

## Физические основы построения полупроводниковых преобразователей силы и давления

Гусев О.К., Киреенко В.П.

Белорусский национальный технический университет

Среди большого разнообразия различных измерительных преобразователей число механоэлектрических, построенных на тензорезистивном принципе занимает ведущее место. Классический тензорезистивный преобразователь давления представляет собой мембрану – воспринимающую измеряемое давление (силу), которая, деформируясь, передает воздействие на тензорезистор. Его деформация приводит к появлению механических напряжений, которые изменяют омическое сопротивление тензорезистора и, соответственно, изменяется выходной сигнал устройства. Развитие планарной технологии и успехи микроэлектроники позволили объединить в одной конструкции как все отдельные элементы измерительного устройства так и электронную часть.

В качестве базового материала таких преобразователей используется кремний, на основе которого изготавливаются как конструктивные элементы, так и сами тензорезисторы. Связь между изменением его электрического сопротивления и механическими напряжениями или деформациями устанавливается на основе феноменологической теории пьезорезистивного эффекта [1], которая устанавливает связь между изменением электрического сопротивления полупроводника и механическими напряжениями в нем или его деформациями. Эту зависимость можно представить в виде

$$E_S/\rho_0 = j_i + \pi_{ijkm} \sigma_{km} j_j; \quad (1)$$

$$E_S/\rho_0 = j_i + m_{ijkm} \varepsilon_{km} j_j, \quad (2)$$

где  $i, j, k, m, s = 1, 2, 3$ ;  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление материала при механическом напряжении, равном нулю;  $E_S$  – компоненты вектора напряженности электрического поля;  $j_i$  и  $j_j$  – компоненты вектора плотности тока,  $\sigma_{km}$ ,  $\varepsilon_{km}$  – тензоры второго ранга деформации и напряжения. Коэффициенты  $\pi_{ijkm}$ ,  $m_{ijkm}$  называют пьезорезистивными, и они являются в общем случае тензорами четвертого порядка и связаны

между собой через коэффициенты податливости и модули упругости.

Но так как в большинстве практических случаев [2-5] в тензорезисторах направление тока совпадает с направлением электрического поля, механические напряжения учитываются только в плоскости упругого элемента, а тензорезисторы ориентированы в плоскостях (001), (011) и (111), то выражение (1) можно преобразовать к виду

$$\delta'_1 = \pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_2 + \pi'_{16} \sigma'_6. \quad (3)$$

Т.е. задача определения относительного изменения сопротивления тензорезистора сводится к определению компонент тензора механических напряжений, действующих на резистор, и к определению компонент тензора пьезорезистивных коэффициентов через главные пьезорезистивные коэффициенты  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$  и  $\pi_{44}$  с учетом поворота произвольной системы координат на некоторый угол. Более того, во многих случаях (при уровнях легирования кремния меньше  $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) для кремния  $p$ -типа достаточно знать коэффициент  $\pi_{44}$  а для  $n$ -типа -  $\pi_{11}$  [3, 4]. Следовательно, при прочих равных условиях чувствительность тензорезистора к механическому воздействию будет определяться главными пьезорезистивными коэффициентами.

Главные пьезорезистивные коэффициенты зависят от многих факторов: от материала, типа проводимости, удельного сопротивления, температуры и механического напряжения или деформации. Разработчика интегральных преобразователей прежде всего интересуют зависимости пьезорезистивных коэффициентов от концентрации примесей и температуры т.е. основной интерес представляют концентрационные и температурные зависимости коэффициентов  $\pi_{44}$  (для  $p$ -типа тензорезисторов) и  $\pi_{11}$  (для  $n$ -типа). Эти зависимости к сожалению до настоящего времени недостаточно изучены.

В практических разработках измерительных тензопреобразователей [3-5] чаще всего встречается радиально-тангенциальное расположение тензорезисторов  $p$ - и  $n$ -типов проводимости для трех ориентаций плоскости мембраны. Проводимые расчеты являются основой для выбора правильного положения тензорезисторов на мембране с учетом значения и знака относительного приращения их сопротивление. Причем во всех случаях тензорезисторы можно расположить так на круглых

мембранах, что они будут иметь противоположные знаки приращения сопротивления (рис.1.). Это позволяет создавать на одной мембране полную мостовую схему, в каждом плече которой включен тензорезистор с соответствующим знаком для увеличения чувствительности всего преобразователя. Кроме того, на одной мембране можно получить несколько мостовых схем для резервирования.

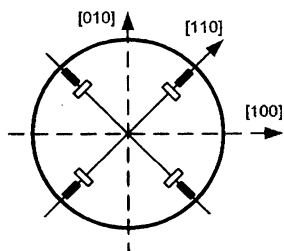


Рис.1. Расположение однополосных тензорезисторов  $p$ -типа с положительной (темные) и отрицательной (светлые) чувствительностью на мембране (001)

В этом случае чувствительность к давлению такого мембранного преобразователя с мостовой тензорезисторной схемой образованной двумя радиальными и двумя тангенциальными резисторами определяется выражением [5]

$$S = \frac{1}{q} \frac{|\delta +| + |\delta -|}{2}. \quad (4)$$

Произведен расчет и оценка параметров кремниевого вибрационного мостикового датчика. Варьируемыми параметрами и характеристиками при расчетах были приняты следующие величины: геометрические размеры кремниевого резонатора, геометрические размеры кремниевого мостикового элемента, вольтамперная характеристика металлического контакта к тензорезистивному слою, геометрические размеры тензорезистивного слоя, концентрация и подвижность электронов в кремнии, преобразуемое значение силы, величина межэлектродного зазора между контактом мостикового элемента и поверхностью диэлектрика тензорезистора. Рассчитанная характеристика показана на рис.2.

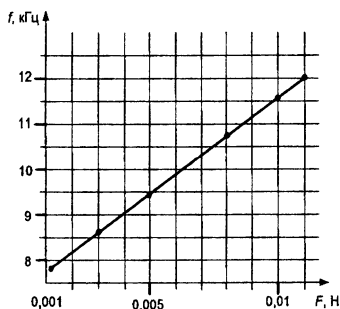


Рис.2. Теоретическая характеристика преобразования мостикового датчика на основе кремния

### Литература

1. Терстон, Р. Применение полупроводниковых преобразователей для измерения деформаций, ускорений и смещений. — В кн.: Физическая акустика/ Под ред. У. Мэзона, т. 1, часть Б — Методы и приборы ультразвуковых исследований. Пер. с англ.—М.: Мир, 1967, с. 187—209.
2. Ваганов, В.И. Интегральные тензопреобразователи.- М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Соколов, Л.В., Школьников, В.М. Методы проектирования интегральных полупроводниковых сенсоров, сенсорных и микромеханических систем/Датчики и системы.-2002.-№1.-с.45-48.
4. Толстенок, О.А., Холомина, Т.А. Конструктивные и технологические особенности измерительно-преобразовательных микроэлектромеханических систем на основе кремниевых датчиков/Измерительная техника.-2004.-№8.-с.66-71.
5. Беликов, Л.В. Проектирование топологии тензорезистивного моста Уитстона, расположенного на монокристаллической кремниевой мембране, ориентированной по (111)/ Микросистемная техника-2001.-№8.-с.14-18.