441}+.0979\pi_{661}$ $-.0383\pi_{144}$ $-.1916\pi_{166}-.1533\pi_{456}$	$.2778\pi_{123}+.1111\pi_{122}$ $+.5556\pi_{112}$ $+.0556\pi_{111}-.1362\pi_{166}$ $+.1740\pi_{661}+.3480\pi_{441}$ $-.0681\pi_{144}-.2725\pi_{456}$	$.1349\pi_{123}+.6544\pi_{112}$ $+.1164\pi_{122}$ $+.0943\pi_{111}-0.1087\pi_{456}$ $-.0272\pi_{144}-.2312\pi_{166}$ $+.1765\pi_{441}+.0694\pi_{661}$	$.0714\pi_{111}+.5830\pi_{112}$ $+.1101\pi_{122}+.2355\pi_{123}$ $+.3082\pi_{441}$ $+.1212\pi_{661}-.1899\pi_{456}$ $-.1750\pi_{166}-.0475\pi_{144}$	$.1143\pi_{122}+.6286\pi_{112}$ $+.0857\pi_{111}+.1714\pi_{123}$ $+.2237\pi_{441}$ $+.0895\pi_{661}-.0350\pi_{144}$ $-.1401\pi_{456}-.2102\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{122}\rangle$	$.1250\pi_{111}+.2500\pi_{112}$ $+.6250\pi_{122}-.7830\pi_{661}$ $+.3065\pi_{166}$	$.0781\pi_{111}+.2188\pi_{112}$ $+.4844\pi_{122}+.2188\pi_{123}$ $-.0979\pi_{441}-.4894\pi_{661}$ $+.2682\pi_{144}$ $+.2682\pi_{166}-.1533\pi_{456}$	$.2778\pi_{123}+.4444\pi_{122}$ $+.2222\pi_{112}$ $+.0556\pi_{111}-.1362\pi_{166}$ $+.1740\pi_{661}+.3480\pi_{441}$ $-.0681\pi_{144}-.2725\pi_{456}$	$.1349\pi_{123}+.2329\pi_{112}$ $+.5379\pi_{122}+.0943\pi_{111}$ $-.1087\pi_{456}+.1654\pi_{144}$ $+.2856\pi_{166}-.0694\pi_{441}$ $-.5906\pi_{661}$	$.0714\pi_{111}+.2201\pi_{112}$ $+.4730\pi_{122}+.2355\pi_{123}$ $-.1212\pi_{441}-.4470\pi_{661}$ $-.1899\pi_{456}+.2699\pi_{166}$ $+.2888\pi_{144}$	$.5143\pi_{122}+.2286\pi_{112}$ $+.0857\pi_{111}$ $+.1714\pi_{123}-.0895\pi_{441}$ $-.5369\pi_{661}+.2102\pi_{144}$ $-.1401\pi_{456}+.2803\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{123}\rangle$	$.2500\pi_{112}+.7500\pi_{123}$ $-.3915\pi_{441}$	$.03125\pi_{111}+.3750\pi_{112}$ $+.2187\pi_{122}+.3750\pi_{123}$ $-.4894\pi_{441}-.1958\pi_{661}$ $-.2299\pi_{144}-.0766\pi_{166}$ $+.3065\pi_{456}$	$.2778\pi_{123}+.2778\pi_{122}$ $+.3889\pi_{112}+.0556\pi_{111}$ $-.1362\pi_{166}-.3480\pi_{661}$ $-.4350\pi_{441}-.2725\pi_{144}$ $+.5450\pi_{456}$	$.5195\pi_{123}+.3234\pi_{112}$ $+.1349\pi_{122}+.0222\pi_{111}$ $+.2174\pi_{456}-.1382\pi_{144}$ $-.0543\pi_{166}-.4371\pi_{441}$ $-.1388\pi_{661}$	$.0387\pi_{111}+.3783\pi_{112}$ $+.2356\pi_{122}+.3475\pi_{123}$ $-.4711\pi_{441}-.2425\pi_{661}$ $+.3797\pi_{456}-.0949\pi_{166}$ $-.2413\pi_{144}$	$.1714\pi_{122}+.3429\pi_{112}$ $+.0286\pi_{111}+.4571\pi_{123}$ $-.4474\pi_{441}-.1790\pi_{661}$ $-.1752\pi_{144}+.2803\pi_{456}$ $-.0701\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{113}\rangle$	$.7500\pi_{112}+.2500\pi_{123}$ $+.3915\pi_{441}$	$.0937\pi_{111}-.0766\pi_{144}$ $-.2230\pi_{166}-.3065\pi_{456}$ $+.1563\pi_{122}$ $+.1250\pi_{123}+.6250\pi_{112}$ $+.0979\pi_{441}+.1958\pi_{661}$	$.1667\pi_{111}+.5000\pi_{112}$ $+.1667\pi_{122}+.1667\pi_{123}$ $+.2610\pi_{441}-.4087\pi_{166}$	$.0665\pi_{111}-.0295\pi_{144}$ $-.1631\pi_{166}+.1867\pi_{123}$ $+.2547\pi_{441}+.0905\pi_{122}$ $+.6563\pi_{112}-.1179\pi_{456}$ $-.0753\pi_{661}$	$.1395\pi_{123}-.0515\pi_{144}$ $-.2848\pi_{166}+.1526\pi_{441}$ $+.1161\pi_{111}+.5863\pi_{112}$ $+.1581\pi_{122}+.1315\pi_{661}$ $-.2059\pi_{456}$	$.1143\pi_{122}+.6286\pi_{112}$ $+.0857\pi_{111}+.1714\pi_{123}$ $+.2237\pi_{441}$ $+.0895\pi_{661}-.0350\pi_{144}$ $-.1401\pi_{456}-.2102\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{133}\rangle$	π_{122}	$.1250\pi_{111}+.3065\pi_{144}$ $+.3065\pi_{166}$ $+.3750\pi_{122}+.2500\pi_{123}$ $+.2500\pi_{112}-.7830\pi_{661}$	$.2725\pi_{144}-.5450\pi_{456}$ $-.6960\pi_{661}+.1111\pi_{111}$ $+.4444\pi_{112}+.2222\pi_{122}$ $+.2222\pi_{123}-.3480\pi_{441}$ $+.5450\pi_{166}$	$.0684\pi_{111}+.1677\pi_{144}$ $+.2174\pi_{166}+.1367\pi_{123}$ $-.0635\pi_{441}+.6176\pi_{122}$ $+.1773\pi_{112}-.0995\pi_{456}$ $-.4283\pi_{661}$	$.2388\pi_{123}+.2928\pi_{144}$ $+.3797\pi_{166}-.1110\pi_{441}$ $+.1194\pi_{111}+.3097\pi_{112}$ $+.3321\pi_{122}-.7480\pi_{661}$ $-.1738\pi_{456}$	$.5143\pi_{122}+.2286\pi_{112}$ $+.0857\pi_{111}$ $+.1714\pi_{123}-.0895\pi_{441}$ $-.5369\pi_{661}+.2102\pi_{144}$ $-.1401\pi_{456}+.2803\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{166}\rangle$	$.2039\pi_{111}-.4078\pi_{112}$ $+.2039\pi_{122}+.5000\pi_{166}$	$.1274\pi_{111}-.2549\pi_{112}$ $+.1784\pi_{122}-.0510\pi_{123}$ $+.2500\pi_{456}+.4375\pi_{166}$ $+.1596\pi_{661}-.1596\pi_{441}$ $+.1875\pi_{144}$	$.0906\pi_{111}-.1812\pi_{112}$ $+.1812\pi_{122}-.0906\pi_{123}$ $+.4444\pi_{166}+.2838\pi_{661}$ $-.2838\pi_{441}+.2222\pi_{144}$ $+.2222\pi_{456}$	$.1538\pi_{111}-.3076\pi_{112}$ $+.1899\pi_{122}-.0362\pi_{123}$ $+.1367\pi_{456}$ $+.1127\pi_{144}+.4658\pi_{166}$ $-.1132\pi_{441}+.1132\pi_{661}$	$.1164\pi_{111}-.2328\pi_{112}$ $+.1795\pi_{122}-.0631\pi_{123}$ $-.1977\pi_{441}+.1977\pi_{661}$ $+.2388\pi_{456}+.4403\pi_{166}$ $+.1968\pi_{144}$	$.1398\pi_{111}-.2796\pi_{112}$ $+.1864\pi_{122}-.0466\pi_{123}$ $-.1460\pi_{441}+.1460\pi_{661}$ $+.1429\pi_{144}+.1714\pi_{456}$ $+.4571\pi_{166}$

(*Продолжение таблицы*)

1	2	3	4	5	6	7
$\langle\pi^p_{311}\rangle$	$.7500\pi_{112} + .2500\pi_{123}$ $+.3065\pi_{144}$	$.1250\pi_{123} + .0938\pi_{111}$ $+.3125\pi_{112}$ $+.4688\pi_{122} + .1533\pi_{144}$ $+.3832\pi_{166} - .3065\pi_{456}$ $-.1958\pi_{441} - .5873\pi_{661}$	$.1667\pi_{123} + .3333\pi_{122}$ $+.3333\pi_{112} + .1667\pi_{111}$ $+.4087\pi_{166} - 1.044\pi_{661}$ $+.2044\pi_{144}$	$.1867\pi_{123} + .1811\pi_{112}$ $+.5657\pi_{122}$ $+.0665\pi_{111} + .0753\pi_{441}$ $+.2289\pi_{144} - .1179\pi_{456}$ $-.4165\pi_{661} + .2220\pi_{166}$	$.1161\pi_{111} + .3162\pi_{112}$ $+.4282\pi_{122} + .1395\pi_{123}$ $-.1315\pi_{441} - .7274\pi_{661}$ $-.2059\pi_{456}$ $+.3878\pi_{166} + .1710\pi_{144}$	$.5143\pi_{122} + .2286\pi_{112}$ $+.0857\pi_{111}$ $+.1714\pi_{123} - .0895\pi_{441}$ $-.5369\pi_{661} + .2102\pi_{144}$ $-.1401\pi_{456} + .2803\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{312}\rangle$	$.2500\pi_{122} + .7500\pi_{123}$ $-.3065\pi_{144}$	$.3750\pi_{123} + .0312\pi_{111}$ $+.4375\pi_{112} + .1562\pi_{122}$ $-.1533\pi_{144} - .0766\pi_{166}$ $+.3065\pi_{456} - .5873\pi_{441}$ $-.1958\pi_{661}$	$.2778\pi_{123} + .1111\pi_{122}$ $+.5556\pi_{112}$ $+.0556\pi_{111} - .1362\pi_{166}$ $-.3480\pi_{661} - .6960\pi_{441}$ $-.0681\pi_{144} + .5450\pi_{456}$	$.5195\pi_{123} + .2697\pi_{112}$ $+.1886\pi_{122}$ $+.0222\pi_{111} - .3530\pi_{441}$ $-.2041\pi_{144} + .2174\pi_{456}$ $-.1388\pi_{661} - .0544\pi_{166}$	$.0387\pi_{111} + .4710\pi_{112}$ $+.1427\pi_{122} + .3475\pi_{123}$ $-.6164\pi_{441} - .2425\pi_{661}$ $+.3797\pi_{456} - .0949\pi_{166}$ $-.1276\pi_{144}$	$.1714\pi_{122} + .3429\pi_{112}$ $+.0286\pi_{111}$ $+.4571\pi_{123} - .4474\pi_{441}$ $-.1790\pi_{661} - .1752\pi_{144}$ $+.2803\pi_{456} - .0701\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{313}\rangle$	π_{112}	$.2500\pi_{123} + .1250\pi_{111}$ $+.5000\pi_{112} + .1250\pi_{122}$ $-.3065\pi_{166} + .3915\pi_{441}$	$.2222\pi_{123} + .2222\pi_{122}$ $+.4444\pi_{112} + .1111\pi_{111}$ $-.2725\pi_{166} + .3480\pi_{661}$ $+.1740\pi_{441} - .1362\pi_{144}$ $-.5450\pi_{456}$	$.1367\pi_{123} + .7062\pi_{112}$ $+.0887\pi_{122}$ $+.0684\pi_{111} + .1824\pi_{441}$ $-.0249\pi_{144} - .0995\pi_{456}$ $+.0635\pi_{661} - .1677\pi_{166}$	$.1194\pi_{111} + .4870\pi_{112}$ $+.1548\pi_{122} + .2388\pi_{123}$ $+.3185\pi_{441}$ $+.1110\pi_{661} - .1738\pi_{456}$ $-.2928\pi_{166} - .0434\pi_{144}$	$.1143\pi_{122} + .6286\pi_{112}$ $+.0857\pi_{111} + .1714\pi_{123}$ $+.2237\pi_{441}$ $+.0895\pi_{661} - .0350\pi_{144}$ $-.1401\pi_{456} - .2102\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{333}\rangle$	π_{111}	$.2500\pi_{111} + .5000\pi_{112}$ $+.2500\pi_{122} + 1.566\pi_{661}$ $+.6131\pi_{166}$	$.2222\pi_{123} + .2222\pi_{122}$ $+.4444\pi_{112}$ $+.1111\pi_{111} + .5450\pi_{166}$ $+1.090\pi_{456} + 1.392\pi_{661}$ $+.6960\pi_{441} + .2725\pi_{144}$	$.0406\pi_{123} + .2735\pi_{112}$ $+.1367\pi_{122}$ $+.5492\pi_{111} + .1271\pi_{441}$ $+0497\pi_{144} + .1990\pi_{456}$ $+.8565\pi_{661} + .3353\pi_{166}$	$.2127\pi_{111} + .4776\pi_{112}$ $+.2388\pi_{122} + .0709\pi_{123}$ $+.2219\pi_{441} + 1.496\pi_{661}$ $+.3475\pi_{456} + .5857\pi_{166}$ $+.0869\pi_{144}$	$+.1714\pi_{122} + .3429\pi_{112}$ $+.4286\pi_{111} + .0571\pi_{123}$ $+.1790\pi_{441}$ $+1.074\pi_{661} + .0701\pi_{144}$ $+.2803\pi_{456} + .4204\pi_{166}$
$\langle\pi^p_{366}\rangle$	0	0	0	$.0362\pi_{111} - .0723\pi_{112}$ $+.3076\pi_{122} - .2714\pi_{123}$ $+.2264\pi_{441}$ $+.3531\pi_{144} - .2735\pi_{456}$ $-.2264\pi_{661} + .2254\pi_{166}$	$.06313\pi_{111} - .1263\pi_{112}$ $+.2328\pi_{122} - .1697\pi_{123}$ $+.3955\pi_{441} - .3955\pi_{661}$ $-.4776\pi_{456} + .3936\pi_{166}$ $+.2435\pi_{144}$	0
$\langle\pi^p_{661}\rangle$	$.1596\pi_{111} - .1596\pi_{122}$ $+.5000\pi_{661}$	$.5000\pi_{661} + .1958\pi_{456}$ $+.0489\pi_{166} - .0489\pi_{144}$ $-.0399\pi_{123} - .0998\pi_{122}$ $+.0399\pi_{112} + .0998\pi_{111}$ $+.1250\pi_{441}$	$.5556\pi_{661} + .1740\pi_{456}$ $+.0870\pi_{166} - .0870\pi_{144}$ $-.0710\pi_{123} - .0710\pi_{122}$ $+.0710\pi_{112} + .0710\pi_{111}$ $+.1111\pi_{441}$	$.1204\pi_{111} + .0283\pi_{112}$ $+.5101\pi_{661} - .1204\pi_{122}$ $-.0283\pi_{123} - .0347\pi_{144}$ $+.0347\pi_{166} + .1071\pi_{456}$ $+.0684\pi_{441}$	$-.0606\pi_{144} + .0606\pi_{166}$ $+.0494\pi_{112} + .0911\pi_{111}$ $+.5177\pi_{661} - .0911\pi_{122}$ $-.0494\pi_{123} + .1870\pi_{456}$ $+.1194\pi_{441}$	$.1342\pi_{456} - .0365\pi_{123}$ $+.1095\pi_{111} + .0365\pi_{112}$ $-.0447\pi_{144} - .1095\pi_{122}$ $+.0447\pi_{166} + .5143\pi_{661}$ $+.0857\pi_{441}$
$\langle\pi^p_{636}\rangle$	$.3193\pi_{112} - .3193\pi_{123}$ $+.5000\pi_{441}$	$.2500\pi_{661} - .3915\pi_{456}$ $-.0979\pi_{166} + .0979\pi_{144}$ $-.1596\pi_{123} - .0399\pi_{122}$ $+.1596\pi_{112} + .0399\pi_{111}$ $+.3750\pi_{441}$	$.2222\pi_{661} - .3480\pi_{456}$ $-.1740\pi_{166} + .1740\pi_{144}$ $-.0710\pi_{123} - .0710\pi_{122}$ $+.0710\pi_{112} + .0710\pi_{111}$ $+.4444\pi_{441}$	$.0283\pi_{111} + .2125\pi_{112}$ $+.1367\pi_{661} - .0283\pi_{122}$ $-.2125\pi_{123} + .0694\pi_{144}$ $-.0694\pi_{166} - .2141\pi_{456}$ $+.4418\pi_{441}$	$.1212\pi_{144} - .1212\pi_{166}$ $+.1328\pi_{112} + .0494\pi_{111}$ $+.2388\pi_{661} - .0494\pi_{122}$ $-.1329\pi_{123} - .3740\pi_{456}$ $+.3983\pi_{441}$	$-.2685\pi_{456} - .1824\pi_{123}$ $+.0365\pi_{111} + .1824\pi_{112}$ $+.0895\pi_{144} - .0365\pi_{122}$ $-.0895\pi_{166} + .1714\pi_{661}$ $+.4286\pi_{441}$

Из рассмотрения относительного изменения сопротивления в некотором направлении под углом к осям подложки следует, что должны выполняться равенства

$$\langle m^p_{13}\varepsilon_3\rangle = \langle m^p_{23}\varepsilon_3\rangle, \quad \langle m^p_{113}\varepsilon_3\rangle = \langle m^p_{223}\varepsilon_3\rangle,$$

$$\langle m^p_{123}\varepsilon_3\rangle = \langle m^p_{213}\varepsilon_3\rangle,$$

$$\langle m^p_{133}\varepsilon_3^2\rangle = \langle m^p_{233}\varepsilon_3^2\rangle, \quad \langle m^p_{313}\varepsilon_3\rangle = \langle m^p_{323}\varepsilon_3\rangle,$$

из которых определены

$$\langle m^p_{13}\rangle = \frac{\langle m^p_{13}\varepsilon_3\rangle + \langle m^p_{23}\varepsilon_3\rangle}{2\langle\varepsilon_3\rangle},$$

$$\langle m^p_{113}\rangle = \frac{\langle m^p_{113}\varepsilon_3\rangle + \langle m^p_{223}\varepsilon_3\rangle}{2\langle\varepsilon_3\rangle},$$

$$\langle m^p_{123}\rangle = \frac{\langle m^p_{123}\varepsilon_3\rangle + \langle m^p_{213}\varepsilon_3\rangle}{2\langle\varepsilon_3\rangle},$$

$$\langle m^p_{113}\rangle = \frac{\langle m^p_{133}\varepsilon_3^2\rangle + \langle m^p_{233}\varepsilon_3^2\rangle}{2\langle\varepsilon_3^2\rangle},$$

$$\langle m^p_{313}\rangle = \frac{\langle m^p_{313}\varepsilon_3\rangle + \langle m^p_{323}\varepsilon_3\rangle}{2\langle\varepsilon_3\rangle}.$$

Для текстур с осями симметрии кристаллитов, перпендикулярных пленке ниже 3-го порядка только для плосконапряженного состояния $\langle m^p_{636}\rangle = \langle m^p_{663}\rangle = \frac{\langle m^p_{636}\varepsilon_3\rangle}{\langle\varepsilon_3\rangle}$.

Тогда

$$\frac{\langle\Delta\rho_{ci}\rangle}{\langle\rho_c\rangle} = \langle m^p_{i1}\rangle\varepsilon_1 + \langle m^p_{i2}\rangle\varepsilon_2 + \langle m^p_{i3}\rangle\langle\varepsilon_3\rangle + \langle m^p_{i11}\rangle\varepsilon_1^2$$
$$+ \langle m^p_{i22}\rangle\varepsilon_2^2 + \langle m^p_{i33}\rangle\langle\varepsilon_3\rangle^2 + 2\langle m^p_{i12}\rangle\varepsilon_1\varepsilon_2$$
$$+ 2\langle m^p_{i13}\rangle\varepsilon_1\langle\varepsilon_3\rangle + 2\langle m^p_{i23}\rangle\varepsilon_2\langle\varepsilon_3\rangle + \langle m^p_{i66}\rangle\varepsilon_6^2,$$

$$\frac{\langle\Delta\rho_{c6}\rangle}{\langle\rho_c\rangle} = \langle m^p_{66}\rangle\varepsilon_6 + 2\langle m^p_{616}\rangle\varepsilon_1\varepsilon_6$$
$$+ 2\langle m^p_{626}\rangle\varepsilon_2\varepsilon_6 + 2\langle m^p_{636}\rangle\langle\varepsilon_3\rangle\varepsilon_6,$$

$$i = 1, 2, 3.$$

Коэффициенты пьезосопротивления поликремниевых пленок определены как

$$\langle\pi^p_{in}\rangle = \langle m^p_{ik}\rangle\langle S^p_{kn}\rangle, \quad \langle\pi^p_{ins}\rangle = \langle m^p_{ikp}\rangle\langle S^p_{kn}\rangle\langle S^p_{ps}\rangle.$$

В таблице приведены коэффициенты пьезосопротивления 2-го порядка изотропных и текстурированных поликремниевых пленок с текстурами, рассматриваемыми в данной работе, выраженные через коэффициенты пьезосопротивления монокристаллического кремния. При вычислении $\langle\pi^p_{ins}\rangle$ использованы значения $\langle S^p_{kn}\rangle$ из [13].

3. Обсуждение результатов

Использованная в работе процедура усреднения автоматически приводит к выполнению требований симметрии для коэффициентов эластосопротивления и пьезосопротивления: $\langle m^p_{222}\rangle = \langle m^p_{111}\rangle$, $\langle m^p_{212}\rangle = \langle m^p_{112}\rangle$, $\langle m^p_{213}\rangle = \langle m^p_{123}\rangle$, $\langle m^p_{323}\rangle = \langle m^p_{313}\rangle$, $\langle m^p_{322}\rangle = \langle m^p_{311}\rangle$, $\langle m^p_{266}\rangle = \langle m^p_{166}\rangle$, $\langle\pi^p_{222}\rangle = \langle\pi^p_{111}\rangle$, $\langle\pi^p_{211}\rangle = \langle\pi^p_{122}\rangle$, $\langle\pi^p_{223}\rangle = \langle\pi^p_{113}\rangle$, $\langle\pi^p_{212}\rangle = \langle\pi^p_{112}\rangle$, $\langle\pi^p_{213}\rangle = \langle\pi^p_{123}\rangle$, $\langle\pi^p_{233}\rangle = \langle\pi^p_{133}\rangle$, $\langle\pi^p_{323}\rangle = \langle\pi^p_{313}\rangle$, $\langle\pi^p_{322}\rangle = \langle\pi^p_{311}\rangle$, $\langle\pi^p_{266}\rangle = \langle\pi^p_{166}\rangle$, $\langle\pi^p_{626}\rangle = \langle\pi^p_{616}\rangle$.

Для изотропных пленок, как это и следует из симметрии, выполняются следующие соотношения:

$$\langle\pi^p_{144}\rangle = \frac{1}{2}\big(\langle\pi^p_{122}\rangle - \langle\pi^p_{123}\rangle\big),$$

$$\langle\pi^p_{155}\rangle = \frac{1}{4}\big(\langle\pi^p_{111}\rangle - 2\langle\pi^p_{112}\rangle + \langle\pi^p_{122}\rangle\big),$$

$$\langle\pi^p_{414}\rangle = \frac{1}{2}\big(\langle\pi^p_{112}\rangle - \langle\pi^p_{123}\rangle\big), \ \langle\pi^p_{424}\rangle = \frac{1}{4}\big(\langle\pi^p_{111}\rangle - \langle\pi^p_{122}\rangle\big),$$

$$\langle\pi^p_{456}\rangle = \frac{1}{8}\big(\langle\pi^p_{111}\rangle - 2\langle\pi^p_{112}\rangle - \langle\pi^p_{122}\rangle + 2\langle\pi^p_{123}\rangle\big).$$

Для всех текстур и изотропии:

1. Всесторонняя деформация $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ не изменяющая симметрию кристаллитов не приводит к „большому“ эффекту пьезосопротивления и „большой“ нелинейности $(m_{111} \approx m_{122} \approx m_{112} \approx m_{123} \approx 0)$:

$$\frac{\langle\Delta\rho_{c1}\rangle}{\langle\rho_c\rangle} = \big(\langle m^p_{11}\rangle + \langle m^p_{12}\rangle + \langle m^p_{13}\rangle\big)\varepsilon + \big(\langle m^p_{111}\rangle$$
$$+ \langle m^p_{122}\rangle + \langle m^p_{133}\rangle + 2\langle m^p_{112}\rangle + 2\langle m^p_{113}\rangle + 2\langle m^p_{123}\rangle\big)\varepsilon^2$$
$$= (m_{11} + 2m_{12})\varepsilon + (m_{111} + 2m_{122} + 4m_{112} + 2m_{123})\varepsilon^2.$$

2. Гидростатическое давление $(T = T_1 = T_2 = T_3)$, не изменяющее симметрию кристаллитов, также не приводит к „большому“ эффекту пьезосопротивления и „большой“ нелинейности:

$$\frac{\langle\Delta\rho_{c1}\rangle}{\langle\rho_c\rangle} = \big(\langle\pi^p_{11}\rangle + \langle\pi^p_{12}\rangle + \langle\pi^p_{13}\rangle\big)T + \big(\langle\pi^p_{111}\rangle + \langle\pi^p_{122}\rangle$$
$$+ \langle\pi^p_{133}\rangle + 2\langle\pi^p_{112}\rangle + 2\langle\pi^p_{113}\rangle + 2\langle\pi^p_{123}\rangle\big)T^2$$
$$= (\pi_{11} + 2\pi_{12})T + (\pi_{111} + 2\pi_{122} + 4\pi_{112} + 2\pi_{123})T^2$$

$(\pi_{111} \approx \pi_{122} \approx \pi_{112} \approx \pi_{123} \approx 0)$ [19].

На рис. 1, 2 приведены экспериментальные и расчетные зависимости относительных изменений сопротивления на единицу механического напряжения $\left(\frac{\langle\Delta\rho_i\rangle}{\langle\rho\rangle T_j}\right)$ поликремниевых пленок при комнатной температуре. При расчетах значения коэффициентов пьезосопротивления 2-го порядка монокристаллического кремния взяты из [19], где они приведены для трех уровней легирования с указанием ошибок их определения. Экспериментальные результаты относительного изменения удельного сопротивления от механического напряжения взяты

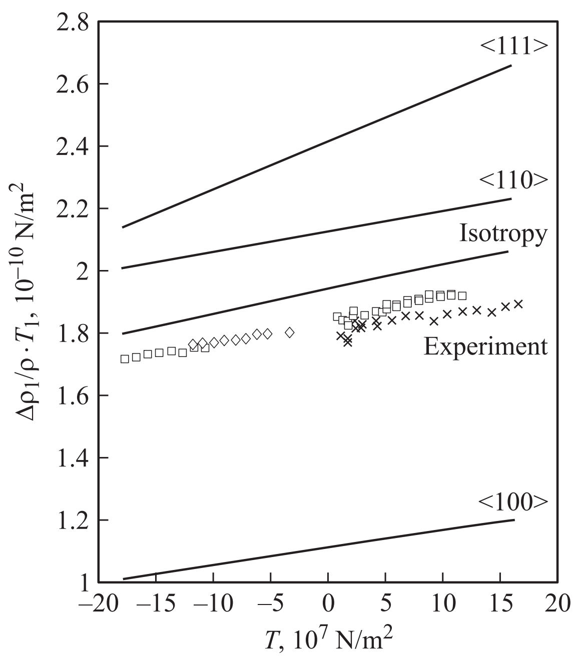

Рис. 1. Зависимость относительного изменения продольного удельного сопротивления на единицу механического напряжения от механического напряжения.

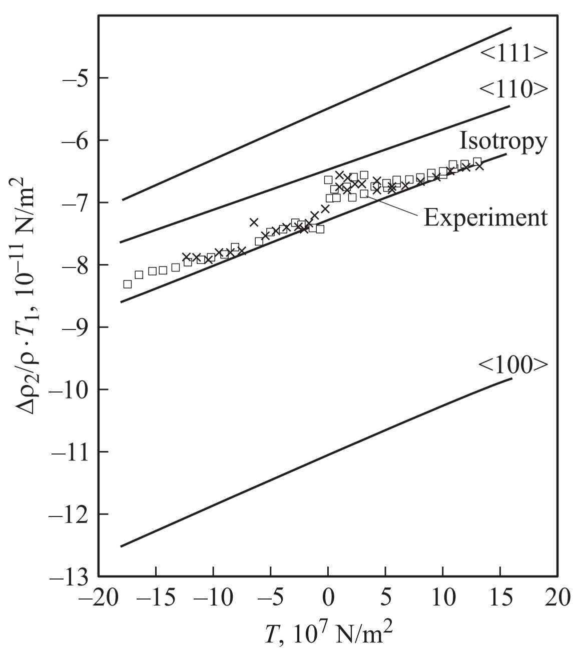

Рис. 2. Зависимость относительного изменения поперечного удельного сопротивления на единицу механического напряжения от механического напряжения.

из [14]. Пленки имеют текстуру $\langle 110\rangle$, возможно с примесью изотропии. Уровень легирования поликремниевых пленок в [14] — $7\cdot 10^{19}$ см$^{-3}$ и отличается от приведенных в [19]. Поэтому при расчетах были использованы следующие значения коэффициентов пьезосопротивления 2-го порядка: $\pi_{111}=\pi_{112}=\pi_{122}=\pi_{123}=0$, $\pi_{661}=-3\cdot 10^{-20}$ Па$^{-2}$, $\pi_{166}=55\cdot 10^{-20}$ Па$^{-2}$, $\pi_{144}=-28\cdot 10^{-20}$ Па$^{-2}$, $\pi_{441}=12\cdot 10^{-20}$ Па$^{-2}$, $\pi_{456}=-20\cdot 10^{-20}$ Па$^{-2}$. Из рисунков видно, что как для продольного, так и для поперечного эффектов углы наклона прямых близки для текстур $\langle 100\rangle$, $\langle 110\rangle$ и изотропии. Для текстуры $\langle 110\rangle$ и изотропии наблюдается удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными зависимостями.

4. Заключение

1. Проведено феноменологическое описание пьезорезистивных свойств пленок поликристаллического кремния в квадратичном приближении с помощью тензоров эластосопротивления и пьезосопротивления, учитывающее симметрию пленки.

2. Для всех рассмотренных в работе текстур и изотропии выполняются равенства, следующие из требований симметрии, между усредненными коэффициентами пьезо- и эластосопротивления 2-го порядка.

3. Наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных зависимостей относительных изменений сопротивления на единицу механического напряжения поликремниевых пленок при комнатной температуре в области сильного легирования.

Список литературы

[1] V. Mosser, J. Suski, J. Goss, E. Obermeir. Sensors Actuators A, **28**, 113 (1991).
[2] J. Suski, V. Mosser, J. Goss. Sensors Actuators, **17**, 405 (1989).
[3] J. Suski, V. Mosser, G. Le Roux. *Electrochem. Soc. Conf.* (San Diego, CA, USA, Oct. 1986) p. 331.
[4] E. Obermeir. *Ph.D. Thesis* (University of Munich, 1983).
[5] P.H. French, A.G.R. Evans. Sensors Actuators, **7**, 135 (1985).
[6] D. Shubert, W. Jenschke, T. Uhlig, F.M. Schmidt. Sensors Actuators, **11**, 145 (1987).
[7] V.A. Gridchin, V.M. Lubimsky, M.P. Sarina. Sensors Actuators A, **49**, 67 (1995).
[8] P.H. French, A.G.R. Evans. Electron. Lett., **24**, 999 (1984).
[9] T. Toriyama, Y. Yokoyama, S. Sugiyama. Sensors Materials, **12**, 473 (2000).
[10] P.H. French, A.G.R. Evans. Sol. St. Electron., **32**, 1 (1989).
[11] M. Le Berre, M. Lemiti, D. Barbier, P. Pinard, J. Cali, E. Bustarret, J. Sicart, J.L. Robert. Sensors Actuators A, **46–47**, 166 (1995).
[12] Bossche, J.R. Mollinger. Sensors Actuators A, **62**, 475 (1997).
[13] В.А. Гридчин, В.М. Любимский. Микроэлектроника, **32**, 261 (2003).
[14] V.A. Gridchin, V.M. Lubimsky, M.P. Sarina. *Proceedings Measurement'* 97 (Smolenice, 1997) p. 74.
[15] W. Voigt. *Lehrbuch der Kristallphysik* (Verlag B.G. Teubner, Leipzig, 1910).
[16] Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. *Основы кристаллофизики* (М., Наука 1975).
[17] N.C.C. Lu, L. Gerzberg, C.Y. Lu, J.D. Meindl. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-28**, 818 (1981).

[18] D.M. Kim, A.N. Khondker, S.S. Ahmed, R.R. Shah. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-31**, 480 (1984).
[19] K. Matsuda, Y. Kanda, K. Yamamura, K. Suzuki. Jap. J. Appl. Phys., **29**, L1941 (1990).

Редактор Л.В. Беляков

Nonlinearity of the piezoresistance effect in polycrystalline silicon films

V.A. Gridchin, V.M. Lubimsky

Novosibirsk State Technical University,
630092 Novosibirsk, Russia

Abstract Offered is a phenomenological description of the piezoresistance properties of films of polycrystalline silicon with the help of tensors of elastoresistance and piezoresistance in the square-law approach which takes into account the symmetry of films. Formulas for calculating piezoresistance coefficients of the second order for some textures of polysilicon films have been obtained. Experimental and designed factors agree well in the range of high doping concentrations.