

Вертикальный двухколлекторный тензотранзистор с ускоряющими электрическими полями в базе и эмиттере

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

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252028 Киев, Украина

(Получена 23 февраля 1998 г. Принята к печати 25 августа 1998 г.)

Теоретически исследованы характеристики биполярного вертикального двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющими электрическими полями в базе и эмиттере. Описаны его конструкция и принцип действия, а также проведена оптимизация топологии прибора. Показано, что выходной сигнал обусловлен двумя эффектами: эффектом поперечного отклонения неравновесных носителей заряда в базе и модуляцией инжекции поперечной разностью потенциалов в эмиттере.

Введение

Как известно [1], в анизотропных по электропроводности полупроводниковых кристаллах направления тока и электрического поля в общем случае не совпадают. Это означает, что при движении носителей заряда между токовыми электродами на них действуют силы, поперечные к направлению тока. Причем величина этой силы в случае анизотропии, наведенной внешними направленными возмущениями (одноосная упругая деформация, магнитное поле, свет), пропорциональна величине этого возмущения (напряженности магнитного поля, механического напряжения, интенсивности света).

Таким образом, в случае искусственной анизотропии проводимости появляется возможность управления явлениями переноса носителей заряда в широких пределах. Практическое использование этой возможности легло в основу разработки ряда полупроводниковых приборов: кремниевых интегральных многоколлекторных тензотранзисторов [2,3] и магнитотранзисторов [4], чувствительных к величинам одноосного механического напряжения и напряженности магнитного поля соответственно.

При достаточно большом тянущем (ускоряющем) электрическом поле даже малая анизотропия проводимости может привести к большому концентрационному эффекту (поперечному перераспределению носителей тока). Поэтому на практике в области локализации анизотропии проводимости тянущее электрическое поле выбирают таким, чтобы дрейфовая (полевая) компонента тока значительно превосходила диффузионную.

Ранее были исследованы биполярные $n-p-n$ - и $p-n-p$ -двухколлекторные тензотранзисторы горизонтальной структуры с ускоряющим электрическим полем в базе [2,3]. Мерой внешнего механического воздействия в тензотранзисторах является величина разбаланса коллекторных токов, вызываемая эффектами отклонения (либо модуляции) инжекции. В обоих случаях наведенная одноосной упругой деформацией анизотропия проводимости существенным образом изменяет поперечное распределение носителей тока в базе тензотранзистора. При этом влияние наведенной анизотропии электропроводности на процессы переноса носителей тока непо-

средственно в эмиттере пренебрежимо мало, что связано с малой величиной электрического поля в эмиттере — практически все напряжение эмиттер–база падает на эмиттерном $p-n$ -переходе.

В настоящей работе мы проведем исследования кремниевого интегрального двухколлекторного тензотранзистора вертикальной структуры с ускоряющими электрическими полями как в базе, так и в эмиттере. В рассматриваемой конструкции разбаланс коллекторных токов обусловлен одновременным возникновением двух эффектов: эффектом модуляции инжекции $p-n$ -перехода эмиттер–база вследствие возникновения поперечного поля в эмиттере и эффектом поперечного отклонения носителей тока в базе. Наряду с расчетом основных характеристик тензотранзистора проводится сравнительный анализ влияния на них перечисленных эффектов.

Принцип работы тензотранзистора

Будем полагать, что тензотранзистор располагается на кремниевой мембране трансформирующей равномерно распределенную по ее поверхности нагрузку в одноосную упругую деформацию сжатия (растяжения) базы и эмиттера тензотранзистора. В результате деформации подвижность дырок μ_p — основных носителей тока в эмиттере и неосновных носителей в базе — становится анизотропной в плоскости xu с отличными от нуля недиагональными компонентами μ_{px} .

На рис. 1 показана топология тензотранзистора. Тензотранзистор включает в себя: p -эмиттер и n -базу с двумя парами омических контактов в виде полосок p^+-p - и n^+-n -типа проводимости, расположенных соответственно на краях эмиттера и базы, а также два коллекторных p^+-n -перехода. Здесь же показана ориентация элементов тензотранзистора относительно кристаллографических осей.

Электрическая схема включения тензотранзистора и продольные (вдоль оси $0x$) распределения электрических потенциалов в базе $\varphi_b(x)$ и эмиттере $\varphi_e(x)$ показаны на рис. 2. Величины электрических полей в базе и эмиттере, а также разность потенциалов на $p-n$ -переходе

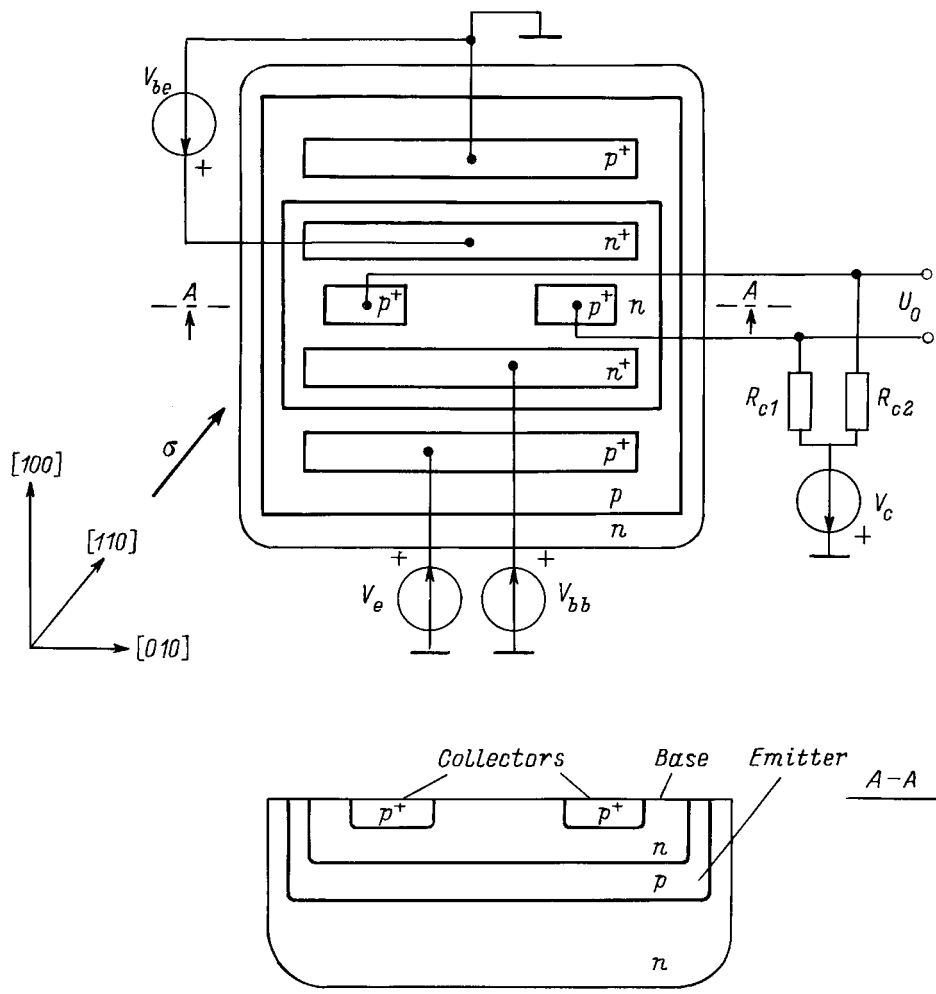


Рис. 1. Топология, схема включения и кристаллографическая ориентация тензотранзистора.

эмиттер-база

$$\varphi_{eb}(x, y) = \varphi_e(x, y) - \varphi_b(x) \quad (1)$$

заданы внешними источниками V_{be} , V_{bb} , V_e . Согласно (1), область прямосмещенного $p-n$ -перехода эмиттер-база определяется теми значениями x ($0 < x < x_0$), для которых величина $\varphi_{eb}(x, y) > 0$.

Инжектированные в базовую область носители тока дрейфуют в продольном тянущем поле базы и диффундируют в направлении z , достигая коллекторных переходов. В отсутствие механической деформации коллекторные токи, определяемые диффузионным растеканием носителей заряда в направлении z , равны между собой, и выходной сигнал, снимаемый с нагрузочных сопротивлений R_{c1} и R_{c2} , близок к нулю (при условии $R_{c1} = R_{c2}$). Здесь и далее будем полагать $R_{c1} = R_{c2} = R_c$.

При подаче на мембрану распределенной механической нагрузки в месте расположения тензотранзистора возникает одноосная деформация сжатия (растяжения) в направлении $[110]$, благодаря чему подвижность дырок как в базе, так и в эмиттере тензотранзистора становится анизотропной. Анизотропия подвижности дырок в эмит-

тере, где дырки являются основными носителями, обуславливает возникновение поперечной разности потенциалов. Наведенная таким образом разность потенциалов модулирует инжекцию $p-n$ -перехода эмиттер-база, смещая один из краев этого перехода (при $y = 0$ либо при $y = l_y$, в зависимости от знака деформации) в прямом направлении, а другой — в обратном. Инжектированные таким образом в базовую область тензотранзистора дырки дрейфуют в тянущем поле базы (в направлении x), в силу наведенной анизотропии подвижности отклоняются в поперечном направлении (в направлении y), диффундируют в направлении z и достигают коллекторных переходов. Модуляция инжекции $p-n$ -перехода база-эмиттер и возникновение в базе поперечного потока пар, обусловленных анизотропией подвижности, приводит к резкому разбалансу коллекторных токов и появлению выходного сигнала.

Строго говоря, анизотропной в рассматриваемом случае становится и подвижность электронов μ_n , однако для приведенных как ориентации элементов тензотранзистора относительно кристаллографических осей, так и направления одноосной упругой деформации анизотропию подвижности электронов можно не учитывать. Тогда

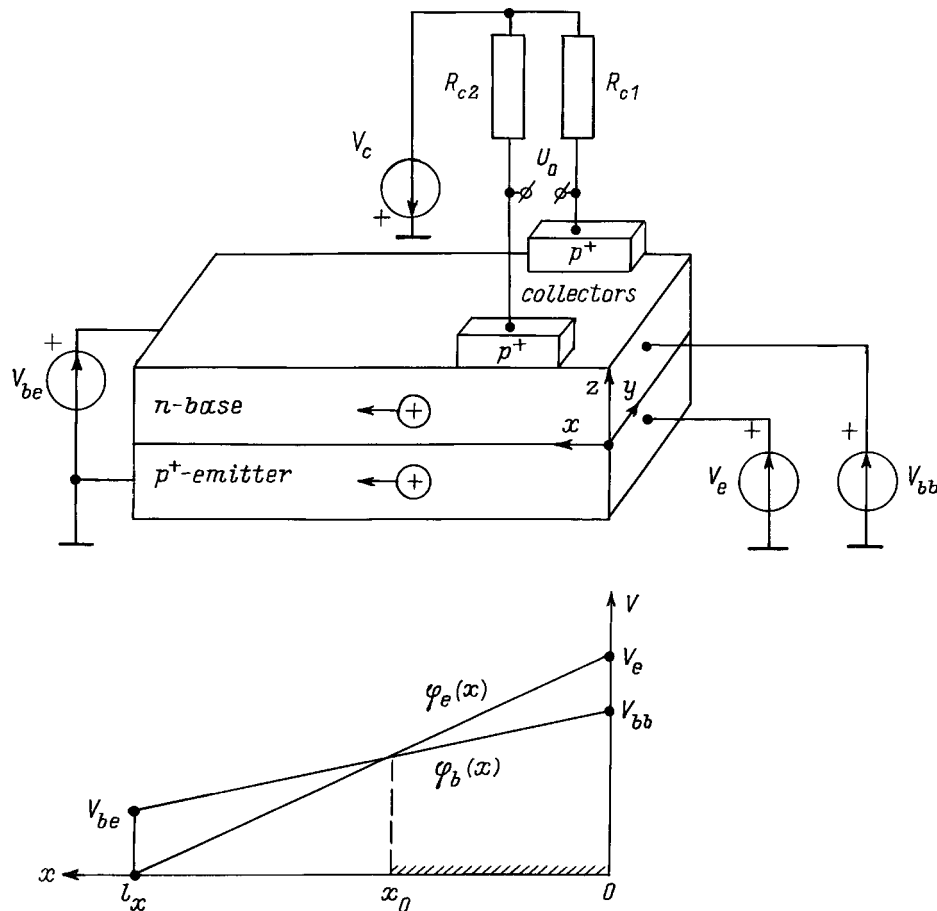


Рис. 2. Основные элементы структуры тензотранзистора и продольные распределения электрического потенциала в базе и эмиттере.

параметр анизотропии a можно представить в виде

$$a = \frac{\mu_{nxy}}{\mu_{nyy}} - \frac{\mu_{pxy}}{\mu_{pyy}} \approx -\frac{\mu_{pxy}}{\mu_{pyy}}. \quad (2)$$

Здесь $\mu_n \cong \mu_{nyy}$, $\mu_p \cong \mu_{pyy}$.

Следует заметить, что принцип действия рассматриваемого здесь тензотранзистора формально эквивалентен принципу действия аналогичного по конструкции магнитотранзистора [5], чувствительного к поперечному магнитному полю, где параметр анизотропии равен сумме холловских углов для электронов и дырок.

По аналогии с магнитотранзисторами [2] основными характеристиками тензотранзистора будем считать абсолютную (S_A) и относительную (S_R) чувствительности, которые определяются как соответствующие производные при нулевом значении механического напряжения σ :

$$S_A \equiv \left. \frac{\partial U_0}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (3)$$

$$S_R \equiv U_0^{-1} \left. \frac{\partial U_0}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (4)$$

где U_0 — разность падений напряжений на резисторах R_{c1} , R_{c2} в цепях коллекторов.

Далее будем считать, что выходное сопротивление коллекторов тензотранзистора r_c достаточно велико, т. е. $r_c \ll R_c$, тогда выражения (3), (4) можно заменить следующими:

$$S_A = R_c \left. \frac{\partial(I_{c1} - I_{c2})}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0}, \quad (5)$$

$$S_R = (I_{c1} + I_{c2})^{-1} \left. \frac{\partial(I_{c1} - I_{c2})}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0}. \quad (6)$$

Здесь I_{c1} и I_{c2} — токи коллекторов.

Результаты расчета и их обсуждение

Теоретический анализ работы тензотранзистора проведем в приближениях:

а) слабого уровня инжекции, когда в любой точке базы и эмиттера концентрация неосновных носителей заряда значительно меньше основных;

б) слабых деформаций, когда параметр анизотропии a достаточно мал,

$$|a| \ll 1.$$

Ограничим базу и эмиттер тензотранзистора координатами соответственно:

$$(0 \leq x \leq l_x, \quad 0 \leq y \leq l_y, \quad 0 \leq z \leq l_z);$$

$$(0 \leq x' \leq l_x, \quad 0 \leq y' \leq l_y, \quad 0 \leq z' \leq l_z).$$

В условиях указанных приближений и упрощения пространственное распределение концентрации неравновесных носителей $p(x, y, z)$ в базе тензотранзистора находится из решения уравнения биполярного переноса:

$$D_p \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + 2\alpha_x \frac{\partial p}{\partial x} + 2\alpha_y \frac{\partial p}{\partial y} \right] - \frac{p - p_0}{\tau} = -\rho(x', y') \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') \quad (7)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} p(0, y, z) &= p(l_x, y, z) = p(x, 0, z) \\ &= p(x, l_y, z) = p(x, y, l_z) = p_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где D_p , τ , p_0 — коэффициент диффузии, время жизни и равновесная концентрация дырок в базе соответственно; $\delta(x - x')$ — дельта-функция Дирака. Функция $\rho(x', y')$ описывает плотность источников неравновесных носителей. Величины α_x и α_y связаны со значением тянущего поля E_x в базе тензотранзистора соотношениями:

$$\alpha_x = \frac{eE_x}{2k_B T}, \quad \alpha_y = a\alpha_x, \quad (9)$$

где e — заряд электрона, k_B — постоянная Больцмана, T — температура.

Функция Грина для уравнения (7) имеет вид

$$\begin{aligned} p(x, y, z, x', y', z') &= \frac{4l_x}{D_p l_y l_z} \exp[\alpha_x(x - x') + \alpha_y(y - y')] \\ &\times \sum_{m,k=1}^{\infty} \frac{\text{sh} \left[\beta_{mk} \left(1 - \frac{x}{l_x} \right) \right]}{\beta_{mk} \text{sh}(\beta_{mk})} \text{sh} \left(\frac{\beta_{mk} x'}{l_x} \right) \\ &\times \sin q_k z \sin q_m y \sin q_m y' \sin q_k z', \end{aligned} \quad (10)$$

$$q_m = \pi \frac{m}{l_y}, \quad q_k = \pi \frac{k}{l_z},$$

$$\beta_{mk}^2 = l_x^2 (q_m^2 + q_k^2 + \alpha_x^2 + \alpha_y^2 + L^{-2}), \quad L = \sqrt{D_p \tau}.$$

Гриновская функция определяет концентрацию неравновесных носителей заряда в точке базы с координатами (x, y, z) , которая порождается источником единичной интенсивности в точке с координатами (x', y', z') [6].

В нашем случае неравновесные носители инжектируются смещенной в прямом направлении частью p - n -перехода эмиттер-база ($0 \leq x' \leq x_0$, $0 \leq y' \leq l_y$,

$0 \leq z' \leq l_{ze}$) с плотностью источников $\rho(x', y')$:

$$\rho(x', y') = \frac{P_0}{\tau} \left\{ \exp[\varphi_{eb}(x', y')/k_B T] - 1 \right\}, \quad (11)$$

где разность потенциалов $\varphi_{eb}(x', y')$ описывается выражением

$$\begin{aligned} \varphi_{eb}(x', y') &= V_e \left[1 - \frac{x'}{l_x} + a\Phi(x', y') \right] \\ &- V_{be} \frac{x'}{l_x} - V_{bb} \left(1 - \frac{x'}{l_x} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь величина $V_e a\Phi(x', y')$ описывает изменение пространственного распределения потенциала в эмиттере, обусловленного возникновением анизотропии электропроводности основных носителей тока (дырок) [7]:

$$\begin{aligned} \Phi(x', y') &= \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \left(\frac{\pi n x'}{l_x} \right)}{n^2} [(-1)^n - 1] \\ &\times \frac{\text{sh} \left[\frac{\pi n}{l_x} \left(y' - \frac{l_y}{2} \right) \right]}{\text{ch} \left(\frac{\pi n l_y}{2l_x} \right)}. \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом изложенного выше, распределение неравновесных носителей в базе тензотранзистора можно найти интегрированием:

$$p(x, y, z) = \int_0^{x_0} dx' \int_0^{l_y} dy' \int_0^{l_{ze}} dz' \rho(x', y') p(x, y, z, x', y', z'). \quad (14)$$

Вычисление интеграла (14) существенно упрощается, если ряд (13) заменить функцией:

$$\Psi(x_0, y') = \langle \Phi(x', 0) \rangle_{x_0} \left(1 - 2 \frac{y'}{l_y} \right), \quad (15)$$

где символ $\langle \dots \rangle_{x_0}$ означает усреднение на интервале $0 \leq x' \leq x_0$.

$$\begin{aligned} \langle \Phi(x', 0) \rangle_{x_0} &= \frac{2}{\pi^3} \frac{l_x}{x_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\cos \left(\frac{\pi n x}{l_x} \right) - 1 \right] \\ &\times \frac{(-1)^n - 1}{n^3} \text{th} \left(\pi n \frac{l_y}{2l_x} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Значение x_0 определяем из условия $\varphi_{eb}(x_0, l_y/2) = 0$:

$$x_0 = \frac{V_e - V_{bb}}{V_e - V_{bb} + V_{be}} l_x. \quad (17)$$

Дальнейшее рассмотрение проведем для следующих размеров (все размеры в мкм): базы $l_x \times l_y \times l_z = 30 \times 120 \times 3$, эмиттера $l'_x \times l'_y \times l'_z = 30 \times 120 \times 2$,

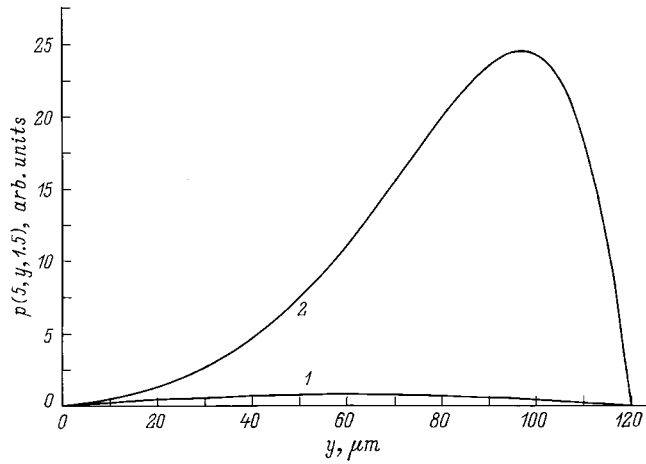


Рис. 3. Поперечные распределения неравновесных носителей в базе тензотранзистора при различных значениях параметра анизотропии a : 1 — 0, 2 — 0.055.

$L = 30$. Коллекторные p - n -переходы залегают на глубине $z = l_z$. Значения питающих напряжений равны $V_e = 1.4$ В, $V_{be} = 0.1$ В, $V_{bb} = 1.2$ В.

Значение параметра анизотропии связано с величиной одноосного упругого напряжения σ соотношением

$$a \cong -\Pi_{44}^p \frac{\sigma}{2}, \quad (18)$$

где Π_{44}^p — сдвиговый пьезорезистивный коэффициент для p -Si. В расчетах выбрано значение параметра анизотропии $a = 0.055$, чему соответствует одноосное упругое напряжение $\sigma = 800$ кГ/см².

На рис. 3 показаны поперечные распределения концентрации неравновесных носителей заряда в базе тензотранзистора вдоль линии с координатами в мкм: (5, y , 1.5). Видно, что в отсутствие деформации распределение зеркально-симметрично относительно центральной плоскости (x , $l_y/2$, z) (кривая 1). При наличии механического напряжения σ распределение становится асимметричным: у одного из коллекторов градиент концентрации неравновесных дырок существенно увеличивается, а у другого — уменьшается. Наряду с этим общее количество неравновесных носителей в базе также увеличивается, что непосредственно следует из сравнения площадей под кривыми 1 и 2. Такое изменение с деформацией пространственного распределения дырок в базе является прямым следствием возникновения эффекта модуляции инжекции p - n -перехода эмиттер-база, когда под воздействием продольного тянущего поля и наведенной анизотропии электропроводности в эмиттере возникает поперечная разность потенциалов, которая смещает в зависимости от знака механического напряжения один из краев p - n -перехода эмиттер-база в прямом направлении, а другой — в обратном.

Продольные распределения плотностей токов $j_z(x)$ вдоль линии, задаваемой координатами (x , 25, l_z), при наличии и отсутствии деформации показаны на рис. 4. Здесь же приведены зависимости относительного изменения с деформацией плотностей токов: $\Delta j_z(x)/j_z^0(x)$, где $\Delta j_z(x) = |j_z(x) - j_z^0(x)|$, а $j_z(x)$, $j_z^0(x)$ — плотности токов в отсутствие и при наличии деформирующего напряжения σ .

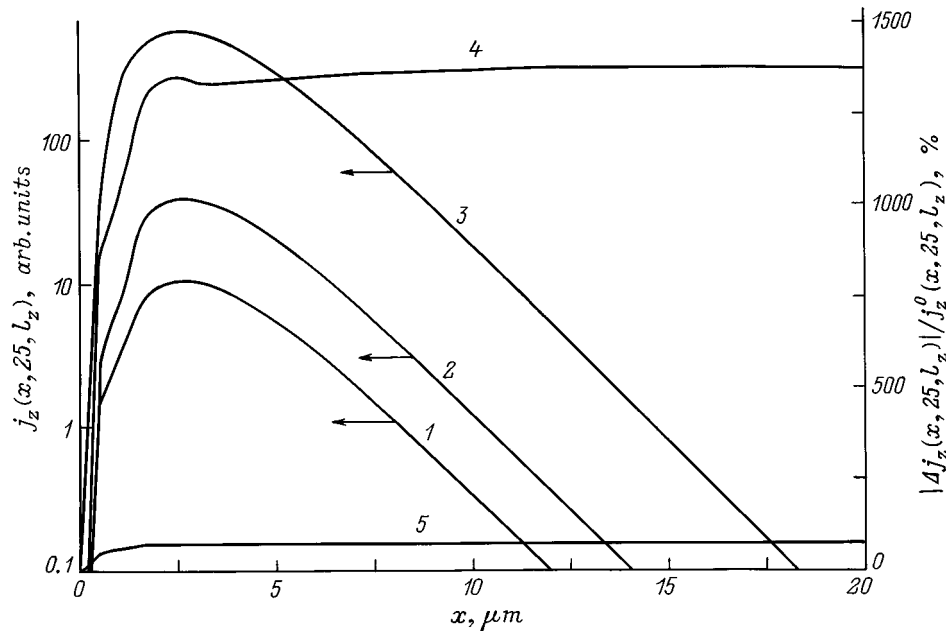


Рис. 4. Продольные распределения вертикальной компоненты плотности тока в базе тензотранзистора при наличии (1, 3) и в отсутствие (2) деформации, а также ее относительные изменения (4, 5), обусловленные деформацией при различных значениях параметра анизотропии a : 2 — 0; 3, 4 — 0.055; 1, 5 — (-0.055).

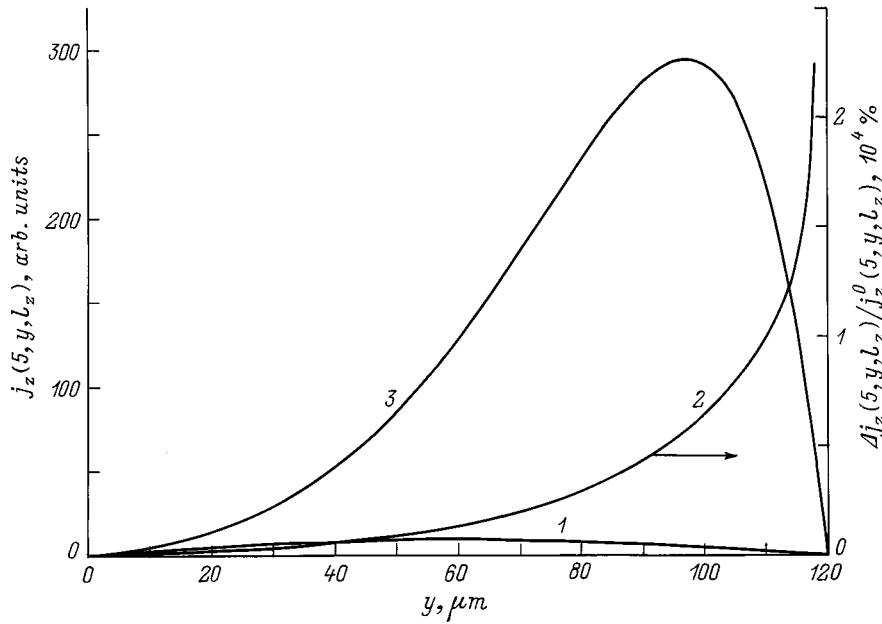


Рис. 5. Поперечные распределения вертикальной компоненты плотности тока в базе тензотранзистора при наличии (3) и в отсутствие (1) деформации, а также ее относительные изменения (2), обусловленные деформацией, при различных значениях параметра анизотропии a : 1 — 0; 2, 3 — 0.055.

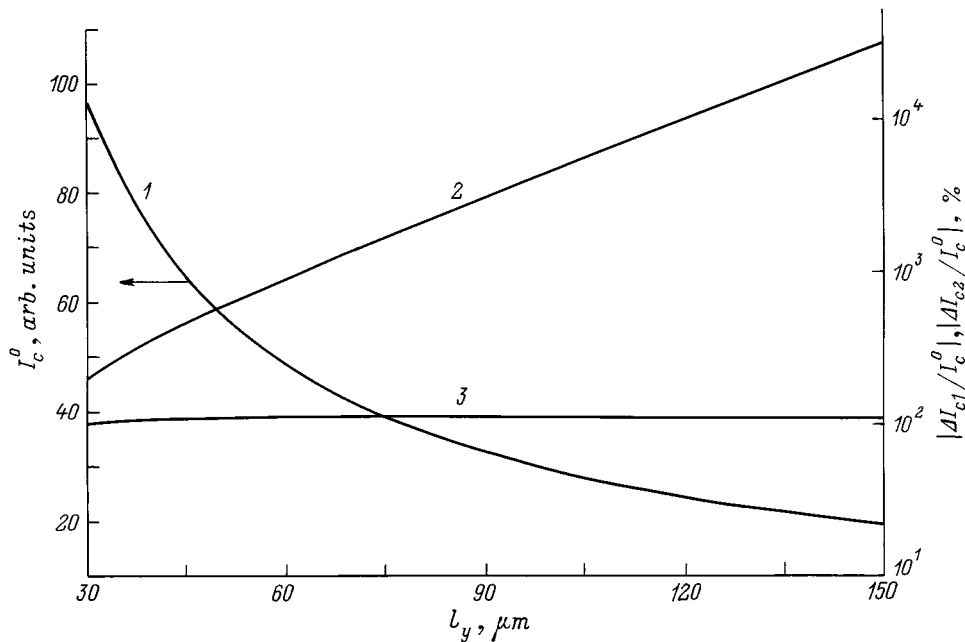


Рис. 6. Зависимости коллекторных токов (1) и их относительных изменений при деформации (2, 3) от ширины базы и эмиттера тензотранзистора при различных значениях параметра анизотропии a : 1 — 0; 2, 3 — 0.055.

На рис. 5 представлены аналогичные зависимости для поперечных распределений плотностей токов $j_z^0(y)$ и $j_z(y)$ и их относительных изменений с деформацией $\Delta j_z(y)$.

Зависимости, приведенные на рис. 4, 5, позволяют оптимизировать расположение коллекторов, их длину и ширину. В частности, для рассматриваемого случая кол-

лекторные переходы можно ограничить координатами $4 \leq x_{c1,c2} \leq 9$, $15 \leq y_{c1} \leq 35$ и $85 \leq y_{c2} \leq 105$.

На рис. 6 показаны величины коллекторных токов $I_{c1}^0 = I_{c2}^0 = I_c^0$ и их относительные изменения с деформацией $|\Delta I_{c1,c2} / I_c^0|$ в зависимости от ширины базы и эмиттера l_y . Как видно из рисунка, увеличение l_y в 3 раза ведет к увеличению относительного изменения тока

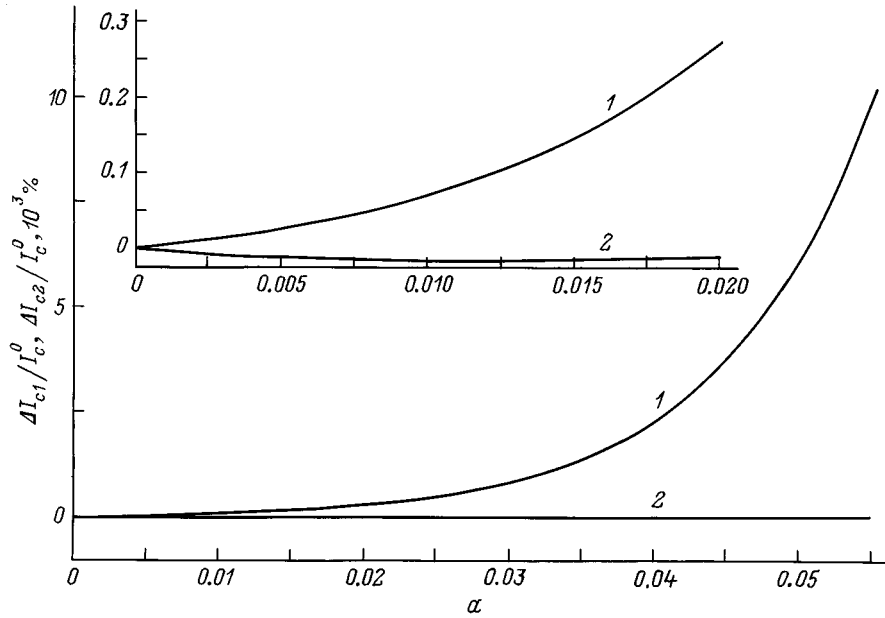


Рис. 7. Зависимости изменения коллекторных токов $\Delta I_{c1}/I_c^0$ (1), $\Delta I_{c2}/I_c^0$ (2) от величины параметра анизотропии a . На вставке — то же самое при малых значениях a .

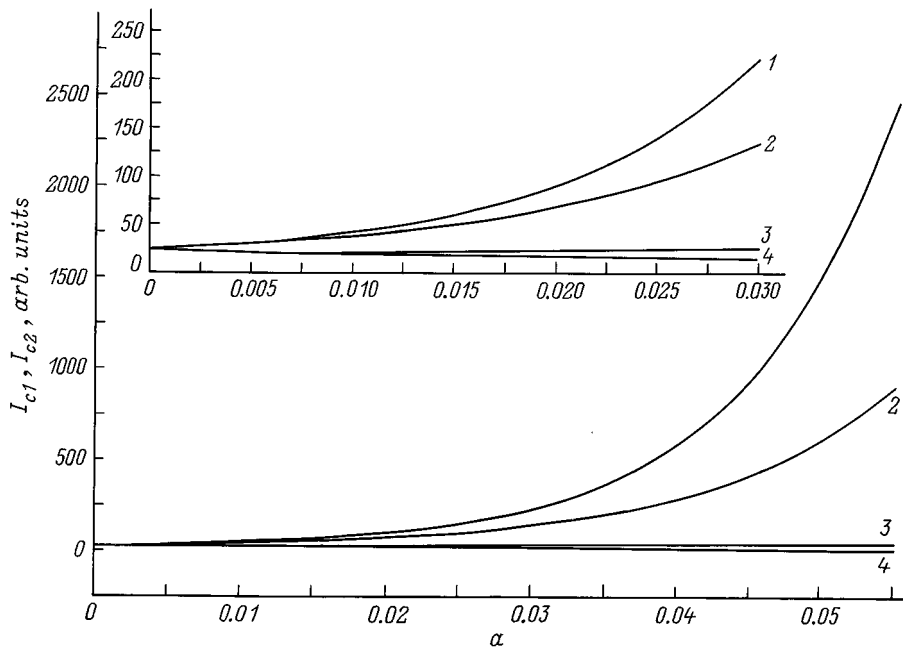


Рис. 8. Зависимости коллекторных токов I_{c1} , I_{c2} от величины параметра анизотропии: 1, 4 — влияние эффектов отклонения и модуляции инжекции; 2, 3 — влияние эффекта отклонения. На вставке — то же самое при малых значениях a .

коллектора, работающего в режиме обогащения неравновесными носителями тока, примерно в 50 раз, тогда как величина I_c^0 уменьшается в 2 раза. Следовательно, увеличение значения I_y является эффективным способом увеличения относительной чувствительности S_R .

На рис. 7 показаны зависимости относительных изменений коллекторных токов от величины параметра

анизотропии. При малых значениях параметра анизотропии ($|a| \leq 0.03$) ток одного из коллекторов увеличивается а другого — уменьшается (см. вставку на рис. 7). По мере роста абсолютной величины параметра a (при $|a| > 0.03$) наблюдается увеличение тока обоих коллекторов. Последнее можно объяснить тем, что при больших величинах $|a|$ неравновесные носители заряда,

инжектированные смещенной в прямом направлении частью p - n -перехода эмиттер-база, достигают обоих коллекторов. Следовательно, эффект модуляции инжекции значительно превышает эффект отклонения. Последнее подтверждается представленными на рис. 8 зависимостями токов коллекторов от величины параметра анизотропии при наличии и в отсутствии ($\Phi(x', y') = 0$) эффекта модуляции инжекции. Из зависимостей $I_{c1}(a)$, $I_{c2}(a)$ на рис. 8 следует, что при малых значениях параметра анизотропии изменения коллекторных токов обусловлены в основном эффектом отклонения, а при больших значениях $|a|$ ($|a| > 0.03$) эффект модуляции инжекции обуславливает рост тока одного из коллекторов более чем в 2 раза (рис. 8, кривые 1 и 3).

В заключение оценим величины S_A и S_R . Для типичных значений $R_c = 2 \text{ кОм}$, $I_c^0 = 1 \text{ мА}$ получаем $S_A = 6 \text{ мВ} \cdot \text{см}^2/\text{кгс}$ и $S_R = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кгс}$, что примерно в 2 раза превосходит соответствующие значения для n - p - n -тензотранзистора [4] при прочих равных условиях.

Список литературы

- [1] И.И. Бойко, В.А. Романов. ФТП, **11**, 817 (1977).
- [2] H.P. Baltes, R.S. Popovic. Proc. IEEE, **34**, 1107 (1986).
- [3] Г.Г. Бабичев, В.Н. Гузь, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов. ФТП, **26**, 1244 (1992).
- [4] С.И. Козловский. ФТП, **29**, 1783 (1995).
- [5] F.F. Fang, D.D. Tang. *Double carrier deflection high sensitivity magnetic sensor*. US Patent No 4939563 (1990).
- [6] Д.Д. Иваненко, А. Соколов. *Классическая теория поля* (М.-Л., ГИТТЛ, 1949) с. 432.
- [7] И.И. Бойко, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., **27**, 94 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

Vertical strain sensitive double-collector transistor with accelerating electrical fields in base and emitter

G.G. Babichev, S.I. Kozlovskiy, V.A. Romanov

Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
252028 Kyiv, Ukraine

Abstract Theoretical studies were made of the characteristics of a bipolar double-collector differential strain sensitive transistor with accelerating fields in base and emitter. The construction of such a transistor and its operating principle are described. The parameters of the device are optimised relative to higher sensitivity. It has been shown that output signal of the transistor results from two effects: carrier deflection and modulation of emitter injection by the transverse voltage in emitter.