

УДК 621.384

ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ СВОЙСТВ КРЕМНИЯ В МИКРОДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ

Котова Александра Михайловна

Студентка 4 курса,

Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.Б. Цветков

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

В современных микротехнологиях кремний все более прочно занимает место в качестве не только полупроводникового, но и конструкционного материала.

Высокая чистота и совершенство монокристаллической структуры применяемого кремния позволяют оптимизировать механические свойства приборов, изготавливаемых из него, подобно тому, как были оптимизированы их электронные свойства. Результатом этого является улучшение характеристик, повышение надежности и воспроизводимости параметров изделий.

Тот факт, что кремний, помимо своей обычной роли электронного материала с хорошо развитой технологией изготовления микроэлектронных устройств, может также использоваться как прецизионный, высоконадежный и прочный конструкционный материал, лежит в основе микро - электромеханических систем (МЭМС).

МЭМС включают широкий круг функциональных микроустройств, среди которых ключевую роль играют микродатчики для измерения значений физических параметров и преобразования их в электрические сигналы.

Принцип действия многих видов микродатчиков (давления, силы, ускорения и т.д.) основан на использовании пьезорезистивных свойств монокристаллического кремния.

Цель работы – на основе анализа физических свойств кремния разработать математическое обеспечение для расчета основных технических параметров кремниевых чувствительных элементов на примере микродатчика давления.

Принцип действия и структура пьезорезистивного микродатчика

Чувствительный элемент пьезорезистивного микродатчика включает (рис. 1) четыре диффузионных пьезорезистора, внедренных в упругую кремниевую диафрагму и соединенных между собой в мостовую схему – мост Уитстона. При приложении давления и изгибе диафрагмы изгибающие напряжения ведут к возникновению пьезоэффекта. Сопротивление резисторов меняется, в результате они могут служить в качестве тензодатчиков.

Давление на чувствительный элемент приводит к появлению напряжений, которые изменяют сопротивления резисторов R_1 и R_3 – на $\Delta R_{//}$, а резисторов R_2 и R_4 на величину $\Delta R_{\perp}$. Индексы $\perp$ и $//$ обозначают резисторы, направленные перпендикулярно или параллельно краям диафрагмы соответственно.

При постоянном напряжении питания U_{Π} выходное напряжение U_B за счет разбалансировки моста становится отличным от нуля:

$$U_A = U_I \frac{\Delta R_{//} - \Delta R_{\perp}}{2R + \sum \Delta R}; \quad (1)$$

где $\sum \Delta R = \Delta R_{\perp} + \Delta R_{//}$.

В первом приближении можно считать, что $\Delta R_{\perp}$ и $\Delta R_{//}$ существенно меньше R , поэтому знаменатель полученного выражения упрощается:

$$U_B = U_{\Pi} \frac{\Delta R_{//} - \Delta R_{\perp}}{2R} = \frac{U_{\Pi}}{2} \left[\frac{\Delta R_{//}}{R} - \frac{\Delta R_{\perp}}{R} \right] \quad (2)$$

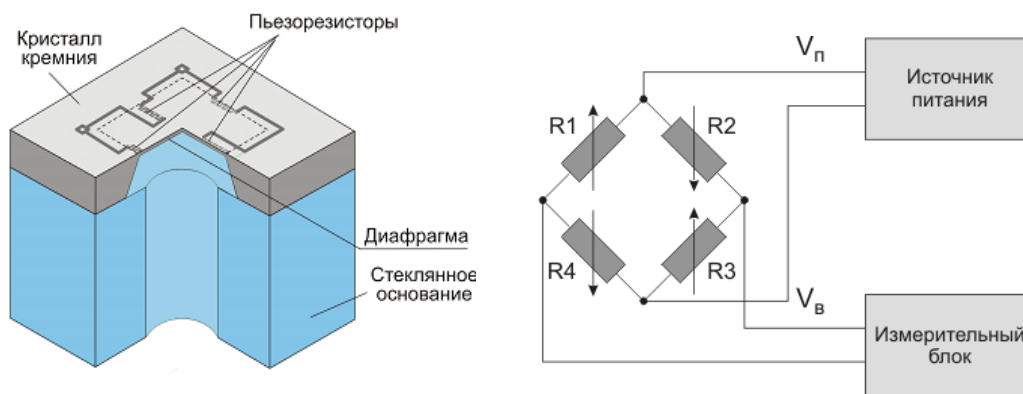


Рис. 1. Кремниевый чувствительный элемент.
а – конструкция, б – мостовая схема соединения резисторов

Пьезорезистивность

Пьезорезистивность – это явление изменения электрического сопротивления тела, в результате действия внешней силы.

При приложении внешней силы, соотношение между величиной деформации и приложенной нагрузкой определяется законом Гука. При трехосном напряженном состоянии тела напряжение и деформацию в

трехмерном пространстве записывают в виде тензоров второго ранга. Следовательно, соотношение между ними описывается тензором четвертого ранга – тензором жесткости.

Тензором называется матрица, которая преобразовывает один вектор в другой, при условии, что преобразование существует в любой координатной системе.

Запишем закон Гука при трехосном напряженном состоянии тела

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, ε_{kl} – тензор деформаций, C_{ijkl} – тензор жесткости.

При трехосном напряженном состоянии тензор напряжений состоит из 6 независимых компонентов. Для изотропного материала тензор жесткости может быть записан с помощью 2-х переменных (упругих констант) – модуля Юнга Y и коэффициента Пуассона ν , а для анизотропного – с помощью 3-х.

Эффект пьезорезистивности

В изотропном материале, значение электрического сопротивление резистора определяется следующим выражением

$$R = R(\rho, A, L) = \frac{\rho L}{A} \quad (4)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, A – площадь поперечного сечения резистора, L – длина резистора.

Если резистор подвергается действию силы, то его размеры меняются. Для малых изменений размеров или сопротивления мы можем записать

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \right) = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

Выражение (5) показывает изменение сопротивления в зависимости от изменения длины, площади поперечного сечения и удельного сопротивления. Изменение сопротивления за счет изменения геометрических размеров для полупроводников незначительно, по сравнению с вкладом за счет изменения удельного сопротивления, поэтому геометрической составляющей пренебрегаем.

Рассмотрим, как приложение нагрузки влияет на атомную структуру и свойства материала. Когда резистор деформируется, расстояние между двумя атомами увеличивается – это приводит к изменению ширины запрещенной зоны и к изменению эффективной массы носителей. Таким образом, подвижность носителей заряда и удельное сопротивление изменятся.

Чтобы описать относительное изменение удельного сопротивления используем линейную модель в предположении, что $\Delta\rho/\rho$ меняется пропорционально деформации.

Константу пропорциональности обычно записывают равной $\pi_L Y$, где π_L – это пьезорезистивный коэффициент, который измеряется в Па^{-1} . В

общем случае π является тензором четвертого ранга, учитывающим компоненты электрического поля, плотности электрического тока и механических напряжений. Каждая из этих компонент в свою очередь связана с направлением кристаллографических осей.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_L \sigma = \pi_L Y \varepsilon_L \quad (6)$$

Эффект пьезорезистивности в кремнии

Кремний является анизотропным материалом, поэтому описать изменение сопротивления для кремния несколько сложнее. Рассмотрим случай, где направление тока через резистор перпендикулярно или параллельно приложенной нагрузке (рис. 2).

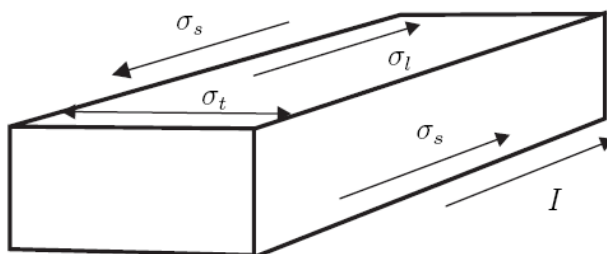


Рис. 2. Поверхностные напряжения в пьезорезисторе

Ток, I сонаправлен с напряжением σ_l . В этом случае, изменение удельного сопротивления будет описываться тремя пьезорезистивными коэффициентами и соответствующими напряжениями:

π_l – коэффициент, описывающий влияние продольной нагрузки (коэффициент пьезорезистивности в перпендикулярном направлении), σ_l – напряжение, приложенное в том же направлении, вдоль которого течет ток.

π_t – коэффициент, описывающий влияние поперечной нагрузки (коэффициент пьезорезистивности в продольном направлении), σ_t – напряжение, перпендикулярное направлению течения тока

π_s – коэффициент, описывающий влияние касательной нагрузки, σ_s .

Типовые значения продольных, поперечных и касательных пьезорезистивных коэффициентов для резистора, ориентированного вдоль направления $\langle 110 \rangle$ на кремниевой подложке с ориентацией кристаллической плоскости (001) приведены в табл. 1.

Таблица 1 Значения пьезокоэффициентов

π	p - тип
$\pi_l(10^{-11} \text{ Па}^{-1})$	+40.5
$\pi_t(10^{-11} \text{ Па}^{-1})$	-38.5
$\pi_s(10^{-11} \text{ Па}^{-1})$	0

Учитывая приведенные выше определения, изменения удельного сопротивления выглядит следующим образом

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta R}{R_0} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_s \sigma_s \quad (7)$$

В случае, когда резисторы на диафрагме ориентированы вдоль направления $\langle 110 \rangle$ как на рис. 2, $\pi_s = 0$. Тогда

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_s \sigma_s = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (8)$$

Пример расчета

Рассчитаем относительные изменения сопротивлений пьезорезисторов p-типа, расположенных параллельно и перпендикулярно к краям диафрагмы для случая, когда длина диафрагмы $L = 1$ мм и толщина диафрагмы $H = 10$ мкм.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]_{//} &= \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_r = \\ &= 40,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,115 \cdot \left[\frac{1000}{10} \right]^2 P - 38,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,294 \cdot \left[\frac{1000}{10} \right]^2 P = \\ &= -6,6 \cdot 10^{-7} \cdot P \text{ (МПа}^{-1}\text{)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]_{\perp} &= \pi_l \sigma_r + \pi_t \sigma_t = \\ &= 40,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,294 \cdot \left[\frac{1000}{10} \right]^2 P - 38,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,115 \cdot \left[\frac{1000}{10} \right]^2 P = \\ &= 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot P \text{ (МПа}^{-1}\text{)} \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что для выбранной схемы размещения резисторов изменения сопротивлений продольных и поперечных резисторов будут близкими по абсолютным значениям, но иметь противоположные знаки, увеличивая разбалансировку мостовой схемы.

Заключение

При возникновении напряжений пьезоэффект в кремнии существенно превышает тензоэффект, т. е. приращение сопротивления за счет изменения удельного сопротивления значительно больше приращения сопротивления за счет изменения за счет геометрии.

Это позволяет при малых габаритах кремниевой упругой мембраны получить очень высокую чувствительность измерительного элемента. На этом принципе основаны, в частности, кремниевые микродатчики давления.

Отметим, что максимальный выходной сигнал получается в том случае, когда изменения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и R_3 , R_4 противоположны по знаку. Чтобы это обеспечить, в конструкции мостовой схемы микродатчика резисторы R_1 , R_2 и R_3 , R_4 направлены параллельно и перпендикулярно краям диафрагмы соответственно.

Значения продольных и поперечных пьезорезистивных коэффициентов близки по абсолютным значениям, но имеют противоположные знаки. При этом изменения сопротивления продольных и поперечных резисторов будут иметь такие же знаки, увеличивая разбалансировку мостовой схемы.