

06;12

Кремниевый двухэмиттерный дифференциальный тензотранзистор с ускоряющим электрическим полем в базе

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

Институт физики полупроводников АН Украины,
252650 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 6 мая 1998 г. В окончательной редакции 2 марта 1999 г.)

Приведены результаты исследования кремниевого двухэмиттерного тензотранзистора. Тензотранзистор относится к тензочувствительным полупроводниковым приборам с горизонтальной структурой и внутренним дифференциальным выходом. Определены оптимальная топология прибора и его основные характеристики. Показано, что коэффициент переноса транзистора близок к единице.

Интегральные полупроводниковые датчики давления прочно занимают ведущее место в сферах производства и потребления датчиков механических величин. Существующие полупроводниковые датчики 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 пьезорезистивные датчики и датчики на основе тензоэдс (механический аналог эффекта Холла), ко второй — датчики с чувствительными элементами на основе биполярных полупроводниковых приборов: многоколлекторные тензотранзисторы, тензотиристоры [1–3]. Одним из важнейших параметров датчика давления является величина относительной чувствительности по току

$$S_R = \left[I_0^{-1} \left(\frac{\partial(I)}{\partial\sigma} \right)_{\sigma=0} \right]. \quad (1)$$

Здесь $I(\sigma) = I_0 + \Delta I(\sigma)$, где I_0 , $\Delta I(\sigma)$ — ток, проходящий через датчик в отсутствие давления, и его изменение, обусловленное давлением, соответственно; σ — механическое напряжение в области расположения датчика. Величина S_R монополярных датчиков сравнительно мала, поскольку относительное изменение тока при деформации, которое в свою очередь пропорционально относительному изменению подвижности основных носителей заряда, составляет единицы процентов. Для биполярных полупроводниковых датчиков даже малое изменение подвижности может привести к большому изменению тока $\Delta I(\sigma)$. Это связано с тем, что величина $\Delta I(\sigma)$ в этом случае пропорциональна как относительному изменению подвижности, так и отношению величин тянущего электрического E и диффузионного E_D полей [4]. Произведение указанных параметров может быть достаточно большим даже при малом изменении подвижности за счет фактора E/E_D . В силу этого величина относительной чувствительности для биполярных датчиков оказывается существенно выше, чем для монополярных. Так, для двухколлекторных тензотранзисторов

величина S_R , определяемая выражением [1]

$$S_R = \left[(I_c)^{-1} \left(\frac{\partial(I_{c1} - I_{c2})}{\partial\sigma} \right)_{\sigma=0} \right] \quad (2)$$

($I_c = I_{c1} + I_{c2}$, I_{c1}, I_{c2} — индивидуальные токи коллекторов), более чем на порядок превосходит аналогичное значение для монополярных датчиков. Однако величина S_R , которую также называют величиной эффективности преобразования [5,6], не учитывает токопотребления всего тензотранзистора в целом. Поэтому по аналогии с магнитотранзисторами [5] можно ввести понятие эффективности преобразования тензотранзистора S_R^T , определив его следующим образом:

$$S_R^T = \left[I_{\text{tot}}^{-1} \left(\frac{\partial(I_{c1} - I_{c2})}{\partial\sigma} \right)_{\sigma=0} \right], \quad (3)$$

где I_{tot} — сумма всех токов, необходимых для смещения тензотранзистора.

Выражение (3) можно также рассматривать как частный случай формулы (1) для двухколлекторного тензотранзистора.

В ранее исследованных тензотранзисторах [1–3] для достижения максимальной чувствительности (за счет фактора E/E_0) был предусмотрен разделительный p - n -переход, отделяющий базовую область тензотранзистора от подложки. Поскольку толщина базы тензотранзистора была значительно меньше длины диффузионного смещения носителей тока, то большая часть инжектированных носителей не достигала коллекторных p - n -переходов, а собиралась разделительным p - n -переходом (коллектором паразитного вертикального транзистора) и рекомбинировала вблизи наиболее удаленного от эмиттера токового электрода базы. Для этих тензотранзисторов величина I_{tot} равна сумме токов, протекающих через базовые электроды I_{bb} , эмиттер I_e и разделительный p - n -переход тензотранзистора I_s

$$I_{\text{tot}} = I_{bb} + I_e + I_c + I_s. \quad (4)$$

Выражение (2) с учетом (3), (4) можно представить в виде

$$S_R^T = \frac{(\alpha_{c1} + \alpha_{c2})S_R}{1 + (\alpha_{c1} + \alpha_{c2})(1 + I_{bb}/I_c + I_s/I_c)}, \quad (5)$$

где $\alpha_{c1(c2)}$ — коэффициенты передачи тока коллекторов $c1(c2)$, которые связаны с эффективностями эмиттера γ_e и коллекторов $\gamma_{c1(c2)}$, а также коэффициентом переноса $\beta_{c1(c2)}$ соотношением

$$\alpha_{c1(c2)} = \gamma_e \beta_{c1(c2)} \gamma_{c1(c2)}, \quad (6)$$

где величина $\beta_{c1(c2)}$ равна отношению дырочных компонент токов эмиттера I_{pe} и коллектора $I_{c1(c2)}$

$$\beta_{c1(c2)} = I_{pe}/I_{c1(c2)}. \quad (7)$$

При наличии разделительного $p-n$ -перехода и рекомбинации в базовой области тензотранзистора $I_{pe} \gg I_{c1(c2)}$, поэтому для рассмотренных ранее тензотранзисторов значения $\beta_{c1(c2)}$ и связанные с ним $\alpha_{c1(c2)}$ существенно меньше единицы (см., например, [1,7]).

В оптимальном случае ($I_{bb}, I_s \ll I_c$, $\alpha_{c1(c2)} \gg 1$) величины эффективности преобразования и относительной чувствительности тензотранзистора по току практически совпадают. Однако на практике $\alpha_{c1(c2)} \ll 1$ и $S_R \neq S_R^T$. В этом случае целесообразно оптимизацию конструкции, топологии и режима работы тензотранзисторов проводить одновременно по двум параметрам S_R и S_R^T , достигая тем самым как максимального значения относительной чувствительности, так и минимального энергопотребления прибора.

В настоящей работе проводится анализ работы двух-эмиттерного дифференциального тензотранзистора с более высокими значениями S_R и S_R^T , что достигается особенностями его конструкции, которые исключают необходимость создания разделительного $p-n$ -перехода ($I_s = 0$), а также позволяют достичь значительно более высоких значений коэффициентов передачи коллекторных токов.

Топология и электрическая схема включения тензотранзистора представлены на рис. 1.

Неравновесные носители заряда инжектируются в базовую область тензотранзистора двумя эмиттерами, n -области которых находятся под равным потенциалом. В ускоряющем электрическом поле базы E_x (величина E_x определяется разностью потенциалов U на p^+ -базовых электродах) носители тока дрейфуют вдоль базовой области тензотранзистора. В отсутствие упругой деформации токи коллекторов, обусловленные диффузионным растеканием носителей заряда в y - и z -направлениях, равны между собой. Вследствие этого выходной сигнал U , снимаемый с нагрузочных сопротивлений R_{c1} и R_{c2} , равен нулю.

При одноосной упругой деформации базовой области тензотранзисторов в кристаллографическом направлении [110] подвижность основных носителей заряда (дырок) становится анизотропной в xy -плоскости, в результате чего появляется поперечная разность потенциалов,

которая в зависимости от знака деформации один из эмиттерных переходов смещает в прямом направлении, а другой — в обратном. Возникающая таким образом модуляция инжекции эмиттерных $p-n$ -переходов приводит к разбалансу токов в коллекторных цепях тензотранзистора и появлению выходного сигнала.

Принцип работы описываемого здесь тензотранзистора формально эквивалентен принципу действия магнитного датчика с дифференциальным усилением [5], в котором инжекция эмиттерных $p-n$ -переходов модулируется холловским полем.

Как и ранее [1–3], будем полагать, что тензотранзистор расположен на мембране, трансформирующей равномерно распределенную по ее поверхности нагрузку в одноосную упругую деформацию растяжения (или сжатия) его базовой области в кристаллографическом направлении [110]. В этом случае параметр анизотропии a связан с величиной упругого механического напряжения σ в базе тензотранзистора соотношением

$$a = \Pi_{44}\sigma/2, \quad (8)$$

где Π_{44} — сдвиговый пьезорезистивный коэффициент для p -Si.

С целью оптимизации топологии и геометрических размеров элементов тензотранзистора проведем расчет его основных характеристик. Расчет проведем в приближении малого уровня инжекции и слабых деформаций, когда параметр анизотропии достаточно мал $|a| \ll 1$. В силу малости отношения $2d/l_y \ll 1$ будем также пренебрегать влиянием слоя шириной $2d$ (рис. 1), разделяющего коллекторные $p-n$ -переходы, на пространственное распределение неосновных носителей заряда в базе тензотранзистора.

Ограничим базу тензотранзистора координатами $0 < x < l_x$, $0 < y < l_y$, $0 < z < l_z$. При принятых предположениях уравнения, описывающие распределения электрического потенциала в базовой области тензотранзистора, совпадают с исследованными ранее [1]. Поэтому полученные там результаты, касающиеся выбора геометрических размеров базы тензотранзистора и расположения эмиттеров, остаются в силе $l_x/l_y = 0.2$, $x_c/l_x \geq 0.25$, где x_c — расстояние от центра эмиттеров до ближайшего к ним базового электрода.

Для расчета выходных характеристик тензотранзистора необходимо знать пространственное распределение концентрации неравновесных носителей заряда в базе тензотранзистора. Используя функцию источника $n(x, y, z, x', y', z')$ [2], выражение для концентрации неравновесных носителей заряда находим интегрированием по объему эмиттеров V_e

$$n(x, y, z) = \int dx' \int dy' \int dz' \rho(x', y') n(x, y, z, x', y', z'), \quad (9)$$

$$x', y', z' \in V_e.$$

Здесь $\rho(x', y')$ — плотность источников неравновесных носителей заряда, которая в нашем случае является

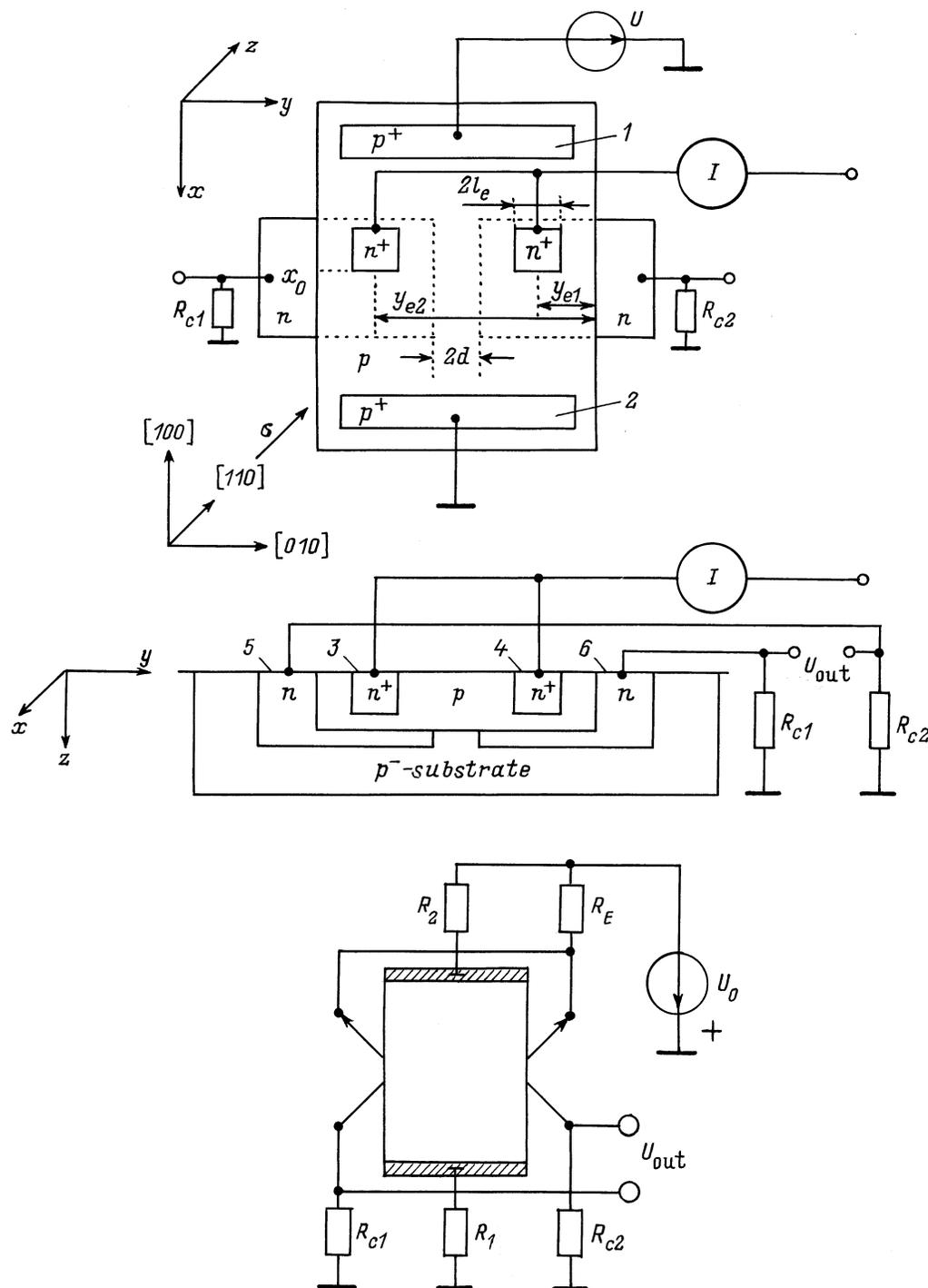


Рис. 1. Топология тензотранзистора: 1, 2 — базовые электроды; 3, 4 — эмиттеры; 5, 6 — коллекторы C_1 и C_2 соответственно; σ — направление одноосного сжатия.

функцией тянущего поля, параметра анизотропии и координат

$$\rho(x', y') = n_0 \{ \exp[\Phi(x', y')] - 1 \}, \quad (10)$$

$$\Phi(x', y') = e \frac{\varphi_0 + E_x x' + a E_x \left(y' - \frac{l_y}{2} \right)}{k_B T}, \quad (11)$$

φ_0 — напряжение начального смещения эмиттерного n - p -перехода, T — температура, k_B — постоянная Больцмана, e и n_0 — заряд электрона и равновесная концентрация электронов в базе.

Дальнейшее рассмотрение проведем для размеров (все размеры в μm) базы $l_x \times l_y \times l_z = 200 \times 50 \times 3$, эмит-

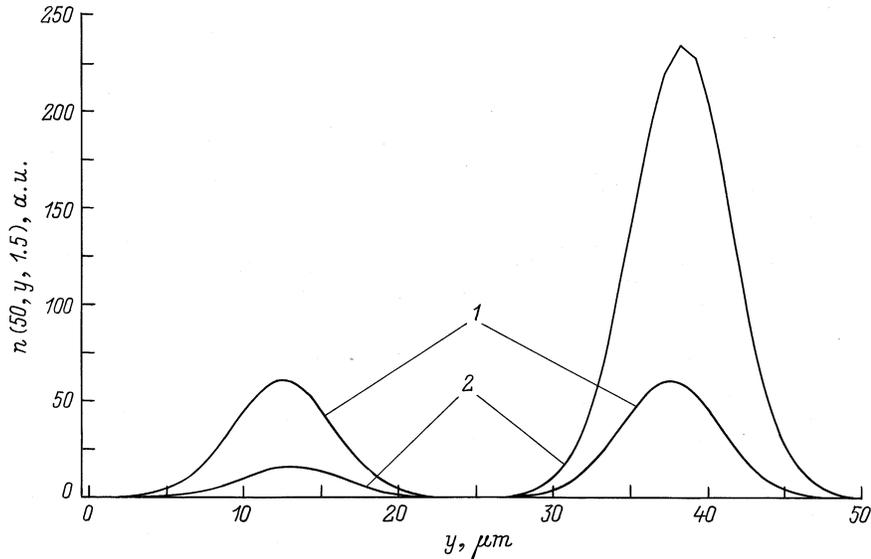


Рис. 2. Поперечное распределение концентрации неравновесных носителей заряда при различных значениях параметра анизотропии α : 1 — 0, 2 — 0.055.

теров $l'_x \times l'_y \times l'_z = 4 \times 5 \times 1.5$, расстояние между центрами эмиттеров $y_{e1} - y_{e2} = 25$, $x_0 = 42$, длина диффузии неравновесных носителей заряда $L = 30$. Тянущее поле равно $E_x = 500$ В/см, скорость поверхностной рекомбинации $S = 0$. В расчетах выбрано значение для параметра анизотропии $a = 0.055$, чему соответствует одноосное упругое механическое напряжение $\sigma = 800$ кгф/см². Изменения в каждом конкретном случае оговариваются особо. Заметим, что условие малого уровня инжекции накладывает ограничения на величину

$$y_{e1} - y_{e2} + l'_y \leq \frac{2k_B T}{|a|E_x} \ln \left[\frac{n_0}{p_0} + 1 \right]. \quad (12)$$

Здесь p_0 — равновесная концентрация основных носителей (дырок) в базе тензотранзистора. В обратном случае генерируемые n - p -переходом неравновесные носители будут закорачивать поперечное поле и модуляция инжекции исчезает. На рис. 2 показаны поперечные распределения концентрации неравновесных носителей заряда в базе тензотранзистора вдоль линии, задаваемой координатами, в μm (80, y , 3). Видно, что в отсутствии деформации ($\sigma = 0$) распределение зеркально симметрично относительно центральной плоскости ($x, l_y/2, z$) (кривая 1). При наличии механического напряжения σ распределение становится резко асимметричным, у одного из коллекторов концентрация резко увеличивается, а у другого уменьшается (кривая 2). При этом общее количество неравновесных носителей заряда растет, что следует из сравнения площадей под кривыми 1 и 2. Такое изменение пространственного распределения неравновесных электронов в базе является прямым следствием модуляции инжекции.

Величины тока коллекторов находим интегрированием

$$I_{c1(c2)} = -eD_n \int_{x_0}^1 dx \times \left[\int_0^1 \frac{\partial n}{\partial y} \Big|_{y=0, (l_y)} dz + \int_{0, (\frac{l_y}{2}+d)}^{\frac{l_y}{2}-d, (l_y)} \frac{\partial n}{\partial z} \Big|_{z=l_z} dy \right]. \quad (13)$$

На рис. 3 и 4 показаны относительные изменения токов коллекторов в зависимости от величины параметра анизотропии и значения тянущего электрического поля в базе тензотранзистора. Из рисунков видно, что при наложении упругих деформирующих усилий величина тока коллектора может увеличиваться более чем в 3 раза, при этом его зависимость от параметра анизотропии (величины деформации) существенно нелинейна.

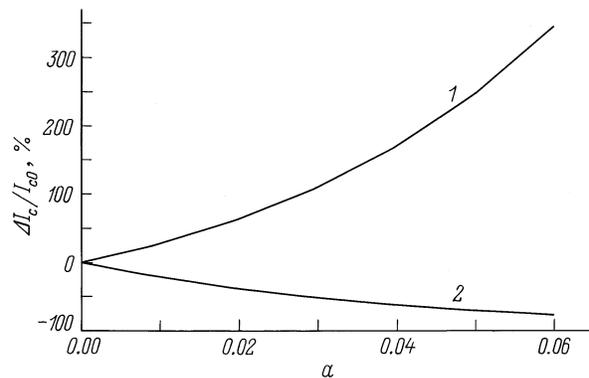


Рис. 3. Зависимость изменения тока коллекторов C_1 (1) и C_2 (2) от величины параметра анизотропии.

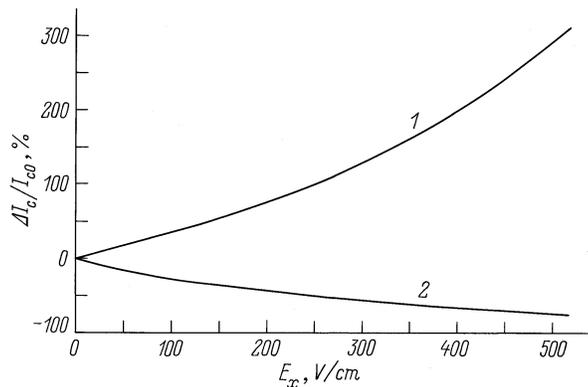


Рис. 4. Полевая зависимость относительного изменения тока коллекторов C_1 (1) и C_2 (2).

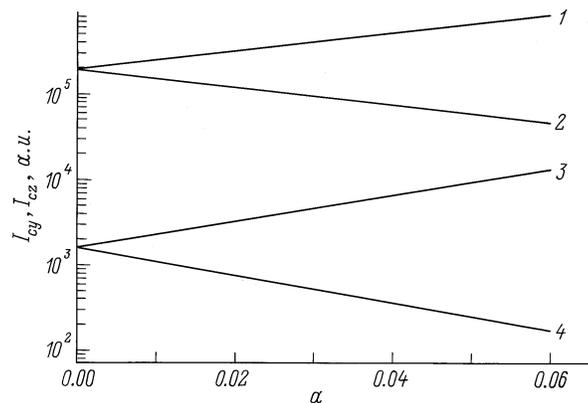


Рис. 5. Зависимость z - (1, 2) и y -компонент (3, 4) тока коллекторов C_1 (1, 3) и C_2 (2, 4) от параметра анизотропии.

На рис. 5 показаны изменения компонент коллекторных токов I_{cz} и I_{cy} , протекающих соответственно через плоскости (x, y, l_z) и $(x, 0, z)$ (x, l_y, z), коллекторных $p-n$ -переходов. Видно, что основной вклад в величину I_c вносит ток, протекающий через (x, y, l_z) плоскость коллекторного перехода. Из этой зависимости также следует, что для данного тензотранзистора величина относительного увеличения тока коллектора в условиях упругой деформации его базовой области примерно в 2 раза меньше при прочих равных условиях, чем у исследованного ранее $n-p-n$ -тензотранзистора [1], поскольку рассматриваемой конструкции носители заряда, инжектируемые эмиттером, ток которого увеличивается при деформации, достигают обоих коллекторных переходов. Этот эффект существенно меньше для $n-p-n$ -тензотранзистора, так как его коллекторы удалены друг от друга на значительно большее расстояние.

Распределение плотностей коллекторных токов $j_{c1}(x)$ и $j_{c2}(x)$ вдоль линий, задаваемых координатами (x, y_{e1}, l_z) и (x, y_{e2}, l_z) соответственно, показаны на рис. 6. На основе этой зависимости можно оптимизировать длину коллекторных переходов. В нашем случае коллекторные переходы можно ограничить координатами $40 < x < 55$.

Зависимость относительного изменения коллекторных токов при деформации от расстояния между коллекторами показана на рис. 7. С ростом расстояния между коллекторами увеличивается поперечная разность потенциалов, модулирующая локальную инжекцию эмиттерных $p-n$ -переходов.

Результаты исследования относительного изменения коллекторных токов $\Delta I_c/I_{c0}$ ($\Delta I_c = I_c - I_{c0}$, где I_c, I_{c0} — токи коллектора при наличии и отсутствии деформации соответственно) от длины диффузионного смещения носителей заряда L и ширины эмиттерных $p-n$ -переходов сводятся к следующему. При уменьшении величины L от 30 до 5 μm $\Delta I_c/I_{c0}$ увеличивается незначительно, в то же время значение I_{c0} уменьшается в 4.5 раза, что ведет к нежелательному увеличению выходного сопротивления прибора. Аналогичное поведение характерно для зависимости $\Delta I_c/I_{c0}$ от ширины эмиттерных $p-n$ -переходов при фиксированном значении расстояния между их центрами $y_{e1} - y_{e2}$. При уменьшении ширины эмиттерных переходов значение $\Delta I_c/I_{c0}$ увеличивается незначительно, однако значительно уменьшается значение I_{c0} .

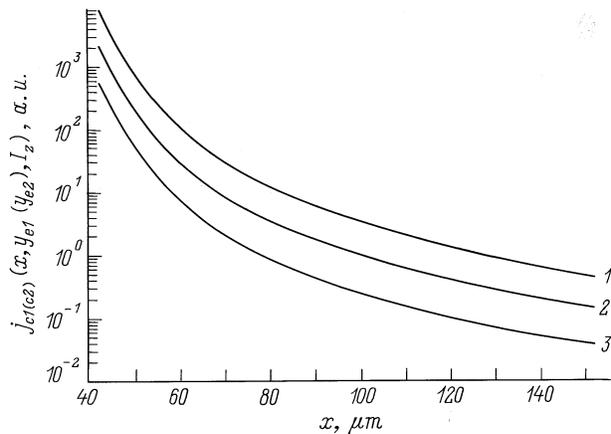


Рис. 6. Продольные распределения плотностей коллекторных токов в отсутствие (2) и при наличии (1, 3) деформации для коллекторов C_1 (2) и C_2 (1, 3).

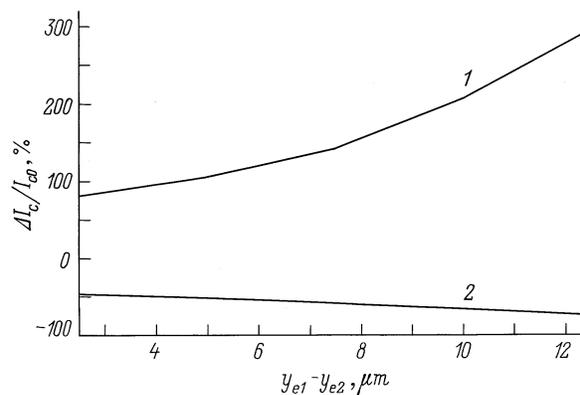


Рис. 7. Относительные изменения тока коллекторов C_1 (1) и C_2 (2) при деформации в зависимости от расстояния между коллекторами.

В заключение оценим величины относительной S_R и абсолютной S_A чувствительностей, а также коэффициент переноса тензотранзистора. Из кривых на рис. 3 следует, что величина $S_R = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kgf}$. Выражение для расчета абсолютной чувствительности можно получить из формулы (2) заменой величины $(I_c)^{-1}$ на величину сопротивления нагрузки в цепях коллекторов $R_c = R_{c1} = R_{c2}$. Тогда при токах коллектора в отсутствие давления $I_{c1} = I_{c2} = 1 \text{ mA}$ и величине $R_c = 5 \text{ k}\Omega$ значение $S_A = 18 \text{ mV} \cdot \text{cm}^2/\text{kgf}$. При величине тянущего электрического поля в базе $E_x = 500 \text{ V/cm}$ по формуле (7) получаем значение $\beta_{c1(c2)} = 0.8$, что примерно на два порядка выше, чем для конструкций тензотранзисторов, рассмотренных ранее [1,2].

Авторы благодарны З.С. Грибникову за стимулирование данных исследований.

Список литературы

- [1] Бабичев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П. и др. // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 7. С. 1244–1250.
- [2] Козловский С.И. // ФТП. 1995. Т. 29. Вып. 10. С. 1244–1250.
- [3] Бабичев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П. и др. // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 10. С. 1723–1727.
- [4] Бойко И.И., Романов В.А. // ФТП. 1977. Т. 11. Вып. 5. С. 817–835.
- [5] Baltes H.P., Popovic R.S. // Proc. IEEE Trans. 1986. Vol. 74. N 8. P. 1107–1132.
- [6] Takamiya S., Fujikawa K. // IEEE Trans. on ED. 1972. Vol. ED-19. N 10. P. 1085–1090.
- [7] Козловский С.И. // ФТП. 1996. Т. 30. Вып. 9. С. 1544–1551.