

06;12

## Оптимизация параметров чувствительного элемента кремниевого преобразователя давления на основе двухстоковых МДП тензотранзисторов

© Г.Г. Бабичев, С.И. Козловский, В.А. Романов, Н.Н. Шаран

Институт физики полупроводников НАН Украины,  
252650 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 18 апреля 2000 г.)

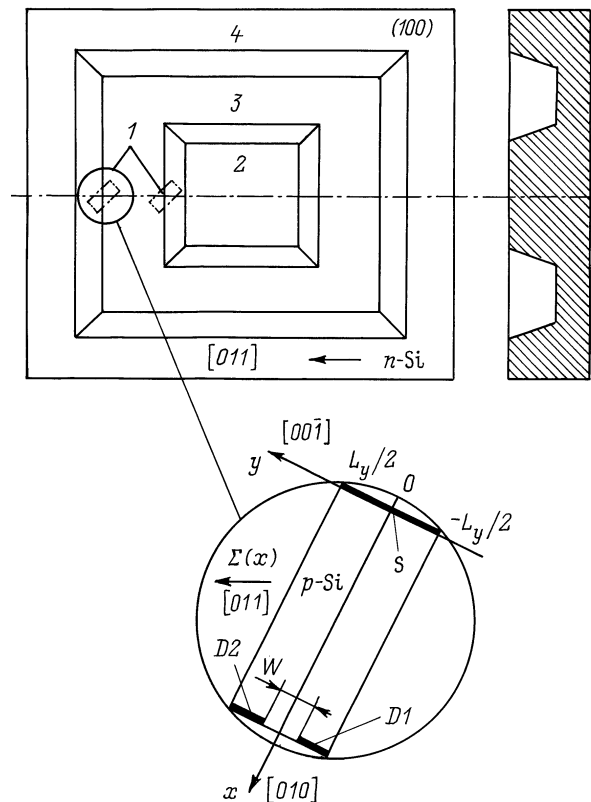
Приведены результаты исследования интегрального преобразователя давления с дифференциальным чувствительным элементом, состоящим из двух параллельно соединенных  $p$ -канальных двухстоковых МДП тензотранзисторов. Тензотранзисторы располагаются на планарной стороне кремниевой мембраны с жестким центром вблизи краев ее тонкой части (долины). Определена оптимальная топология преобразователя, а также рассчитаны его основные характеристики.

Непрерывно растущая потребность в полупроводниковых преобразователях давления [1] стимулирует поиск новых типов чувствительных элементов с высокой чувствительностью, низкими токопотреблением и уровнем собственных шумов. В предыдущей работе [2] нами проведены исследования чувствительных элементов преобразователей давления на основе кремниевых двухстоковых полевых тензотранзисторов. Была рассмотрена ситуация, когда одноосная упругая механическая деформация в области расположения полевого транзистора однородна.

В настоящей работе исследован более общий случай, когда одноосное упругое механическое напряжение линейно изменяется по длине канала МДП тензотранзистора. Такого рода пространственное распределение упругой деформации возникает в долине профилированной мембраны с жестким центром при ее нагружении. Как показано ранее [3,4], эта мембрана в сочетании с дифференциальной конструкцией чувствительного элемента позволяет не только уменьшить влияние "паразитных" механических напряжений, возникающих при сборке, корпусировании преобразователя давления, но и достичь высокой линейности выходной характеристики прежде всего у высокочувствительных преобразователей с малой толщиной мембраны, когда при нагружении мембраны величина прогиба становится сравнимой с ее толщиной.

Ниже мы проведем оптимизацию топологии преобразователя давления с дифференциальным чувствительным элементом, состоящим из двух параллельно соединенных  $p$ -канальных двухстоковых МДП тензотранзисторов. Эскизный набросок кремниевой мембраны и кристаллографическая ориентация каналов тензотранзисторов показаны на рис. 1. Тензотранзисторы располагаются на планарной стороне мембраны вблизи краев тонкой части (долины). В условиях равномерного нагружения мембраны, а также при симметричном расположении тензотранзисторов относительно плоскости, проходящей через центр долины, параллельно краям и перпендикулярно ее плоскости, упругие механические напряжения в местах расположения тензотранзисторов равны по величине и противоположны по знаку [3,4].

На рис. 2 показаны топология и схема включения чувствительного элемента преобразователя давления. При отсутствии давления и наличии соответствующих напряжений смещения ( $U_0$ ,  $U_G$ ) в силу идентичности топологий и геометрических размеров тензотранзисторов  $T_1$  и  $T_2$  их токи стоков равны между собой и величина выходного сигнала  $U_{out}$  (рис. 2) при равенстве сопротивлений нагрузки  $R_{D1} = R_{D2} = R_D$  равна нулю.



**Рис. 1.** Расположение и кристаллографическая ориентация чувствительного элемента на мембране: 1 — двухстоковые МДП тензотранзисторы ( $S$  — исток,  $D1$  и  $D2$  — стоки), 2 — жесткий островок, 3 — долина, 4 — основание мембраны.

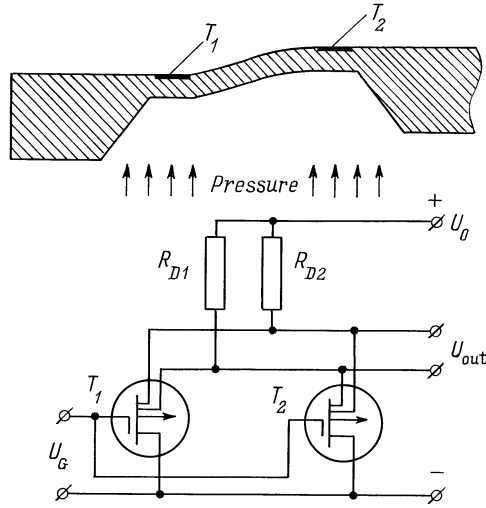


Рис. 2. Топология и схема включения тензотранзисторов.

При подаче давления мембрана преобразует распределенную по поверхности нагрузку в одноосную упругую деформацию растяжения (сжатия) тех ее областей, где расположены тензотранзисторы. Вследствие этого подвижность основных носителей заряда — дырок  $\mu_p$  становится анизотропной и в канале полевого тензотранзистора возникают дополнительные, наведенные деформацией поперечное и продольное электрические поля [2], обуславливающие разбаланс токов в цепях стоков тензотранзисторов и появление выходного сигнала.

Ниже проведены расчеты наведенного деформацией изменения потенциала в канале МДП тензотранзистора и на его основе характеристик преобразователя — относительной  $S_R$  (эффективности преобразования) и абсолютной  $S_A$  чувствительностей.

Ограничим канал МДП тензотранзистора координатами (рис. 2)

$$0 \leq x \leq L_x, \quad -L_y/2 \leq y \leq L_y/2, \quad 0 \leq z \leq L_z. \quad (1)$$

Расчет потенциала проведем при следующих предположениях и упрощениях: 1) анизотропия проводимости в  $x$ -плоскости наведена одноосным упругим механическим напряжением  $\Sigma$ , ориентированным вдоль кристаллографического направления [110] (рис. 1), причем зависимость величины  $\Sigma(x)$  от координаты  $x$  имеет вид [3,4]

$$\Sigma(x) = \Sigma_0(k_0 + k_1x/L_x), \quad (2)$$

где  $|k_0|, |k_1| \leq 1$  и  $k_0\Sigma_0$  — механическое напряжение в точках  $x = 0$ ; 2) величины упругих механических напряжений и параметра анизотропии [2]

$$a(x) = \Pi_{44}\Sigma_0(k_0 + k_1x/L_x)/2 = a_0(k_0 + k_1x/L_x) \quad (3)$$

( $\Pi_{44}$  — сдвиговый пьезорезистивный коэффициент для  $p$ -Si) достаточно малы, так что справедливо неравенство  $\max |a(x)| \ll 1$  (в расчетах величину  $a_0$  мы будем

полагать равной 0.06) и компоненты тензора электропроводности могут быть записаны следующим образом:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} \cong \sigma(x), \quad \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma(x)a_x; \quad (4)$$

3) канал тензотранзистора достаточно тонкий ( $L_x, L_y \gg L_z$ ) и его проводимость в приближении плавной аппроксимации [5,6] описывается выражением

$$\sigma(x) = \frac{\mu_p C}{L_z} \sqrt{(U_C - U_G)^2 - 2 \left( U_C - U_G - \frac{U_{DS}}{2} \right) \frac{U_{DS} x}{L_x}}, \quad (5)$$

где  $C$  — емкость единицы площади системы полевой электрод–полупроводник;  $U_{DS}$  — разность потенциалов между истоком и стоком;  $U_C$  — напряжение отсечки (напряжение на затворе, при котором проводимость канала равна нулю);  $U_G$  — напряжение на затворе, причем  $U_{DS} < U_C - U_G$  ( $U_{DS}, U_C, U_G > 0$ ) и канал тензотранзистора открыт.

С учетом изложенных выше упрощений распределение потенциала в канале тензотранзистора  $\varphi(x, y)$  можно считать квазиплоским и в первом приближении по величине параметра анизотропии пространственное распределение потенциала описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial \ln(\sigma(x))}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

с граничными условиями при

$$y = \pm \frac{L_y}{2} \quad a(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

$$x = 0, L_x \quad \varphi(0, y) = 0, \quad \varphi(L_x, y) = U_{DS}. \quad (8)$$

Решение задачи (6)–(8) находим, используя метод Фурье

$$\varphi(x, y) = U_C - U_G$$

$$- \sqrt{(U_C - U_G)^2 - 2 \left( U_C - U_G - \frac{U_{DS}}{2} \right) \frac{U_{DS} x}{L_x}} + \Phi(x, y), \quad (9)$$

где

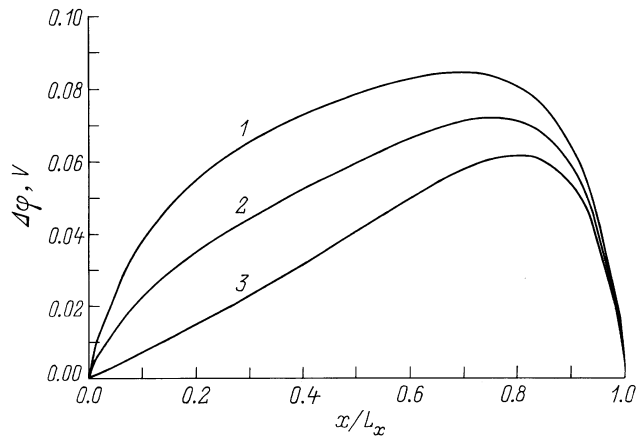
$$\Phi(x, y) = \frac{2a_0}{\pi} \left( U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2(U_C - U_G)} \right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n(k, U_C, U_G, U_{DS})}{n \operatorname{ch}(\pi n L_y / 2 L_x)} \operatorname{sh} \left( \frac{\pi n y}{L_y} \right) \sin \left( \frac{\pi n x}{L_x} \right), \quad (10)$$

$$F_n(k, U_C, U_G, U_{DS})$$

$$= \int_0^1 \frac{(k_0 + k_1 z) \sin(\pi n z)}{\sqrt{1 - [2(U_C - U_G) - U_{DS}] U_{DS} z / (U_C - U_G)^2}} dz. \quad (11)$$

На рис. 3 показаны распределения поперечной разности потенциалов  $\Delta\varphi(x)$  вдоль канала при различных видах зависимости параметра анизотропии от координаты  $x$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(x) &= \varphi(x, L_y/2) - \varphi(x, -L_y/2) \\ &= \Phi(x, L_y/2) - \Phi(x, -L_y/2). \end{aligned} \quad (12)$$



**Рис. 3.** Распределение поперечной разности потенциалов вдоль канала тензотранзистора.  $U_{DS} = 3 \text{ V}$ ,  $U_C - U_G = 5 \text{ V}$  при различных видах продольной зависимости параметра анизотропии  $a(x) = a_0(k_0 + k_1x/L_x)$ : 1 —  $k_0 = 1$ ,  $k_1 = 0$ ; 2 —  $k_0 = 0$ ,  $k_1 = 1$ ; 3 —  $k_0 = k_1 = 0.5$ .

Как видно, характер пространственного распределения параметра анизотропии существенным образом влияет на продольное распределение разности потенциалов  $\Delta\varphi(x)$ . Заметим, что задача, аналогичная (6)–(8), была решена численно для случая, когда анизотропия проводимости создавалась внешним магнитным полем. Полученная нами зависимость  $\Delta\varphi(x)$  для однородной деформации ( $k_0 \neq 0$ ,  $k_1 = 0$ ) хорошо согласуется с результатами численного расчета продольного распределения холловской разности потенциалов в канале МДП магнитотранзистора [7].

Далее рассчитаем величины эффективности преобразования  $S_R$  и абсолютной чувствительности  $S_A$  датчика давления. Будем полагать, что стоки  $D1$ ,  $D2$  разделены промежутком  $W$  (рис. 1) и имеют одинаковую ширину  $L_D = (L_y - W)/2$ . Величины  $S_A$  и  $S_R$  находим интегрированием [2]

$$S_A = 2C\mu_p R_D (U_C - U_G - U_{DS}) \int_{-L_y/2}^{-W/2} \frac{\partial\Phi}{\partial x}(L_x, y) dy, \quad (13)$$

$$S_R = C\mu_p \frac{(U_C - U_G - U_{DS})}{2I_D^0} \int_{-L_y/2}^{-W/2} \frac{\partial\Phi}{\partial x}(L_x, y) dy. \quad (14)$$

Здесь  $I_{D1}^0 = I_{D2}^0 = I_D^0$  — токи стоков транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  в отсутствие деформации

$$I_D^0 = \mu_p C \frac{L_D}{L_x} \left( U_C - U_G - \frac{U_{DS}}{2} \right) U_{DS}. \quad (15)$$

Интегрируя (13) и (14) с учетом (10), (11), получаем следующие выражения для значений  $S_R$  и  $S_A$ :

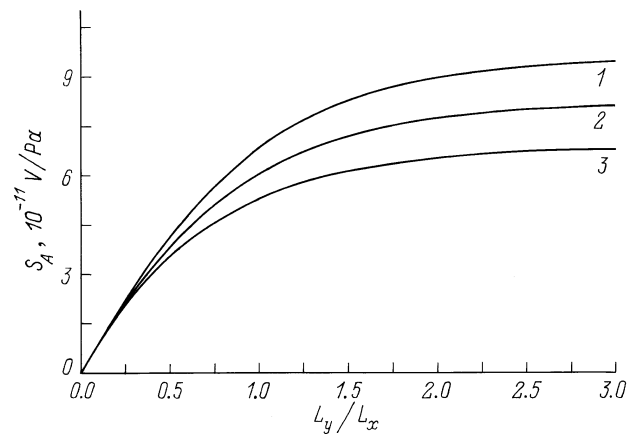
$$S_R = \frac{\Pi_{44}}{2} \frac{(U_C - U_G - U_{DS})L_x}{(U_C - U_G)L_D} \Psi, \quad (16)$$

$$S_A = 2\Pi_{44}I_D^0 R_D \frac{(U_C - U_G - U_{DS})L_x}{(U_C - U_G)L_D} \Psi, \quad (17)$$

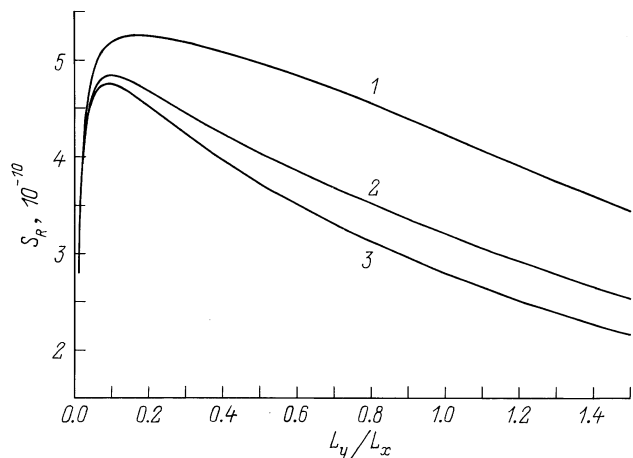
где

$$\Psi = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n F_n(k, U_C, U_G, U_{DS})}{n} \times \left[ \frac{\text{ch}(\pi n W / 2L_x)}{\text{ch}(\pi n L_y / 2L_x)} - 1 \right]. \quad (18)$$

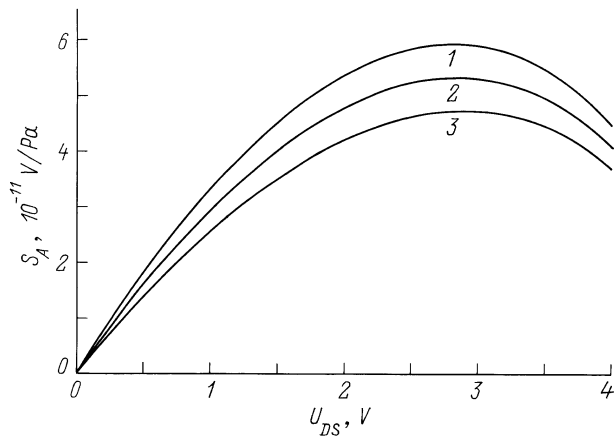
На рис. 4 и 5 показаны зависимости величин абсолютной и относительной чувствительностей тензотранзистора от геометрических размеров канала. Как видно из рис. 4, вид зависимости абсолютной чувствительности  $S_A$  от соотношения  $L_y/L_x$  при однородном и неоднородном распределениях механического напряжения практически не меняется; величина  $S_A$  монотонно растет и достигает насыщения при  $L_y/L_x \geq 2$ . Такой ход зависимости  $S_A(L_y/L_x)$  для случая  $k_1 = 0$  находится в согласии с аналогичной зависимостью для МДП магнитотранзистора, полученной на основе численных методов [7]. Особенностью зависимости относительной



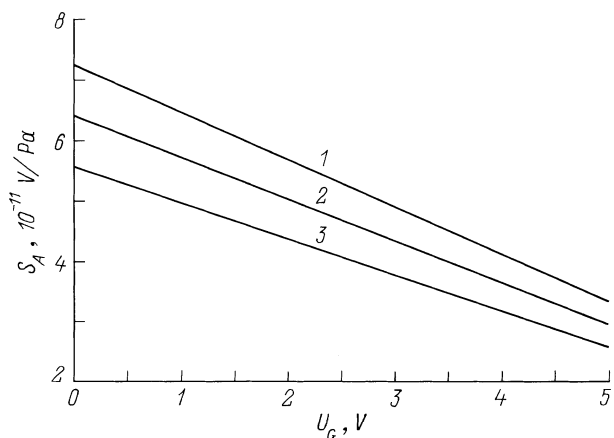
**Рис. 4.** Зависимость абсолютной чувствительности преобразователя от геометрических размеров канала. 1–3 — то же, что и на рис. 3.



**Рис. 5.** Зависимость относительной чувствительности преобразователя от геометрических размеров канала МДП тензотранзисторов. 1–3 — то же, что и на рис. 3.



**Рис. 6.** Зависимость абсолютной чувствительности преобразователя от напряжения исток–сток  $U_{DS}$  МДП тензотранзисторов.  $U_C - U_G = 5$  В.



**Рис. 7.** Зависимость абсолютной чувствительности преобразователя от напряжения на затворе  $U_G$ .  $U_C = 10$  В,  $U_{DS} = 3$  В.

чувствительности (рис. 5) от параметра  $L_y/L_x$  в неоднородном случае ( $k_1 \neq 0$ ) является наличие максимума при  $L_y/L_x = 0.1 \div 0.2$ . Представленные на рис. 4, 5 зависимости позволяют найти оптимальное соотношение  $L_y/L_x$ , при котором величины  $S_R$  и  $S_A$  максимальны.

На рис. 6, 7 представлены расчетные зависимости величин  $S_A$  от разности потенциалов между истоком и стоком  $U_{DS}$ , а также истоком и затвором  $U_G$ . Расчет выполнен для случая  $CR_D\mu_p = 10^{-2}$ . С ростом напряжения  $U_{DS}$  (рис. 6) абсолютная чувствительность линейно растет и достигает максимума при  $U_{DS} \approx (U_C - U_G)/2$ . Такой вид кривых 1–3 в значительной мере определяется зависимостью  $I_D^0(U_{DS})$  (выражения (15), (17)). С ростом значения  $U_G$  величина абсолютной чувствительности практически линейно уменьшается (рис. 7, кривые 1–3). Из формулы (16) следует, что величина относительной чувствительности практически не зависит от напряжений смещения тензотранзистора  $U_{DS}$  и  $U_G$ .

В заключение кратко остановимся на такой практически важной характеристике преобразователя давления,

как линейность нагрузочной характеристики. Как известно [3,4,8], причиной нелинейности в пьезорезистивных мембранных преобразователях могут быть нелинейность преобразования давления в упругую деформацию той области мембраны, где расположен чувствительный элемент, а также нелинейность пьезорезистивного эффекта. Результаты экспериментальных и теоретических исследований, изложенные в работах [3,4,8], позволяют сделать вывод, что нелинейность нагрузочной характеристики, обусловленная перечисленными выше причинами, в значительной степени ослабляется дифференциальной конструкцией чувствительного элемента преобразователя, когда при нагружении мембраны один из МДП тензотранзисторов находится в области сжатия, а другой — в области растяжения.

Таким образом, в сравнении с однотранзисторной конструкцией преобразователя давления [2] предлагаемая конструкция позволяет в два раза увеличить абсолютную чувствительность при повышенной линейности нагрузочной характеристики.

## Список литературы

- [1] Bryzek J. // Sensors and Actuators A. 1996. Vol. A56. P. 1–9.
- [2] Бабичев Г.Г., Козловский С.И., Романов В.А., Шаран Н.Н. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 10. С. 45–49.
- [3] Yasukawa A., Shimazoe M., Matsuoka Y. // IEEE Trans. on ED. 1989. Vol. ED-36. N 7. P. 1295–1302.
- [4] Nishihara M., Yamada K., Matsuoka Y. // Hitachi Rev. 1981. Vol. 30. N 6. P. 285–289.
- [5] Видулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
- [6] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.
- [7] Fry P.W., Hoey S.F. // IEEE Trans. on ED. 1969. Vol. ED-16. N 1. P. 35–39.
- [8] Suzuki K., Ishihara T., Hirata M., Tanigawa H. // IEEE Trans. on ED. 1987. Vol. ED-34. N 6. P. 1360–1367.