

УДК 621.3.032

*И. Н. Баринов, В. С. Волков*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ МЕЗА-ТИПА В ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

*I. N. Barinov, V. S. Volkov*

### USING STRAIN GAUGES POLIKREMNIYEH-TYPE IN MESA PRESSURE SENSORS FOR THE MANAGEMENT AND CONTROL SYSTEMS

**А н н о т а ц и я.** Рассмотрено применение поликремниевых тензорезисторов меза-типа для создания датчиков давления. Предложена конструкция чувствительного элемента, позволяющая улучшить характеристики датчиков давления.

**А b s t r a c t.** The article describes use of polycrystalline silicon mesa strain gages for pressure sensors. The new sensor element construction, improving characteristics, is described.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** датчик давления, тензорезистор, поликристаллический кремний, мезаструктура.

**К e y w o r d s:** pressure sensor, strain gauge, polycrystalline silicon, mesa structure.

Тензорезисторы являются важнейшими компонентами современных интегральных схем и микросистем. Основные тенденции микроэлектроники – применение структур с диэлектрической изоляцией и уменьшение геометрических размеров – накладывают ограничения на применение чувствительных элементов датчиков давления с поликремниевыми тензорезисторами. Передача деформации с упругого элемента на тензорезистивный слой в структуре «поликремний-диэлектрик-кремний», используемой для создания современных высокотемпературных датчиков давления, характеризуется рядом особенностей, а сам тензорезистор представляет мезаструктуру, что принципиально отличает его от обычного тензорезистора, изолированного от подложки ( $p-n$ )-переходами [1, 2].

На рис. 1 приведена структура мезатензорезистора с диэлектрической изоляцией [3, 4]. Смещения точек диэлектрика линейно зависят от расстояния до поверхности кремниевого упругого элемента. Модули Юнга поликремния  $E_2 \approx 1,6 \cdot 10^{11}$  Па и двуокиси кремния  $E_1 \approx 0,7 \cdot 10^{11}$  Па отличаются более чем в два раза [1], поэтому принимается допущение, что благодаря большей жесткости кремния смещения точек тензорезистора постоянны по его сечению, что упрощает анализ.

При деформации кремниевого упругого элемента перемещения точек рассматриваемой системы можно записать в виде

$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 + \beta x_3, \quad h \leq x_3 \leq H; \\ U_2 &= U_0 + \beta h, \quad h \leq x_3 \leq H, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_0$  – перемещение точек упругого элемента ( $x_3 = 0$ );  $\beta$  – коэффициент, описывающий сдвиговые перемещения;  $h$  – толщина слоя диэлектрической изоляции;  $H$  – высота мезатензорезистора.

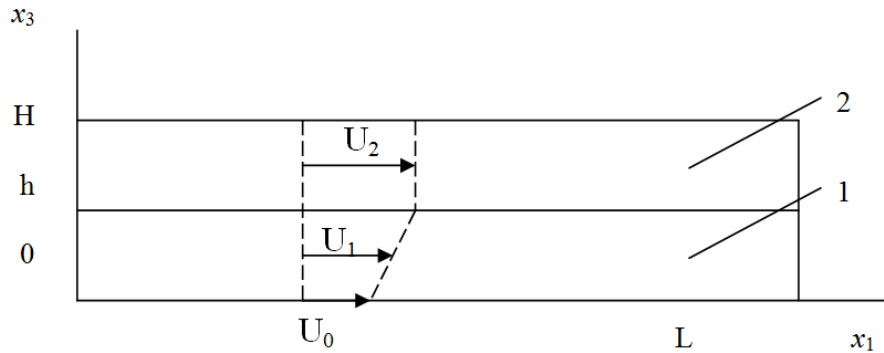


Рис. 1. Структура тензорезистора с диэлектрической изоляцией ( $L$  – длина тензорезистора,  $x_3$  – ордината, по которой отложены высоты слоя двуокиси кремния и слоя поликремния): 1 – диэлектрическая изоляция; 2 – тензорезистор

С учетом (1) компоненты матрицы деформации в плоскости  $x_1x_3$  принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1^{(1)} &\equiv \varepsilon_{11}^{(1)} = \frac{dU_0}{dx_1} + x_3 \frac{d\beta}{dx_1}; \\ \varepsilon_5^{(1)} &= 2\varepsilon_{13} = \beta, \quad 0 \leq x_3 \leq h; \\ \varepsilon_1^{(2)} &= \frac{dU_0}{dx_1} + h \frac{d\beta}{dx_1}; \\ \varepsilon_5^{(2)} &= 0, \quad h \leq x_3 \leq H,\end{aligned}\quad (2)$$

где индексы (1) и (2) соответствуют областям рис. 1 [3, 4].

В случае однородной деформации упругого элемента  $U_{x_1}' = \varepsilon_0 = \text{const}$  вдоль всего тензорезистора. Деформации в диэлектрическом подслое определяются выражениями

$$\varepsilon_1^{(1)} = \varepsilon_0 \left[ 1 - x_3 \gamma \left( \frac{1 - \text{ch}\lambda L}{\text{sh}\lambda L} \cdot \text{sh}\lambda x + \text{ch}\lambda x \right) \right]; \quad (3)$$

$$\varepsilon_5^{(1)} = -\varepsilon_0 \frac{\gamma}{\lambda} \left[ \frac{1 - \text{ch}\lambda L}{\text{sh}\lambda L} \cdot \text{ch}\lambda x + \text{sh}\lambda x \right], \quad (4)$$

где  $\lambda = \frac{1}{h\sqrt{2(1+\nu_1)\Delta}}$ ;  $\Delta = \frac{1}{3} + \frac{H-h}{h} \frac{E_1}{E_2}$ ;  $\gamma = \frac{1}{h} \left( 1 + \frac{1}{6\Delta} \right)$ ;  $\nu_1$  – коэффициент Пуассона для слоя диэлектрической изоляции;  $E_1$  и  $E_2$  – модули Юнга двуокиси кремния и поликремния соответственно [3, 4].

В слое поликремния (2) сдвиговая деформация  $\varepsilon_5^{(2)} = 0$ , а  $\varepsilon_1^{(2)}$  получается из (3), если положить  $x_3 = h$ .

В случае линейного распределения деформация упругого элемента неоднородна и изменяется в подложке вдоль тензорезистора по закону

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + kx_1), \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент, описывающий градиент деформации в пределах тензорезистора.

Неоднородность деформации приводит к появлению дополнительного слагаемого в функции, учитывающей влияние геометрии структуры:

$$\varepsilon_1^{(2)} = \varepsilon_{01} \left\{ (1 + kx_1) - h\gamma \left[ \frac{((1 + kL) - \text{ch}(\lambda L)) \text{sh}(x_1)}{\text{sh}(\lambda L)} \right] + \text{ch}(\lambda x_1) \right\}. \quad (6)$$

При однородной деформации подложки ( $\varepsilon_0 = \text{const}$ ) при  $x_1 = 0$  и  $x_1 = L$  деформации на границах слоя 2 равны

$$\varepsilon_{|x=0,L} = \varepsilon_0(1 - \gamma h). \quad (7)$$

Произведение  $\gamma h$  определяется соотношением толщин тензорезистивного слоя и диэлектрической подложки и их модулей Юнга:

$$\gamma h = \left( \frac{H-h}{h} \cdot \frac{E_2}{E_1} + \frac{1}{2} \right) \left( \frac{H-h}{h} \cdot \frac{E_2}{E_1} + \frac{1}{3} \right)^{-1}.$$

Для рассматриваемой структуры оно близко к единице, оставаясь, однако, больше нее. Если толщины тензорезистивного слоя поликремния и слоя  $\text{SiO}_2$  одинаковы, то (учитывая приведенные значения модулей Юнга,  $\gamma h = 1,064$  и вблизи краев) тензорезистивный слой имеет противоположный знак деформации, чем в другой подложке. Это является следствием учета сдвиговых деформаций в диэлектрическом слое 1. Наибольшего значения деформация достигает в центре тензорезистора при  $x_1 = 0,5L$ :

$$\varepsilon_{|x=L/2} = \varepsilon_0 \left( 1 - \gamma h \frac{1}{\text{ch}(\gamma L / 2)} \right). \quad (8)$$

Распределения деформации при различных размерах тензорезистивного слоя вдоль оси  $x_1$  приведены на рис. 2 [3, 4], где  $H = 0,9$  мкм,  $h = 0,4$  мкм, длина резистора 1 – 5 мкм, 2 – 10 мкм, 3 – 15 мкм.

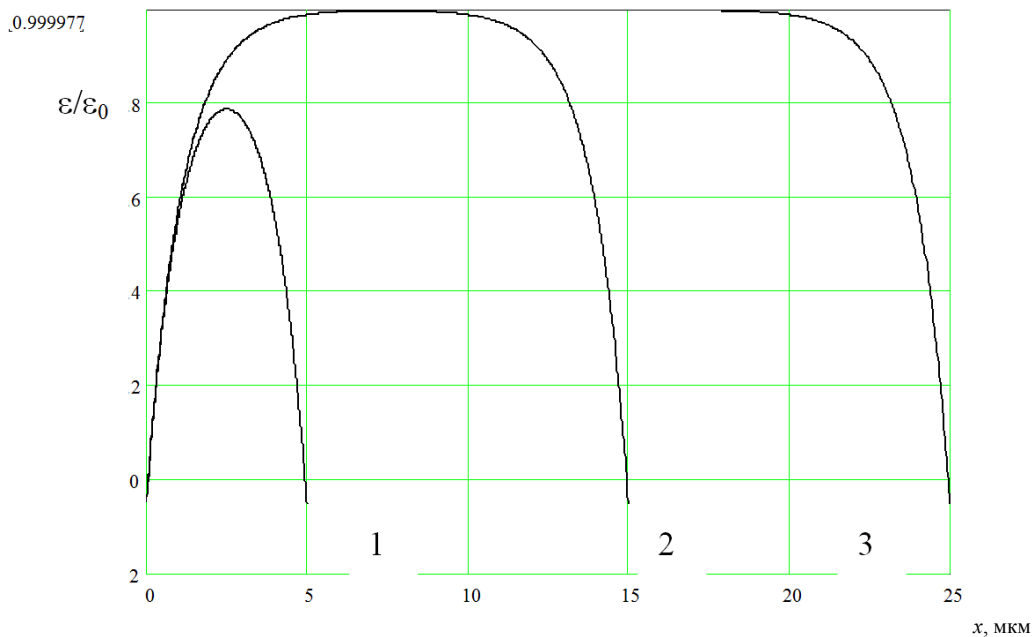


Рис. 2. Распределение относительной деформации в резисторах в зависимости от координаты

При  $\gamma L \gg 1$   $\varepsilon = \varepsilon_0$ , однако уменьшение  $\gamma L$  приводит и к понижению максимальной деформации поликремниевого слоя. При  $\gamma L = 1$  и  $\gamma h = 1,064$  получаем  $\varepsilon_{|x=L/2} = 5...6 \cdot 10^{-2} \varepsilon_0$ .

Экспериментальные исследования продольного и поперечного коэффициентов тензочувствительностей тензорезисторов были проведены на тестовых элементах в виде консольных балок, имеющих линейные размеры  $22 \times 6 \times 0,38$  мм. Толщины слоев двуокиси кремния и поликремния равнялись соответственно 0,4 мкм и 0,5 мкм. Двуокись кремния получалась термическим окислением кремниевых пластин. Линейные размеры тензорезисторов приведены в табл. 1 [3, 4].

Линейные размеры тензорезисторов

Ширина резистора, мкм	7,9	10,4	18,8	50	77
Длина резистора, мкм	117	98	98	104	156

Средние деформации продольного резистора, расположенного вдоль длинной оси консольной балки, определены:

– вдоль резистора:

$$\varepsilon_1^{(L)} = \frac{1}{L} \cdot \varepsilon_{01}^{(L)} \int_L f_i(x_1) dx_1;$$

– поперек резистора:

$$\varepsilon_2^{(L)} = \frac{1}{b} \cdot \varepsilon_{02}^{(L)} \int_b f_i(x_1) dx_1,$$

где  $\varepsilon_{01}^{(L)}$ ,  $\varepsilon_{02}^{(L)}$  – деформации подложки вдоль и поперек балки под продольным резистором.

Тогда относительное изменение сопротивления продольного и поперечного резисторов может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_L}{R} &= K_L \cdot \varepsilon_1^{(L)} + K_t \cdot \varepsilon_2^{(L)}; \\ \frac{\Delta R_t}{R} &= K_L \cdot \varepsilon_2^{(t)} + K_t \cdot \varepsilon_1^{(t)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $K_L$  – продольный коэффициент тензочувствительности.

Из (9) получим выражение для продольного коэффициента тензочувствительности:

$$K_L = \frac{\left( \frac{\Delta R_L}{R} \varepsilon_1^{(t)} - \frac{\Delta R_t}{R} \varepsilon_2^{(L)} \right)}{\left( \varepsilon_1^{(L)} \varepsilon_1^{(t)} - \varepsilon_2^{(L)} \varepsilon_2^{(t)} \right)}. \quad (10)$$

На рис. 3 приведена расчетная зависимость отношений продольного и поперечного коэффициентов тензочувствительности к их максимальным значениям в зависимости от отношения длины и ширины тензорезистора к его высоте [3, 4].

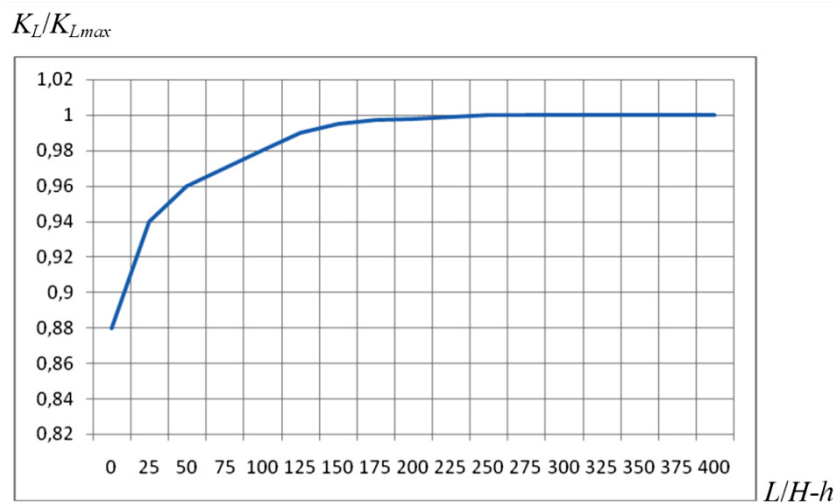


Рис. 3. Зависимость отношения продольного коэффициента тензочувствительности к его максимальному значению как функция отношения длины резистора к его толщине, расчет по формулам (6), (10)

Таким образом, учет нормальных и сдвиговых деформаций в случае поликремниевого тензорезистивного слоя и диэлектрической подложки из  $\text{SiO}_2$  приводит к появлению на концах тензорезистора зон деформации, противоположных по знаку деформации упругого элемента. При размерах тензорезистора  $\lambda L \approx 1$  наступает резкое уменьшение тензочувствительности. Этот эффект наиболее существен для тангенциальных тензорезисторов, у которых главную роль играет поперечный размер.

Следовательно, чувствительность тензопреобразователя меньше максимально возможной из-за неполной передачи деформации от подложки к тензорезисторам, выполненным в виде структур меза-типа, что приводит к снижению выходного сигнала при максимальном давлении и появлению дополнительной погрешности выходного сигнала, возникающей вследствие уменьшения тензочувствительности тангенциальных тензорезисторов.

Для устранения вышеизложенных недостатков разработана конструкция, представленная на рис. 4 [5].

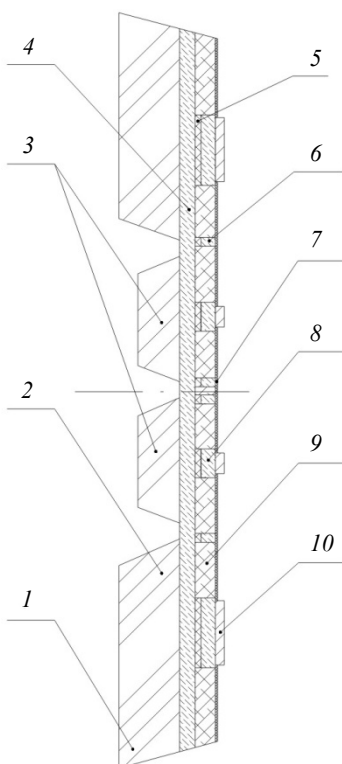


Рис. 4. Конструкция преобразователя давления с тензорезисторами меза-типа:

1 – чувствительный элемент из кремния; 2 – утолщенное периферийное основание; 3 – профиль мембраны, содержащий жесткие центры; 4 – мембрана; 5, 7 – слой двуокиси кремния; 6 – тензорезисторы; 8 – коммутационные шины; 9 – слой нелегированного поликристаллического кремния вокруг тензорезисторов; 10 – контактные площадки

Измеряемое давление, воздействуя на мембрану с жестким центром, через слои двуокиси кремния и нелегированного поликристаллического кремния деформирует тензорезисторы и увеличивает разбаланс мостовой схемы, в которую замкнуты тензорезисторы.

Слой двуокиси кремния 5 (см. рис. 4) расположен только под тензорезисторами и коммутационными шинами. Это позволяет снизить уровень механических напряжений за счет уменьшения не менее чем в 5 раз площади соприкосновения двух материалов с различными коэффициентами термического расширения (двуокиси кремния и высоколегированного бором слоя кремния). Коэффициент термического расширения двуокиси кремния равен  $k_{\text{SiO}_2} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а для высоколегированного бором слоя кремния  $k_{p+Si} \approx k_{Si} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [6, 7]. Учитывая, что в традиционных конструкциях чувствительных элементов слои занимают эквивалентную площадь

и непосредственно соприкасаются друг с другом, при работе в широком диапазоне температур (от минус 70 до 300 °С) будут иметь место значительные механические напряжения, вызванные, помимо различия коэффициентов термического расширения двуокиси кремния и высоколегированного слоя кремния, усадочными явлениями материалов этих слоев, несовершенством проведения технологических процессов, неоднородностью пластической деформации, несоответствием параметров решетки слоев и т.д. [6].

В предложенной конструкции слой двуокиси кремния контактирует не более чем с 20 % площади высоколегированного слоя кремния, расположенного на мембране. Таким образом, предложенная конструкция позволяет снизить механические напряжения в мембране не менее чем в 5 раз, что приведет к повышению прочности мембраны в процессе эксплуатации преобразователя одновременно с обеспечением надежной электрической изоляции между тензорезисторами и подложкой.

Слой двуокиси кремния 7 выполняет защитную функцию.

Наличие вокруг тензорезисторов слоя из нелегированного поликремния позволит снизить эффект уменьшения тензочувствительности тензорезисторов меза-типа из-за неполной передачи деформации от подложки к тензорезистору, т.е. повысить чувствительность преобразователя, так как деформация от мембраны будет полностью передаваться тензорезисторам через слой поликристаллического кремния.

Таким образом, предложенная конструкция позволяет улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики преобразователя давления: увеличить чувствительность, снизить температурную погрешность и повысить надежность, что отвечает современным требованиям, предъявляемым к датчикам давлений [8].

#### Список литературы

1. Гридчин, В. А. Проектирование кремниевых интегральных тензопреобразователей с квадратными упругими элементами / В. А. Гридчин // Сборник научных трудов НЭТИ. – Новосибирск, 1985. – С. 97.
2. Баринов, И. Н. Применение поликристаллического алмаза в качестве чувствительного элемента / И. Н. Баринов, В. Ю. Дарвин // Отраслевые аспекты технических наук. – 2012. – № 5. – С. 21–23.
3. Любимский, В. М. Особенности деформации резистора в виде мезаструктуры / В. М. Любимский // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 2. – С. 47–53.
4. Исследование конструктивно-технологических решений для создания высокостабильных и высокотемпературных датчиков давления : отчет о НИР / В. М. Любимский, В. А. Гридчин, А. В. Шапорин, В. А. Колчужин, А. В. Гридчин, О. В. Лобач, А. П. Лисофенко, В. П. Юрьев, Н. А. Усова ; Новосиб. гос. техн. ун-т ; рук. В. А. Гридчин. – Новосибирск, 2006. – 106 с.
5. Сергеев, В. С. Напряжения и деформации в элементах микросхем / В. С. Сергеев, О. А. Кузнецов, Н. П. Захаров, В. А. Летагин. – М. : Радио и связь, 1987. – 88 с.
6. Концевой, Ю. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов. – М. : Радио и связь, 1982. – 240 с.
7. Палатник, Л. С. Материаловедение в микроэлектронике / Л. С. Палатник, В. К. Сорокин. – М. : Энергия, 1978. – 280 с.
8. Пат. 2310176 Российская Федерация. Полупроводниковый преобразователь давления / Баринов И. Н., Козин С. А., Цибизов П. Н.

**Баринов Илья Николаевич**

кандидат технических наук,  
начальник отдела,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
E-mail: mzungu@inbox.ru

**Barinov I'ya Nikolaevich**

candidate of technical sciences,  
head of department,  
Research Institute  
of Physical Measurements

**Волков Вадим Сергеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
E-mail: distortions@rambler.ru

**Volkov Vadim Sergeevich**

candidate of technical sciences,  
senior staff scientist,  
Research Institute  
of Physical Measurements

---

УДК 621.3.032

**Баринов, И. Н.**

**Использование тензорезисторов меза-типа в датчиках давления для систем управления и контроля** / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1(3). – С. 9–15.