# ANALYSIS OF <100> SILICON APPLICATIONS FOR PIESORESISTIVE TRANSDUCERS OF NONELECTRIC PARAMETERS

The analysis of silicon tensoresistor made by p-type diffusion on <100> wafers in <110> direction is presented. Based on the theoretical analysis it was concluded that for proposed crystallographic orientation the absolute values of sensitivity coefficients to deformation of perpendicular tensoresistor are equal, and their sign are opposite. This result was also confirmed experimentally.

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Nr Elektronika 1983

Mirosław Lasek

Bogdan Maciej Wilamowski

Instytut Technologii Elektronicznej

# ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA KRZEMU (100) JAKO UKŁADU TENSOCZUŁEGO W PIEZOREZYSTANCYJNYCH PRZETWORNIKACH WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

W pracy przedstawiono analizę właściwości krzemowych tensorezystorów dyfuzyjnych posiadających typ przewodnictwa p i wykonanych na płaszczyźnie krystalograficznej (100) zgodnie z kierunkiem krystalograficznym <110>. Porównując dokonaną analizę z przeprowadzonymi doświadczeniami i pomiarami wykazano, że takie zorientowanie tensorezystorów umożliwia otrzymanie dużych wartości wzdłużnych i poprzecznych współczynników czułości odkształceniowej, przy praktycznie identycznych ich wartościach i przeciwnych znakach.

## 1. WSTĘP

Konstruktorzy krzemowych przyrządów mikromechanicznych mogą projektować przyrządy, w których struktury krzemowe są wykonane na różnych płaszczyznach i w różnych kierunkach krystalograficznych monokrystalicznego krzemu. Umiejętne korzystanie z właściwości fizycznych tych płaszczyzn i kierunków, daje możliwość projektowania wysokowyspecjalizowanych przyrządów o interesujących parametrach użytkowych .

W niniejszej pracy przedstawiono właściwości tensorezystorów dyfuzyjnych, posiadających typ przewodnictwa p i wykonanych na płaszczyźnie krystalograficznej (100) zgodnie z kierunkiem krystalograficznym <110>. Takie zorientowanie tensorezystorów umożliwia otrzymanie dużych wartości wzdłużnych i poprzecznych współczynników czułości odkształceniowej, przy praktycznie identycznych ich wartościach bezwzględnych i przeciwnych znakach. Mikromechaniczne przyrządy pomiarowe pracujące na bazie wyżej wymienionych tensorezystorów posiadają duże czułości przy jednoczesnej prostocie konstrukcji elektrycznej, spowodowanej symetrycznością rezystorowych układów mostkowych.

W pracy [4] przedstawiono modele oddziaływań mechanicznych oraz omówiono podstawowe właściwości tensometrów rezystancyjnych występujących w mikromechanicznych przyrządach piezorezystancyjnych. Tensorezystory dyfuzyjne rozpatrzono w oparciu o tak zwany model błonowy, zgodnie z którym tensorezystory podlegają płaskiemu stanowi naprężeń i odpowiadającemu mu przestrzennemu stanowi deformacji. W pracy tej, dla wyżej wymienionego modelu przedstawiono macierz współczynników czułości odkształceniowej w ogólnej postaci oraz w tak zwanym przybliżeniu izotropowej podatności sprężystej. Rozpatrzono dwa szczególne przypadki, gdy oś tensometru typu n jest zgodna z kierunkiem krystalograficznym <100> i gdy oś tensometru typu p jest zgodna z kierunkiem <111>. W powyższych przypadkach występuje maksimum czułości wzdłużnej tensorezystora. Jednak celem projektowania przyrządów piezorezystancyjnych nie powinno być otrzymanie maksymalnej czułości wzdłużnej tensorezystorów, lecz uzyskanie maksymalnej sumarycznej czułości, zależnej w równym stopniu od czułości wzdłużnej i poprzecznej.

W pracy [4] nie podano pełnej zależności wartości współczynników czułości odkształceniowej od orientacji płaszczyzny podstawy tensorezystora. Jako przykład rozpatrzono płaszczyznę (111), oraz przedstawiono graficzną zależność współczynników czułości tensorezystorów wykonanych w płaszczyźnie (110). Nie opisano interesujących właściwości tensorezystorów zorientowanych na płaszczyźnie (100). Prezentacja właściwości tych tensorezystorów jest treścią niniejszej pracy.

Praca została podzielona na dwie części. W pierwszej przedstawiono analizę teoretyczną zakończoną obliczeniem teoretycznych wartości współczynników czułości odkształceniowej dla wybranego układu krystalograficznego i dla typowego domieszkowania rezystorów dyfuzyjnych; w drugiej opisano sposób doświadczalnego potwierdzenia przeprowadzonej analizy teoretycznej.

## 2. ANALIZA TEORETYCZNA

Analiza dotyczy możliwości wykorzystania płytek krzemowych wyciętych w płaszczyźnie (100), o typie przewodnictwa podłoża n jako układu tensoczułego w piezorezystancyjnych przetwornikach wielkości mechanicznych np. siły.

Właściwości piezorezystancyjne krzemu w układzie głównych osi krystalograficznych opisywane są przez trzy współczynniki piezorezystancji $\Pi_{11}$, $\Pi_{12}$, $\Pi_{44}$. Znając je można określić współczynniki piezorezystancji w dowolnych płaszczyznach krystalograficznych.

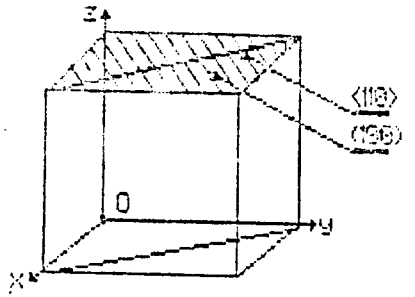
Dla płaszczyzny krystalograficznej (100) współczynniki te przyjmują następujące wartości [1];

$$\begin{aligned} \Pi'_{11} &= \Pi_{11} - 0{,}5 * \Pi_A * \sin^2 2\phi \\ \Pi'_{12} &= \Pi_{12} + 0{,}5 * \Pi_A * \sin^2 2\phi \\ \Pi'_{16} &= -0{,}5 * \Pi_A * \sin 4\phi \end{aligned} \qquad (1)$$

$$\Pi_A = \Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44}$$

gdzie:

$\phi$ – kąt między główną osią krystalograficzną a określonym kierunkiem krystalograficznym na płaszczyźnie (100).




rys.1

Względna zmiana rezystancji tensorezystora jest opisana następującym równaniem.

$$\Delta R/R_o \approx \Delta\varrho_i/\varrho_o = \Pi'_{11} * T_1 + \Pi'_{12} * T_2 + \Pi'_{16} * T_o \qquad (2)$$

gdzie:

$\Delta R$ – zmiana rezystancji tensorezystora,

$R_o$ – rezystancja tensorezystora przy braku naprężeń,

$\Delta\varrho_i$ – przyrost współczynnika rezystywności w kierunku i,

$\varrho_o$ – rezystywność półprzewodnika przy braku naprężeń,

$T_1$ – naprężenia wzdłużne,

$T_2$ – naprężenia poprzeczne,

$T_3$ – naprężenia ścinające.

Dla kierunku krystalograficznego <110> równania (1) osiągają ekstremum i przyjmują następujące wartości:

$$\begin{aligned} \Pi'_{11} &= 0{,}5 * (\Pi_{11} + \Pi_{12} + \Pi_{44}) \\ \Pi'_{12} &= 0{,}5 * (\Pi_{11} + \Pi_{12} - \Pi_{44}) \\ \Pi'_{16} &= 0 \end{aligned} \qquad (3)$$

Aproksymacja współczynników piezorezystancji dla warstw dyfuzyjnych typu p w funkcji powierzchniowej koncentracji domieszek, dla temperatury 20°C przedstawiona została w pracy [2].

$$\Pi_{11}=-1,42*10^{-12}*\ln N_s+9,31*10^{-11}$$
$$\Pi_{12}=8,6*10^{-13}*\ln N_s-5,405*10^{-11} \qquad [m^2/N] \quad (4)$$
$$\Pi_{44}=-1,18*10^{-10}*\ln N_s+6,12*10^{-9}$$

Stosunkowo często procesy dyfuzji prowadzi się tak, aby otrzymać tensorezystory dyfuzyjne z powierzchniową koncentracją domieszek na poziomie $6*10^{18}cm^{-1}$. Dla danej powierzchniowej koncentracji domieszek współczynniki piezorezystancji przyjmują następujące wartości:

$$\Pi_{11}=3,17*10^{-11}$$
$$\Pi_{12}=-1,69*10^{-11}$$
$$\Pi_{44}=101,8*10^{-11} \qquad [m^2/N] \quad (5)$$
$$\Pi'_{11}=51,64*10^{-11}$$
$$\Pi'_{12}=-50,16*10^{-11}$$

Podstawowym parametrem technicznym tensorezystorów są współczynniki czułości odkształceniowej $k_i$. Mogą one być wyliczone z następującej zależności:

$$[k_i]=[\Pi'_{1i}]*[S'_{ij}]^{-1} \qquad (6)$$

gdzie:

$[S'_{ij}]^{-1}$ = odwrotność macierzy podatności sprężystej krzemu w układzie dowolnych osi krystalograficznych.

Macierz podatności sprężystej charakteryzuje właściwości mechaniczne krzemu, które mogą być opisane także przez współczynnik Poissona v i moduł Younga E.

Zgodnie z [2] dla płaszczyzny krystalograficznej (100):

$$E=1/S'_{11}=1/(S_{11}-2*S_a*F_1) \qquad (7)$$

$$v=-S'_{12}/S'_{11}=-(S_{12}+S_a*F_{12})/(S_{11}-2*S_a*F_1) \qquad (8)$$

gdzie:

$F_1=(a_{11}*a_{12})^2+(a_{12}*a_{13})^2+(a_{13}*a_{11})^2$

$F_{12}=(a_{11}*a_{21})^2+(a_{12}*a_{22})^2+(a_{13}*a_{23})^2$

$S_a=S_{11}-S_{12}-S_{44}/2$

$S_{ij}$ - elementy macierzy podatności sprężystej w układzie głównych osi krystalograficznych,

$a_{1j}, a_{2j}$ - kolejno cos.kierunkowe kierunku naprężeń głównych i kierunku do niego prostopadłego.

Współczynniki $S_{ij}$ zgodnie z [3] przyjmują dla płaszczyzny krystalograficznej (100) następujące wartości:

$$S_{11}=7,64*10^{-12}$$
$$S_{12}=-2,14*10^{-12} \qquad [m^2/N] \quad (9)$$
$$S_{44}=12,561*10^{-12}$$

Dla kierunku krystalograficznego <110>;

$F_1=0,25$ $\qquad$ $F_{12}=0.5$

i w związku z tym, moduł Younga i współczynnik Poissona przyjmują następujące wartości:

$E=1,698*10^{11}$ $[N/m^2]$ $\qquad$ $v=0,066$

Znając moduł Younga i współczynnik Poissona można zapisać związek między współczynnikami piezorezystancji, a współczynnikami czułości odkształceniowej, w następujący sposób:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = E/(1-v^2) * \begin{bmatrix} 1 & v \\ v & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Pi'_{11} \\ \Pi'_{12} \end{bmatrix} \qquad (10)$$

gdzie:

$k_1, k_2$-kolejno wzdłużny i poprzeczny współczynnik czułości odkształceniowej tensometru.

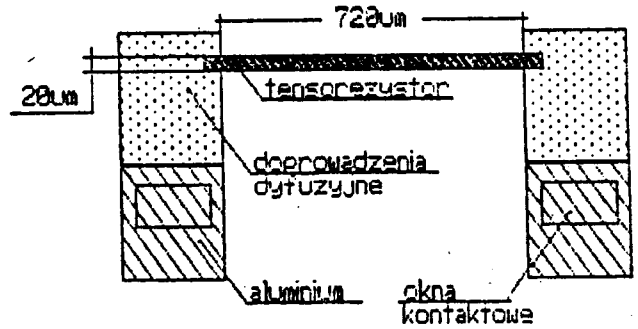
Wyrażenie (10) wiernie opisuje związek pomiędzy wyżej wymienionymi współczynnikami ,mimo ,że posiada identyczną postać jak wyrażenie do obliczania przybliżenia izotropowej podatności sprężystej przedstawione w [4]. Spowodowane to jest identycznym kierunkiem krystalograficznym odkształceń wzdłużnych i poprzecznych, a także faktem, że stałe E i v obliczono dla tego kierunku. Obliczone w wyżej wymieniony sposób współczynniki czułości odkształceniowej tensometru posiadają następujące wartości:

$$k_1 = 82,40 \qquad (10a)$$
$$k_2 = -79,71$$

## 3. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ I POMIARÓW

W celu potwierdzenia przeprowadzonej analizy teoretycznej, wykonano serię doświadczeń.

Jako materiał wyjściowy wykorzystano płytki krzemowe wycięte w płaszczyźnie krystalograficznej (100) o rezystywności podłoża $\varrho_p$=5,5 Ωcm i typie przewodnictwa n. Na płytkach wykonano tensorezystory dyfuzyjne typu p w postaci prostokątów o rozmiarach 720*20 μm. Zostały one rozmieszczone na płytce zgodnie z kierunkiem krystalografiwcznym <110>. Rys.2 przedstawia widok kompletu masek fotolitograficznych, z pomocą których wykonano tensometryczną strukturę krzemową.

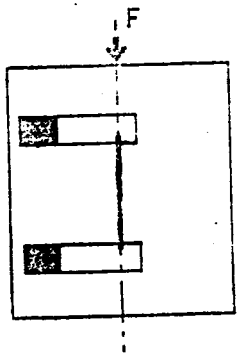



rys.2

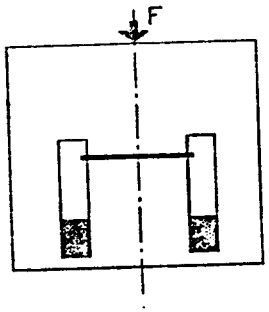
Tensorezystory w stanie bez naprężeń charakteryzowały się następującym parametrami:

- rezystancja powierzchniowa $R_s$=130 Ω/□
- głębokość złącza p-n $x_{p-n}$=4,5 μm
- koncentracja powierzchniowa domieszki $N_s=6*10^{18}$ $cm^{-1}$

Płytkę z wykonanymi tensorezystorami dyfuzyjnymi, pocięto na struktury tensometryczne. Wszystkie cięcia wykonano zgodnie z kierunkiem krystalograficznym <110>. Podział przeprowadzono tak, aby połowa struktur posiadała tensorezystor umieszczony wzdłuż (rys.3a), a połowa w poprzek (rys.3b) wysokości płytki.



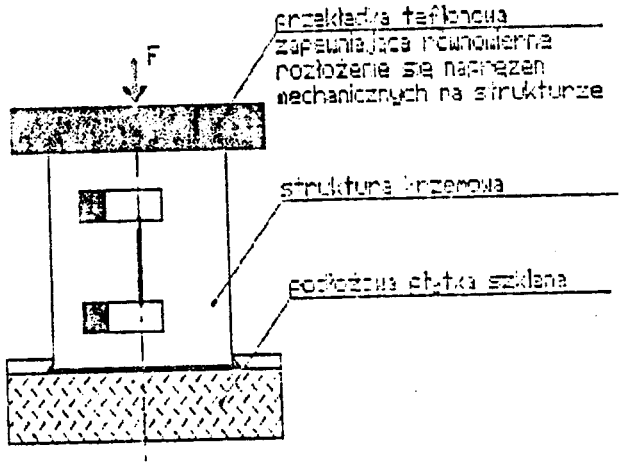

rys.3a




rys.3b

Struktury wklejono do podłoża i obciążono siłą F. Sposób zamocowania i obciążenia struktur przedstawiono na Rys.4.






rys.4

Każdy, pojedyńczy tensorezystor włączono w ćwierćmostek rezystancyjny i mostek zasilono stałym napięciem $U_z$.

$$U_1=1/4*(k_1*\varepsilon_1+k_2*\varepsilon_2)*U_z \qquad (11)$$

$$U_2=1/4*(k_1*\varepsilon_2+k_2*\varepsilon_1)*U_z$$

gdzie:

$U_1$, $U_2$ – kolejno, napięcie wyjściowe ćwierćmostka z tensorezystorem zlokalizowanym wzdłuż i w poprzek kierunku działania siły,

$\varepsilon_2=-v*\varepsilon_1$ – odkształcenia poprzeczne struktury,

$\varepsilon_1$ – odkształcenia wzdłużne struktury.

Przekształcając (11) otrzymano:

$$k_1=4*(U_1+v*U_2)/(1-v^2)*\varepsilon_1*U_z \qquad (12)$$

$$k_2=4*(U_2+v*U_1)/(1-v^2)*\varepsilon_1*U_z$$

Odkształcenia wzdłużne struktury w jednowymiarowym stanie naprężeń opisuje równanie:

$$\varepsilon_1 = F/(E*a*b) \qquad (13)$$

gdzie:

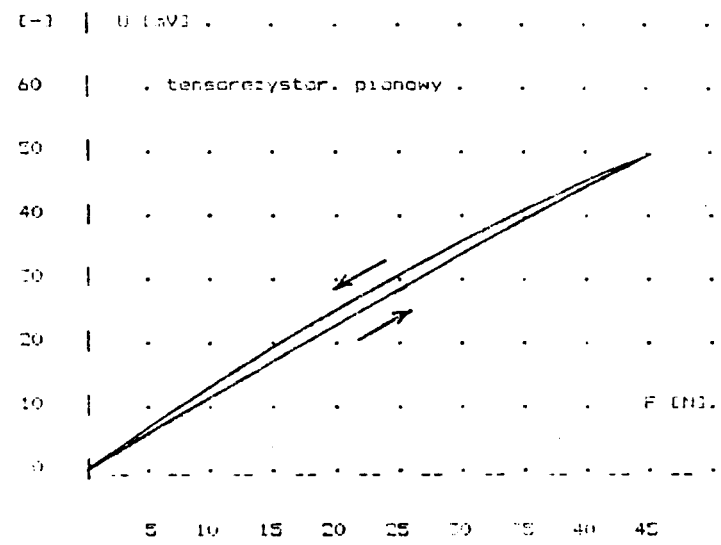
F - wywołująca odkształcenie struktury siła ,

a, b - kolejno szerokość i grubość struktury.

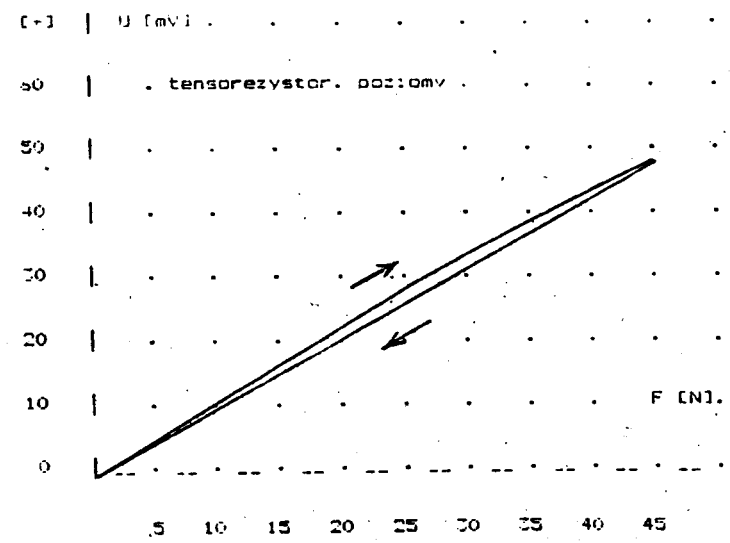
Dla wybranej płaszczyzny (100) i kierunku krystalograficznego <110>, wartość modułu Younga i współczynnika Poissona przedstawiono w pierwszej części pracy. Pozostałe dane uzyskano w wyniku przeprowadzonych doświadczeń.

Rysunek 5 i 6 przedstawia otrzymaną doświadczalnie zależność napięcia niezrównoważenia ćwierćmostka rezystancyjnego od wartości przyłożonej siły.






rys.5




rys.6

Podstawiając doświadczalnie uzyskane dane do równań (13) i (12) otrzymano:

$$\varepsilon_1 = 4{,}24 * 10^{-4}$$

$$k_1 = 92{,}53 \qquad (12a)$$

$$k_2 = -88{,}24$$

Do obliczenia wartości $k_1$ i $k_2$ wykorzystano następujące dane:

$F = 44{,}968$ N

$a = 1{,}56$ mm

$b = 0{,}40$ mm

$U_z = 4{,}7$ V

$U_1 = 4{,}9 * 10^{-2}$ V

$U_2 = 4{,}7 * 10^{-2}$ V



## 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń z błędem około 10% są zgodne z obliczeniami teoretycznymi. Istnieje duża zbieżność stosunku $k_1/k_2$ w obu wypadkach. Wartości bezwzględne obu współczynników $k_1$ i $k_2$ są duże i praktycznie sobie równe. Współczynniki te posiadają przeciwne znaki.

| | $k_1$ | $k_2$ | $k_1/k_2$ |
|---|---|---|---|
| dane teoretyczne | 82,40 | -79,71 | 1,03 |
| dane doświadczalne | 92,53 | -88,24 | 1,05 |

2. Jstnieje możliwość wykorzystania płytek krzemowych wyciętych w płaszczyźnie krystalograficznej (100) i typie przewodnictwa podłoża n jako układu tensoczułego w piezorezystancyjnych przetwornikach wielkości nieelektrycznych, np. w przetwornikach siły. Optymalne zorientowanie tensorezystorów na płytce powinno być zgodne z kierunkiem krystalograficznym <110> . Jak pokazano w powyższej pracy , takie tensorezystory posiadają praktycznie identyczne czułości odkształceń wzdłużnych i poprzecznych , co przy projektowaniu przyrządów sprowadza się do identycznych wartości wszystkich tensorezystorów tworzących pomiarowy mostek rezystancyjny .

3. Wskazana płaszczyzna i kierunek krystalograficzny wykonania tensorezystorów zapewniają maksymalny poziom sygnału wyjściowego przetwornika .

## BIBLIOGRAFIA


[1] W.T.Pivonienkov, W.M.Stuczebnikov, Pribory i sistiemy uprawlenij. Nr 1, 20, 1976.

[2] W.Pietrenko, Właściwości monolitycznych piezorezystancyjnych czujników ciśnienia, praca doktorska, PG-Gdańsk, 1979.

[3] W.R.Rungan, Silicon Semiconductor Technology, New York, 1965.

[4] M.Polowczyk, Wybrane problemy budowy półprzewodnikowych przyrządów piezorezystancyjnych, PG-Gdańsk.

[5] B.Szumielewicz, B.Słomski, W.Stryburski, Pomiary elektroniczne w technice, WNT, W-wa, 1982.




## STRESZCZENIE


Анализ возможности использования тензочувствительных элементов выполненых на основе кремния (100) в пьезорезисторных преобразователях неэлектрических величин.

В работе был разработан математический анализ свойств тензорезисторов, созданных методом диффузии p типа на кристаллической плоскости (100) и в кристаллическом направлении <110>. После сравнения математического анализа с проведенными опытами и измерениями указано, что такое расположение тензорезисторов приводит к получению больших значении продолных и поперечных коэффициентов деформаций, при практически одинаковых их значениях и противоположных знаках.

Практическим результатом работы является предложение, что микромеханические, пьезорезисторные измерителные приборы работающе на основе выше указаных тензорезисторов обладают высокой чувствительностью и могут быть использованные в несложных электрических конструкциях за счет симетричности резисторных мостиковых схем.