

## Кремниевые двухстоковые полевые тензотранзисторы

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

Институт физики полупроводников АН Украины,  
252650 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 3 сентября 1999 г.)

Приведены результаты исследования  $p$ -канальных полевых тензотранзисторов на основе кремния. Рассмотрены тензотранзисторы двух типов: МДП тензотранзистор и полевой тензотранзистор с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора. Тензотранзисторы относятся к тензочувствительным монополярным полупроводниковым приборам с горизонтальной структурой и внутренним дифференциальным выходом. Определена оптимальная топология приборов, а также рассчитаны их основные характеристики.

Одной из новейших технологий создания новых полупроводниковых приборов (электромеханических сенсорных и исполнительных микроконструкций) является интегральная технология создания микроэлектромеханических систем на основе кремния (MEMS technology) [1]. Интенсивное ее развитие стимулирует поиск новых типов тензочувствительных элементов.

Современные кремниевые интегральные тензочувствительные элементы с резистивным выходом можно разделить на две группы: "монополярные" и "биполярные", в которых выходной сигнал формируется при направленном движении соответственно основных и неосновных носителей заряда. К первой группе относятся тензочувствительные элементы на основе пьезорезистивного эффекта и на основе эффекта тензоэдс, ко второй — тензочувствительные элементы на основе биполярных тензотранзисторов [2,3]. Датчики с чувствительным элементом на основе биполярных тензотранзисторов обладают высоким уровнем выходного сигнала, высокой относительной чувствительностью, однако имеют значительно более по сравнению с "монополярными" датчиками токопотребление. Низкий уровень энергопотребления при достаточно высоком уровне выходного сигнала может быть получен в тензодатчиках с чувствительным элементом на основе полевого эффекта.

В настоящей работе мы рассмотрим принцип работы и проведем оптимизацию топологии полевых двухстоковых тензотранзисторов двух типов: МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) и тензотранзистора с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора. Подобно полевым транзисторам [4], полевые транзисторы должны обладать рядом важных преимуществ перед биполярными тензотранзисторами, среди них сравнительно малая зависимость параметров транзистора от температуры, малый уровень шума, а для полевых тензотранзисторов с  $p$ - $n$ -переходом характерна более высокая радиационная стойкость.

По аналогии с полевыми магнитотранзисторами чувствительный элемент интегрального тензодатчика на основе полевого тензотранзистора можно охарактеризовать двумя параметрами: абсолютной чувствительностью  $S_A$  и эффективностью преобразования, или относитель-

ной чувствительностью,  $S_R$  [5]

$$S_A = R_D \left| \frac{\partial(I_{D1} - I_{D2})}{\partial\sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (1)$$

$$S_R = (I_{D1} + I_{D2})^{-1} \left| \frac{\partial(I_{D1} - I_{D2})}{\partial\sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — механическое напряжение в области расположения тензотранзистора,  $I_{D1(D2)}$  — токи стоков  $D1$  и  $D2$  соответственно, величины нагрузочных сопротивлений в стоковых цепях транзисторов будем полагать одинаковыми  $R_{D1} = R_{D2} = R_D$ .

На рис. 1,2 показаны топологии (а) и схемы (b) включения полевых двухстоковых тензотранзисторов:  $p$ -канального обедненного МДП тензотранзистора (рис. 1) и  $p$ -канального полевого тензотранзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (рис. 2).

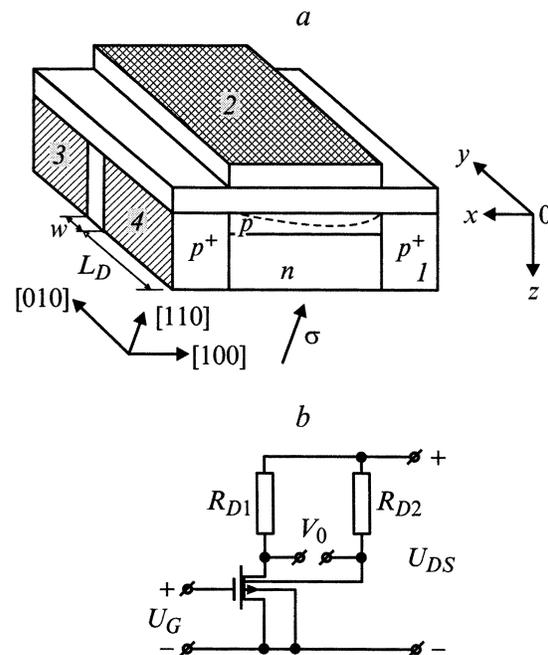
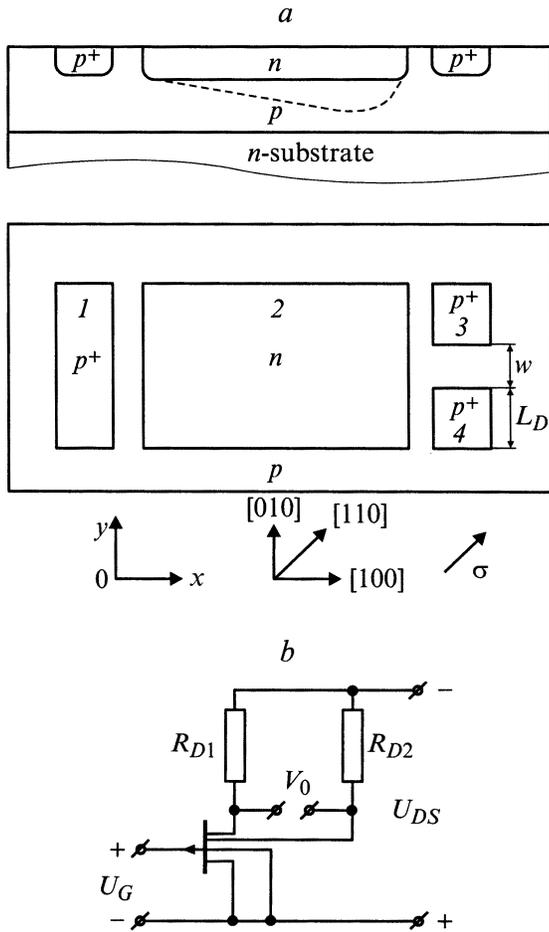


Рис. 1. Топология, схема включения и кристаллографическая ориентация двухстокового полевого МДП тензотранзистора: 1 — исток, 2 — затвор, 3, 4 — стоки.



**Рис. 2.** Топология, схема включения и кристаллографическая ориентация двухстокового полевого тензотранзистора с  $p-n$ -переходом в качестве затвора. 1–4 — то же, что и на рис. 1.

Будем полагать, что полевой тензотранзистор располагается в центре профилированной кремниевой мембраны, преобразующей равномерно распределенную по поверхности мембраны нагрузку в одноосную упругую деформацию растяжения (сжатия) ее центральной части в кристаллографическом направлении  $[110]$  [2].

Рассмотрим принцип работы полевых тензотранзисторов. При подаче соответствующих напряжений смещения ( $U_{DS}$ ,  $U_G$ ) дырки дрейфуют вдоль канала в продольном тянущем поле. В отсутствии деформации в силу зеркальной симметрии топологии тензотранзисторов относительно плоскости, проходящей через середину канала  $y = L_y/2$  перпендикулярно  $x$ -плоскости, токи стоков равны между собой  $I_{D1} = I_{D2} = I_D^0$  и величина выходного сигнала  $V_0$  (рис. 1, 2) при равенстве сопротивлений нагрузки  $R_{D1} = R_{D2} = R_D$  равна нулю.

При равномерном нагружении кремниевой мембраны подвижность основных носителей заряда — дырок становится анизотропной в  $x$ -плоскости и в канале полевого тензотранзистора возникают дополнительные, пропорциональные деформации, поперечное и продольное электрические поля (в  $y$ - и  $x$ -направлениях соответственно).

В стационарном случае обусловленная анизотропией подвижности поперечная разность потенциалов препятствует перераспределению плотности тока поперек канала. Поэтому практически значимое поперечное перераспределение плотности тока будет иметь место только вблизи стоков, где поперечная разность потенциалов закорачивается  $p^+$ -областями стоков. Следовательно, введенная деформацией анизотропия подвижности дырок в условиях закорачивания поперечной разности потенциалов будет приводить к перераспределению плотности тока поперек канала, разбалансу токов стоков и появлению выходного сигнала.

Принцип действия описываемых здесь полевых тензотранзисторов формально эквивалентен принципу действия многостокковых полевых магнитотранзисторов, у которых холловское поле обуславливает перераспределение тока между стоками [5,6].

Ограничим канал полевого транзистора координатами ( $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$ ;  $0 \leq z \leq L_z$ ), тогда величины тока стоков  $D1$  и  $D2$  полевого МДП тензотранзистора (рис. 1, а) можно записать в виде

$$I_{D1(D2)} = C\mu_p \int_{0(L_y-L_x)}^{L_D(L_y)} \frac{\partial U}{\partial x}(x = L_x, y) \times [U_C - U_G - U(x = L_x, y)] dy, \quad (3)$$

где  $C$  — емкость единицы площади системы полевой электрод–полупроводник;  $U_C$  — напряжение отсечки (напряжение на затворе, при котором проводимость канала равна нулю);  $U_G$  — потенциал затвора;  $U(x, y)$  — потенциал канала в точке с координатами  $x, y$ .

Аналогично для полевого тензотранзистора с  $p-n$ -переходом в качестве затвора (рис. 2, а) и однородно легированным каналом величина тока стока  $D1$  будет иметь вид

$$I_{D1(D2)} = \sigma_0 L_z \int_{0(L_y-L_D)}^{L_D(L_y)} \frac{\partial U}{\partial x}(x = L_x, y) \times \left[ 1 - \sqrt{\frac{U_G + U_i + U(x = L_x, y)}{U_C}} \right] dy. \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_0$  — удельная металлургическая проводимость канала,  $U_i$  — встроенный потенциал  $p-n$ -перехода,  $U_C$  — напряжение отсечки (перекрытия канала). В выражениях (4), (5) мы полагаем, что стоки  $D1$  и  $D2$  имеют одинаковую ширину  $L_D$  и отделены друг от друга промежутком  $W = L_y - 2L_D$ . При наличии деформации величину потенциала  $U(x, y)$  можно представить следующим образом:

$$U(x, y) = U_0(x) + a\Phi(x, y), \quad (5)$$

где  $U_0(x)$  — потенциал канала в точке  $x$  при отсутствии деформации;  $\Phi(x, y)$  — изменение потенциала в канале,

обусловленное упругой деформацией;  $a$  — параметр анизотропии [2,3].

В рассматриваемом случае параметр анизотропии  $a$  линейно связан с величиной упругого одноосного механического напряжения  $\sigma$  в области расположения полевого тензотранзистора соотношением [2]

$$a = \Pi_{44}\sigma/2, \quad (6)$$

где  $\Pi_{44}$  — сдвиговый пьезорезистивный коэффициент для  $p$ -Si.

Для практически достижимых значений упругой деформации величина  $a$  мала  $|a| \ll 1$  и справедливо неравенство

$$U_0(x) \gg |a\Phi(x, y)|. \quad (7)$$

Подставляя выражения (3)–(6) в (2), получаем следующие выражения для величин абсолютной чувствительности  $S_A$  и эффективности преобразования  $S_R$  МДП тензотранзистора:

$$S_A = \Pi_{44}C\mu_p R_D (U_C - U_G - U_{DS}) \int_0^{L_D} \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x = L_x, y) dy, \quad (8)$$

$$S_R = \Pi_{44}C\mu_p \frac{(U_C - U_G - U_{DS})}{2I_D^0} \int_0^{L_D} \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x = L_x, y) dy, \quad (9)$$

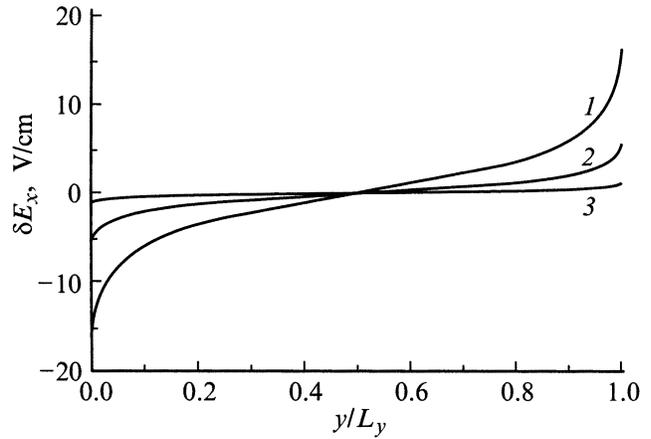
$$I_D^0 = \mu_p \frac{C}{2} \frac{L_y}{L_x} \left( U_C - U_G - \frac{U_{DS}}{2} \right) U_{DS}. \quad (10)$$

Здесь  $I_{D1}^0 = I_{D2}^0 = I_D^0$  — токи стоков в отсутствие деформации. Следует отметить, что формулы (8)–(10) также справедливы для МДП тензотранзистора с инверсным  $p$ -каналом при смене знаков напряжений  $U_C$  и  $U_G$ . Аналогичные выражения для полевого тензотранзистора с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора имеют вид

$$S_A = \Pi_{44}R_D\sigma_0L_z \left( 1 - \sqrt{(U_G + U_i + U_{DS})/U_C} \right) \times \int_0^{L_D} \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x = L_x, y) dy, \quad (11)$$

$$S_R = \frac{\Pi_{44}}{2} \sigma_0 L_z \frac{(1 - \sqrt{(U_G + U_i + U_{DS})/U_C})}{I_D^0} \times \int_0^{L_D} \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x = L_x, y) dy, \quad (12)$$

$$I_D^0 = \frac{L_z L_y}{2L_{xx}} \sigma_0 \left[ U_{DS} + \frac{2}{3} \frac{(U_G + U_i)^{3/2} - (U_G + U_i + U_{DS})^{3/2}}{\sqrt{U_C}} \right]. \quad (13)$$



**Рис. 3.** Поперечное распределение наведенного деформацией изменения продольной компоненты электрического поля в канале полевого тензотранзистора.  $L_y$ ,  $\mu\text{m}$ : 1 — 10, 2 — 30, 3 — 150;  $U_{DS} = 1\text{ V}$ ,  $a = 0.01$ ,  $L_x = 100\ \mu\text{m}$ .

Следовательно, задача нахождения значений абсолютной чувствительности  $S_A$  и эффективности преобразования  $S_R$  полевых тензотранзисторов сводится к нахождению величины изменения пространственного распределения потенциала  $a\Phi(x, y)$  в канале полевого тензотранзистора при наложении деформирующих усилий.

Рассмотрим предельные случаи однородного и неоднородного пространственного распределения электрического поля в канале тензотранзистора в отсутствие деформации.

1. Однородное распределение электрического поля в канале ( $\partial U_0/\partial x = \text{const}$ ). При однородных условиях в канале полевого тензотранзистора ( $|U_C - U_G| \gg |U_{DS}|, |U_i|$ ) величина  $\Phi(x, y)$  имеет вид [3]

$$\Phi(x, y) = U_{DS} \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[(-1)^n - 1]}{n^2} \times \sin(\pi n x/L_x) \frac{\text{sh}[\pi n(2y - L_y/2L_x)]}{\text{ch}(\pi n L_y/2L_x)}. \quad (14)$$

Используя выражение (14), можно легко вычислить обусловленное деформацией изменение продольного электрического поля вблизи стоков тензотранзисторов

$$\delta E_x(L_x, y) = -a \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x = L_x, y). \quad (15)$$

На рис. 3 представлена поперечная зависимость наведенного деформацией изменения продольного электрического поля  $\delta E_x(L_x, y)$ . Видно, что на участках  $0 \leq y \leq L_y/2$  и  $L_y/2 \leq y \leq L_y$  поле имеет разные знаки, т.е. соответственно на первом участке знак  $\delta E_x$  совпадает со знаком тянущего поля, а на втором участке противоположен ему. Следовательно, при упругой деформации области, где расположен тензотранзистор, ток одного из стоков будет увеличиваться, а другого — уменьшаться.

Подставляя значение  $\Phi(x, y)$  в (9), (12) получаем следующие выражения для абсолютной чувствительности  $S_A$  и эффективности преобразования  $S_R$  полевых тензотранзисторов.

Для МДП тензотранзистора величина абсолютной чувствительности равна

$$S_A = \Pi_{44} C \mu_p R_D (U_C - U_G - U_{DS}) U_{DS} \frac{L_y}{L_x} F(L_x, L_y, L_D), \quad (16)$$

где

$$F(L_x, L_y, L_D) = \frac{2}{\pi^2} \frac{L_x}{L_y} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n]}{n^2} \times \frac{[\text{ch}(\pi n L_y / 2 L_x) - \text{ch}(\pi n (L_y / 2 L_x) (2 L_D / L_y - 1))]}{\text{ch}(\pi n L_y / 2 L_x)}. \quad (17)$$

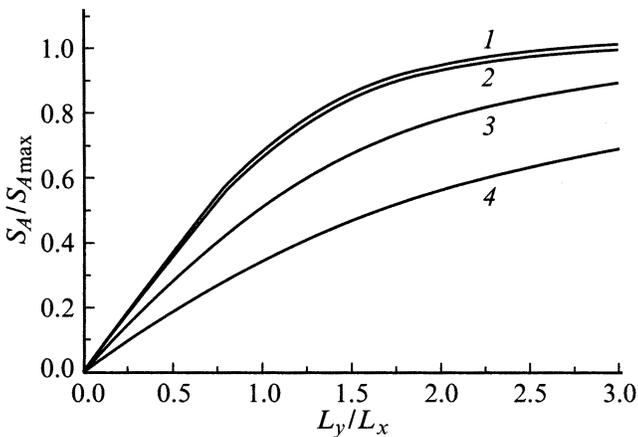
Для полевого тензотранзистора с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора абсолютная чувствительность определяется выражением

$$S_A = \Pi_{44} R_D \sigma_0 L_z \left[ 1 - \sqrt{(U_G + U_i + U_{DS}) / U_C} \right] \times U_{DS} \frac{L_y}{L_x} F(L_x, L_y, L_D). \quad (18)$$

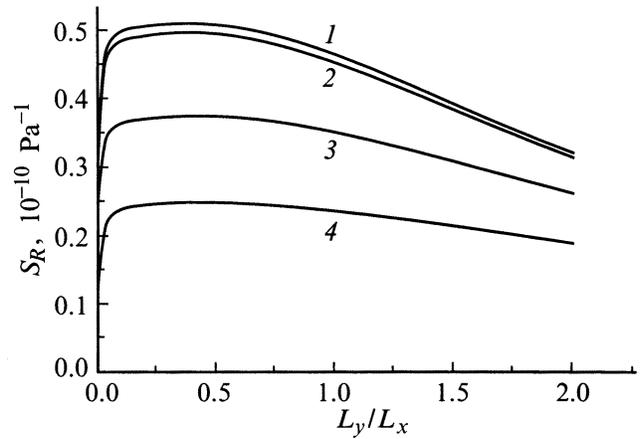
Величина  $S_R$  оказывается одинаковой для обоих типов рассматриваемых здесь тензотранзисторов

$$S_R = \Pi_{44} \cdot F(L_x, L_y, L_D). \quad (19)$$

На рис. 4 и 5 представлены зависимости величины абсолютной и относительной чувствительностей полевых тензотранзисторов от геометрических размеров канала. Эти зависимости позволяют найти оптимальное соотношение  $L_y/L_x$ , а также ширину стоковых электродов, при которых величины  $S_R$  и  $S_A$  максимальны. Как видно, эффективность преобразования и абсолютная чувствительность по-разному зависят от величины отношения



**Рис. 4.** Зависимость относительной чувствительности тензотранзистора от геометрических размеров канала.  $L_D/L_y$ : 1 — 0.5, 2 — 0.4, 3 — 0.2, 4 — 0.1.



**Рис. 5.** Зависимость приведенной к максимальному значению абсолютной чувствительности тензотранзистора от геометрических размеров канала (1–4 — то же, что и на рис. 4).

$L_y/L_x$ . Если эффективность преобразования с ростом величины  $L_y/L_x$  растет, достигает максимума, а затем монотонно падает, то абсолютная чувствительность монотонно растет и достигает насыщения при  $L_y/L_x \geq 2$ . Из зависимостей, представленных на рис. 4, 5, следует, что оптимальными соотношениями являются следующие:  $L_y/L_x \approx 1$ , при этом величина разделительного промежутка между стоками  $W \leq 0.2 L_y$ .

Подставляя численные значения параметров в выражение (19), получаем величину эффективности преобразования для полевых тензотранзисторов:

$$S_R \cong 5.0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}. \quad (20)$$

**2.** Неоднородное распределение электрического поля в канале ( $\partial U_0 / \partial x \neq \text{const}$ ). Распределение тянущего электрического поля в канале МДП тензотранзистора в отсутствие деформации можно найти из условия постоянства полного тока через любое поперечное сечение канала (см., например, [4])

$$E_x(x) = -\frac{\partial U_0(x)}{\partial x} = -\frac{(U_C - U_G - U_{DS}/2) U_{DS}}{L_x \sqrt{[(U_C - U_G)^2 - 2(U_C - U_G - U_{DS}/2) U_{DS} x / L_x]}}. \quad (21)$$

При произвольных  $U_G$  и  $U_{DS}$  получить аналитическое выражение для величины  $\Phi(x, y)$  не удастся, поэтому необходимо использование численных методов [6–8]. Согласно расчетам [7], величину наведенной упругой деформацией продольной компоненты электрического поля можно представить в виде

$$\delta E_x(x, y) = -a \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y) = -\frac{a}{2} \frac{\partial U_0(x)}{\partial x} \frac{y}{(L_x - x_M(L_x, L_y))} F_1(L_x, L_y, L_D), \quad (22)$$

где  $x_M(L_x, L_y)$  — расстояние от истока до точки канала, где величина  $\Phi$  достигает максимума;  $F_1(L_x, L_y, L_D)$  — величина, зависящая от геометрических размеров канала и ширины стоковых электродов.

Подставляя выражения (3), (21), (22) в формулу (2), а также учитывая результаты численного расчета [7] значений  $x_M(L_x, L_y)$  и  $F_1(L_x, L_y, L_D)$ , получаем величину максимальной эффективности преобразования тензотранзистора

$$S_R \cong 4.2 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}. \quad (23)$$

Результаты численного анализа [7] также показывают, что выводы, касающиеся оптимальных размеров канала и ширины стоковых электродов, справедливы и для неоднородного случая.

Оценим величину абсолютной чувствительности для МДП тензотранзистора в режиме согласованной нагрузки, когда выходное сопротивление тензотранзистора равно сопротивлению нагрузки  $R_D$ , при следующих значениях параметров:  $L_x = L_y$ ,  $L_D = L_y/2$ ,  $F_1(L_x, L_y, L_D)L_x/(L_x - x_M = 2.4)$ ,  $U_{DS} = 10 \text{ V}$ ,  $\Pi_{44} = 1.4 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ . Подставляя выражения (21), (22) в (8), получаем следующее значение для абсолютной чувствительности МДП тензотранзистора:

$$S_A = 8.4 \cdot 10^{-9} \text{ V/Pa}. \quad (24)$$

Полученные значения  $S_A$  и  $S_R$  для МДП тензотранзистора при прочих равных условиях практически совпадают с рассчитанными по формулам (11)–(13) величинами абсолютной и относительной чувствительности полевого тензотранзистора с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора.

Сравним полученные значения  $S_A$  и  $S_R$  с аналогичными величинами для тензорезистивного моста. Абсолютная чувствительность и эффективность преобразования для тензорезистивного моста соответственно равны (см., например, [9])

$$S_A = 3.5 \cdot 10^{-9} \text{ V/Pa}, \quad S_R = 6.6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}. \quad (25)$$

Как видно из сравнения приведенных значений  $S_A$  и  $S_R$  (ср. величины (23), (24) и (25)), эффективность преобразования полевых тензотранзисторов  $S_R$  примерно такая же, как у тензорезистивного моста, однако абсолютная чувствительность  $S_A$  более чем в два раза выше. Заметим, что подобно полевым магнитотранзисторам [10] абсолютная чувствительность полевых тензотранзисторов может быть дополнительно повышена при каскадном включении.

## Список литературы

- [1] Bryzek J. // Sensors and Actuators A. 1996. Vol. A56. P. 1–9.
- [2] Бабицев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П. и др. // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 7. С. 1244–1250.
- [3] Бойко И.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. Киев, 1994. Вып. 27. С. 94–98.

- [4] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
- [5] Balthes H.P., Popovic R.S. // Proc. IEEE Trans. 1986. Vol. 74. N 8. P. 1107–1132.
- [6] Fry P.W., Hoey S.F. // IEEE Trans. on ED. 1969. Vol. ED-16. N 1. P. 35–39.
- [7] Lau J., Ko P.K., Chan P.C.H. // Sensors and Actuators A. 1995. Vol. A49. P. 155–162.
- [8] Mathieu N., Giordano P., Chovet A. // Sensors and Actuators A. 1992. Vol. 32. P. 656–660.
- [9] Бабицев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. Вып. 3. С. 409–412.
- [10] Ning F., Bruun E. // Sensors and Actuators A. 1997. Vol. A58. P. 109–112.