

01;05;06;09

Кремниевый однопереходный тензотранзистор

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

Институт физики полупроводников НАН Украины,
03028 Киев, Украина
e-mail: mickle@semicond.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 14 мая 2001 г.)

Приведены результаты исследования однопереходного тензотранзистора на основе кремния. Тензотранзистор относится к тензочувствительным биполярным полупроводниковым приборам с горизонтальной структурой и входной (эмиттерной) вольт-амперной характеристикой S -типа. Определена оптимальная топология прибора, а также рассчитаны его основные характеристики. На основе однопереходного тензотранзистора могут быть созданы релаксационные генераторы с физически интегрированным преобразованием механического напряжения в изменение частоты выходного сигнала.

Однопереходный транзистор (или двухбазовый диод) представляет собой полупроводниковый прибор с одним p - n -переходом и двумя базовыми контактами. На статической вольт-амперной характеристике однопереходного транзистора (S -типа) имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Благодаря наличию такого участка однопереходные транзисторы используются для построения схем генераторов импульсов, линейно изменяющихся напряжений, пороговых устройств и преобразователей. Схемы, выполненные на однопереходных транзисторах, обычно проще и надежнее, чем схемы на диодных и биполярных транзисторах [1–3]. Эти преимущества делают их перспективными для разработки датчиков физических величин. Так, на основе однопереходных транзисторов, чувствительных к величине магнитного поля (однопереходных магнитотранзисторов), созданы датчики с выходным сигналом, частота которого зависит от величины магнитного поля [2,4].

В настоящей работе мы рассмотрим конструкцию и основные характеристики однопереходного тензотранзистора, на основе которого могут быть созданы датчики механических величин, прежде всего датчики давления с частотным выходом. Как известно [1,2,5], датчики с частотным выходным сигналом отличаются удобством сопряжения с цифровыми системами и повышенной помехозащищенностью вследствие слабой чувствительности частотно-модулированного сигнала к наводкам и помехам.

Однопереходный тензотранзистор может быть изготовлен методами стандартной интегральной технологии и размещен на планарной стороне профилированной кремниевой мембраны EE -типа (с двумя жесткими центральными островками) [6], которая трансформирует равномерно распределенную по ее поверхности нагрузку в одноосную упругую деформацию растяжения–сжатия той части мембраны, где расположен тензотранзистор. Топология однопереходного тензотранзистора, электрическая схема его включения и кристаллографическая ориентация показаны на рис. 1.

В отсутствие упругой деформации принцип работы рассматриваемого тензотранзистора такой же, как

и обычного однопереходного транзистора [1–3]. При приложении к базовым контактам разности потенциалов U_{bb} и отсутствии разности потенциалов между эмиттером и базовым электродом B_1 $U_e = 0$ через p - n -переход протекает малый обратный ток эмиттера $I_e = I_s$ (I_s — ток насыщения), обусловленный напряжением $U_{bb}\eta$, где $\eta = l_e/l_x$ — коэффициент передачи напряжения, или внутренний коэффициент деления; l_e — расстояние от эмиттера до базового электрода B_1 . Здесь и далее мы будем считать геометрические размеры эмиттера малыми по сравнению с соответствующими размерами базовой области тензотранзистора. По мере роста отрицательной разности потенциала U_e p - n -переход смещается в прямом направлении и эмиттер начинает инжектировать неравновесные электроны, которые уносятся тянущим полем к базовому электроду B_1 . Вследствие этого сопротивление первой базы R_{eb1} (сопротивление участка эмиттер–базовый электрод B_1) уменьшается, что приводит к дальнейшему увеличению прямого смещения эмиттерного перехода. Этот процесс имеет лавинообразный характер и заканчивается переходом тензотранзистора в открытое состояние. Схематично входная вольт-амперная (эмиттерная) характеристика однопереходного транзистора показана на рис. 2. Как видно, вольт-амперная характеристика имеет две важные для

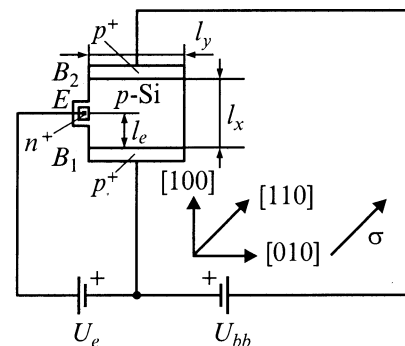


Рис. 1. Топология, схема включения и кристаллографическая ориентация однопереходного тензотранзистора. B_1 , B_2 — базовые электроды; E — эмиттер.

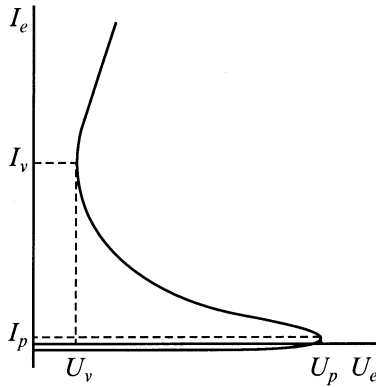


Рис. 2. Входная характеристика однопереходного транзистора.

практического применения точки: максимума (U_p, I_p) и минимума (U_v, I_v) напряжения, в которых производная $\partial U_e / \partial I_e$ обращается в нуль,

$$\frac{\partial U_e}{\partial I_e}(I_e = I_p) = 0 \text{ при } \frac{\partial^2 U_e}{\partial I_e^2}(I_e = I_p) < 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_e}{\partial I_e}(I_e = I_v) = 0 \text{ при } \frac{\partial^2 U_e}{\partial I_e^2}(I_e = I_v) > 0, \quad (2)$$

величины U_p, I_p и U_v, I_v — называют напряжениями и токами пика (включения) и впадины (насыщения) соответственно [1,2].

При одноосной упругой деформации в кристаллографическом направлении [110] исходно изотропная подвижность основных носителей заряда (дырок) μ_p в базовой области тензотранзистора становится анизотропной. Вследствие этого дрейф дырок в продольном тянущем электрическом поле базы (в x -направлении; рис. 1) сопровождается их отклонением в поперечном направлении и возникновением поперечной разности потенциалов V_y . Наведенная деформацией поперечная разность потенциалов будет модулировать инжекцию эмиттерного p - n -перехода, а значит и напряжение переключения однопереходного тензотранзистора в высокопроводящее состояние U_p .

Принцип действия описываемого однопереходного тензотранзистора формально эквивалентен принципу действия однопереходного магнитотранзистора, у которого холловское поле модулирует инжекцию эмиттера. Этот эффект в магнитотранзисторах получил название эффекта модуляции инжекции [7]. Следует заметить, что ранее исследованы однопереходные магнитотранзисторы, принцип действия которых основан на другом эффекте — эффекте отклонения [2,4]. В этих приборах магнитное поле модулирует сопротивление первой базы, отклоняя инжектированные эмиттером неравновесные носители к боковым поверхностям базовой области с высокой либо с малой скоростями поверхностной рекомбинации.

Для характеристики однопереходного тензотранзистора можно ввести следующие параметры абсолютной

и относительной тензочувствительности по напряжению включения S_{AP}, S_{RP} и напряжению насыщения или напряжению впадины S_{AV}, S_{RV} соответственно, определив их следующим образом:

$$S_{AP(AV)} = \left| \frac{\partial U_{p(v)}}{\partial \sigma} \right|_{\sigma \rightarrow 0},$$

$$S_{RP(RV)} = \frac{1}{U_{p(v)}} \left| \frac{\partial U_{p(v)}}{\partial \sigma} \right|_{\sigma \rightarrow 0}. \quad (3)$$

Здесь σ — механическое напряжение в базовой области тензотранзистора. Символ $\sigma \rightarrow 0$ означает, что указанные параметры определяются при малых значениях σ . С целью оптимизации топологии и геометрических размеров однопереходного тензотранзистора проведем расчет эмиттерной характеристики $U_e(I_e)$, а также величин U_p, I_p и U_v, I_v . Расчет проведем в приближении слабых однородных деформаций [6,8], когда параметр анизотропии достаточно мал $|a| \ll 1$

$$a(\sigma) = \Pi_{44}\sigma/2, \quad (4)$$

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

Ограничим базу однопереходного тензотранзистора координатами

$$0 < x < l_x, \quad 0 < y < l_y, \quad 0 < z < l_z. \quad (5)$$

Режим работы тензотранзистора рассмотрим в двух предельных случаях: малого и большого уровней инжекции в области первой базы тензотранзистора. При малых уровнях инжекции уравнение, описывающее эмиттерную характеристику однопереходного тензотранзистора, имеет вид

$$U_e(I_e) = \frac{T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_e}{I_s} \right) + I_e R_{eb1}(I_e) + U_{bb} [1 + R_{eb2}(I_e)/R_{eb1}(I_e)]^{-1} + V_y(\sigma)/2. \quad (6)$$

Здесь T — температура в энергетических единицах, e — заряд электрона, R_{eb2} — сопротивление второй базы (сопротивление участка эмиттера–базовый электрод B_2). Как следует из выражения (6), действие упругой деформации сводится к модуляции инжекции эмиттера поперечной разностью потенциалов $V_y(\sigma)$. При однородной деформации поперечная разность потенциалов описывается выражением [8]

$$V_y(\sigma) = a(\sigma) U_{bb} F(l_e, l_x, l_y), \quad (7)$$

где $F(l_e, l_x, l_y)$ — геометрический фактор,

$$F(l_e, l_x, l_y) = \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n]}{n^2} \times \sin \left(\frac{\pi n l_e}{l_x} \right) \tanh \left(\frac{\pi n l_y}{2 l_x} \right). \quad (8)$$

С учетом (7) эмиттерная характеристика однопереходного тензотранзистора принимает вид

$$U_e(I_e, \sigma) = \frac{T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_e}{I_s} \right) + I_e R_{eb1}(I_e) + U_{bb} \left\{ \frac{R_{eb1}(I_e)}{[R_{eb1}(I_e) + R_{eb2}(I_e)]} + \frac{a(\sigma)}{2} F(l_e, l_x, l_y) \right\}. \quad (9)$$

Проанализируем выражение (9). Согласно экспериментальным данным [1], величину сопротивления второй базы R_{eb2} в первом приближении можно считать независимой от величины тока эмиттера

$$R_{eb2}(I_e) \cong R_{eb2}(I_e = 0) = R_{eb2}. \quad (10)$$

В то же время зависимость $R_{eb1}(I_e)$ определяется рядом параметров [1,2]: геометрическими размерами базы, граничными условиями на контактах, пространственным распределением неравновесных носителей на участке базовой области $0 \leq x \leq l_e$ и др. Для стационарного случая система уравнений, описывающих пространственное распределение концентрации неравновесных носителей в приближении квазинейтральности имеет вид [2,3,9]

$$\frac{1}{e} \operatorname{div}(\mathbf{j}_p) + R - G_0 = 0, \quad (11)$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{j}) \equiv \operatorname{div}(\mathbf{j}_n + \mathbf{j}_p) = 0, \quad \operatorname{rot}(\mathbf{E}) = 0, \quad (12)$$

$$\mathbf{j}_p = e\mu_p p \mathbf{E} - eD_p \nabla p, \quad \mathbf{j}_n = e\mu_n n \mathbf{E} - eD_n \nabla n, \quad (13)$$

$$n - n_0 = p - p_0 = \Delta p. \quad (14)$$

Здесь n и p — концентрации электронов и дырок, n_0 и p_0 — их равновесные значения, μ_n , D_n и μ_p , D_p — подвижности и коэффициенты диффузии электронов (n) и дырок (p), \mathbf{j}_n и \mathbf{j}_p — плотности электронного и дырочного токов; величины R и G_0 являются темпами объемной рекомбинации и генерации, \mathbf{E} — электрическое поле. После исключения поля \mathbf{E} из уравнений (13) получаем выражение для плотности тока дырок

$$\mathbf{j}_p \cong \frac{\mathbf{j}}{b+1} - eD \nabla p, \quad (15)$$

где $D = 2bD_p/(b+1)$, $b = \mu_n/\mu_p$.

Дальнейшее рассмотрение проведем в предположении квазиодномерности пространственного распределения неравновесных носителей в базе, а ограничение размера базовой области тензотранзистора в yz -плоскости учтем введением эффективного времени жизни τ_{eff} и соответствующей ему диффузионной длины $L = \sqrt{D\tau_{\text{eff}}}$ [10,11]. Согласно [12], эффективное значение L в нашем случае ($l_x, l_y \gg l_z$) ограничено толщиной базы $L \approx l_z$. Подставляя выражение для плотности тока дырок (15) в уравнение (11), получаем при принятых упрощениях уравнение для их концентрации

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_0}{L^2} = 0. \quad (16)$$

Граничные условия примем в виде

$$\frac{\partial p}{\partial x}(x = l_e) = \frac{I_e}{eS_e D(b+1)}, \quad (17)$$

$$p(x = 0) = p_0. \quad (18)$$

Здесь S_e — площадь эмиттерного перехода. Условие (17) следует из выражения для плотности тока дырок (14) и означает отсутствие дырочной компоненты тока на границе эмиттерного p - n -перехода. Решение задачи (16)–(18) имеет вид

$$p(x) = p_0 + \frac{I_e L \sinh(x/L)}{eD_n S_e (b+1) \cosh(l_e/L)}. \quad (19)$$

Режим малого уровня инжекции накладывает ограничение на величину эмиттерного тока в выражении (19)

$$I_e \ll eD_n S_e (b+1) p_0 / L \tanh(l_e/L). \quad (20)$$

Сопротивление первой базы находим интегрированием

$$R_{eb1}(I_e) = \frac{\rho_0}{S_b} \int_0^{l_e} \frac{dx}{[1 + (b+1)\Delta p(x, I_e)/p_0]}. \quad (21)$$

Здесь ρ_0 — удельное сопротивление базы в отсутствие инжекции, S_0 — площадь поперечного сечения базы. Вычисление интеграла (21) приводит к следующему результату:

$$R_{eb1}(I_e) = \frac{R_{eb1}(I_e = 0)L}{l_e \sqrt{1 + P(I_e)^2}} \times \ln \left\{ \frac{1 + [P(I_e) + \sqrt{1 + P(I_e)^2}] \tanh(l_e/2L)}{1 + [P(I_e) - \sqrt{1 + P(I_e)^2}] \tanh(l_e/2L)} \right\}, \quad (22)$$

где $P(I_e) = I_e/I_0$, $I_0 = eDS_e p_0 \cosh(l_e/L)/L$.

Для расчета напряжения пика U_p по формуле (9) кроме зависимости $R_{eb1}(I_e)$ и величины тока I_p необходимо определить значение геометрического фактора $F(l_e, l_x, l_y)$. Зависимость величины $F(l_e, l_x, l_y)$ от размеров базовой области и положения эмиттера показана на рис. 3. Как видно, величина геометрического фактора максимальна при $l_x \cong l_y$ и $l_e = l_x/2$. Полученные соотношения для величин l_x , l_y , l_e соответствуют однородному случаю, когда упругая деформация постоянна в пределах базы тензотранзистора. Расчет величин поперечной разности потенциалов $V_y(\sigma)$ и геометрического фактора для неоднородного случая приведен в работах [8,13].

С целью упрощения расчетов воспользуемся следующим экспериментальным фактором [1]: зависимость сопротивления первой базы от тока эмиттера в широком интервале величин I_e можно аппроксимировать выражением вида [2,4]

$$R_{eb1}(I_e) = \frac{R_{eb1}(I_e = 0)}{1 + \xi I_e}, \quad (23)$$

где ξ — аппроксимирующий коэффициент.

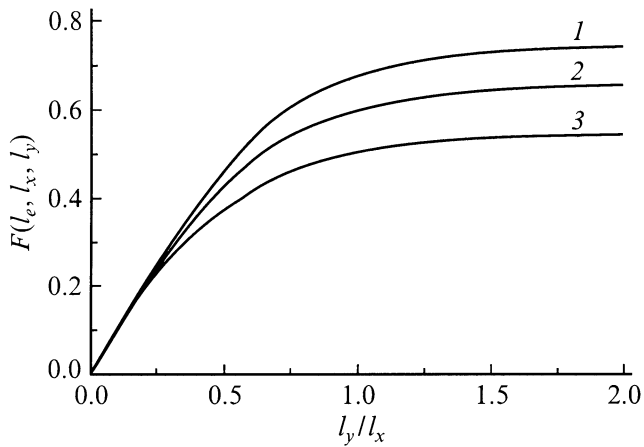


Рис. 3. Зависимость величины геометрического фактора от размера базы тензотранзистора. Положения эмиттера l_e/l_x : 1 — 0.5, 2 — 0.3, 3 — 0.8.

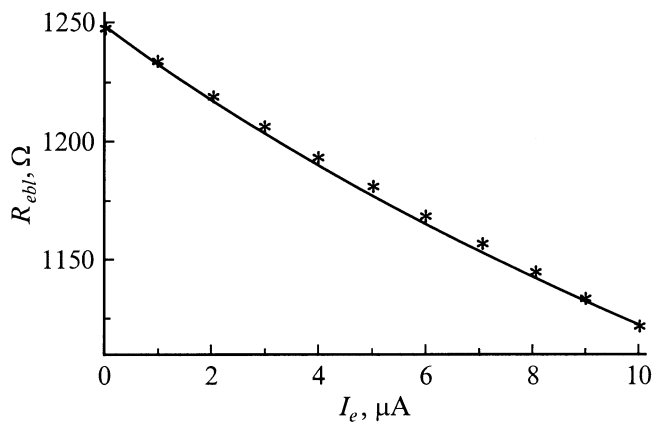


Рис. 4. Зависимости сопротивления первой базы от величины тока эмиттера. Сплошная кривая — расчет по формуле (22), звездочки — аппроксимирующая зависимость по формуле (23).

На рис. 4 показана зависимость сопротивления первой базы R_{eb1} от тока эмиттера, рассчитанная по формулам (22) и (23). Видно, что зависимость $R_{eb1}(I_e)$ хорошо аппроксимируется выражением (23) при величине $\xi = 1.11 \cdot 10^4 \text{ A}^{-1}$. Расчет зависимости $R_{eb1}(I_e)$ по формуле (22) выполнен для базовой области тензотранзистора размером $l_x \times l_y \times l_z (\mu\text{m})$: $100 \times 100 \times 10$ и при следующих электрофизических параметрах кристалла кремния (при 300 К): $D_n = 35 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$, $D_p = 13 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$, $\rho_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $n_i = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Выражение для тока пика находим, подставляя зависимость (23) в выражение для входной характеристики (9) и приравнявая нулю первую производную эмиттерной характеристики (см. выражение (1)). Тогда при малых уровнях инжекции ($I_e \xi \ll 1$) выражение для величины тока пика I_p имеет вид

$$I_p \cong \frac{T}{2[U_{bb}\eta(1-\eta)\xi - R_{eb1}(I_e = 0)]}. \quad (24)$$

При известном значении тока I_p величину напряжения пика легко найти из выражения для входной характеристики (9). На рис. 5 представлена расчетная зависимость напряжения пика от величины параметра анизотропии a . Как видно, зависимость $U_p(a)$ имеет линейный характер, что важно с точки зрения практического применения тензотранзистора.

Согласно (3), (9), абсолютная тензочувствительность по напряжению включения S_{AP} не зависит от тока эмиттера

$$S_{AP} = \frac{\Pi_{44}}{4} U_{bb} F(l_e, l_x, l_y), \quad (25)$$

при $\Pi_{44} = 1.4 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ и $U_{bb} = 4 \text{ V}$ получаем значение $S_{AP} \cong 10^{-9} \text{ V/Pa}$.

Зависимость относительной тензочувствительности по напряжению включения S_{RP} от разности потенциалов U_{bb} показана на рис. 6, откуда видно, что с ростом величины U_{bb} значение тензочувствительности S_{RP} стремится к насыщению (кривая 1), в то время как абсолютная величина напряжения пика линейно возрастает (кривая 2).

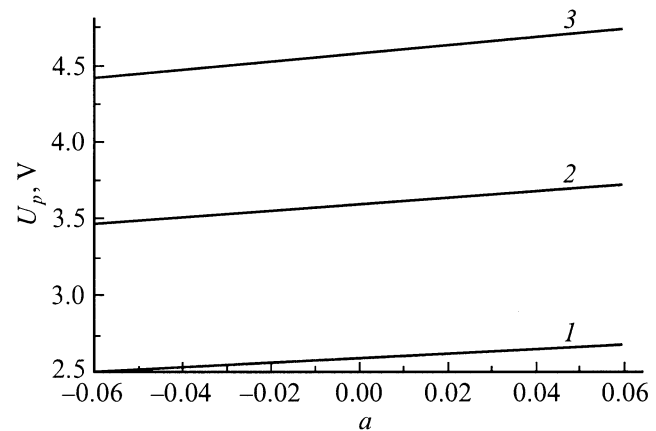


Рис. 5. Зависимость напряжения пика от величины параметра анизотропии. U_{bb}, V : 1 — 4, 2 — 6, 3 — 8.

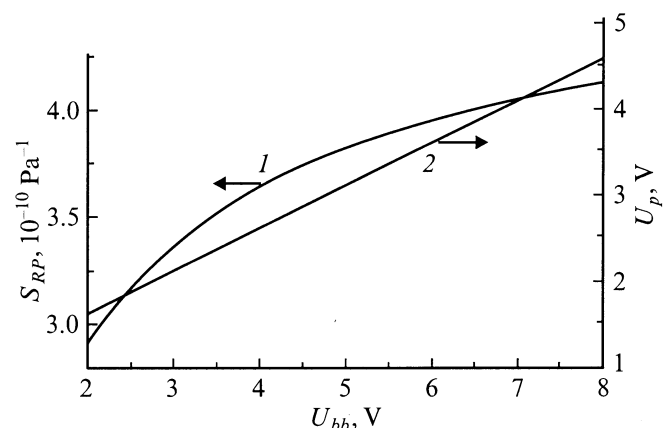


Рис. 6. Зависимости относительной тензочувствительности по напряжению включения (1) и величины напряжения включения (2) от разности потенциалов U_{bb} .

При высоких уровнях инжекции ($I_e \xi \gg 1$) вследствие эффекта закорачивания величиной поперечной разности потенциалов V_y в выражении (6) можно пренебречь $V_y(\sigma) \approx 0$ и эмиттерная характеристика тензотранзистора принимает вид

$$U_e(I_e) = \frac{T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_e}{I_s} \right) + (I_e + I_{bb}) R_{eb1}(I_e), \quad (26)$$

где $I_{bb} = U_{bb}/(R_{eb2} + R_{eb1}) \cong U_{bb}/R_{eb2}$ — межбазовый ток.

Подставляя аппроксимирующую зависимость (23) в формулы (26) и (2), получаем следующее выражение для тока впадины:

$$I_v \cong \frac{2[U_{bb}\xi\eta - R_{eb1}(I_e = 0)(1 - \eta)]}{T\xi^2(1 - \eta)}. \quad (27)$$

Величину напряжения впадины U_v легко получить подстановкой значения тока I_v в выражение для эмиттерной характеристики (26).

Подобно однопереходным магнитотранзисторам [2,4] при высоком уровне инжекции в предлагаемой конструкции тензотранзистора одноосная упругая деформация также может модулировать сопротивление первой базы R_{eb1} из-за эффекта отклонения, когда в силу наведенной деформацией анизотропии подвижности дырок неравновесные носители отклоняются к ближней либо дальней по отношению к эмиттеру боковым поверхностям базы (рис. 1). Следствием эффекта отклонения может быть зависимость напряжения и тока впадины от величины упругой деформации. Необходимым условием для этого является превосходство поперечного поля E_y над диффузионным [9,10,14]

$$E_y \cong aE_x > \frac{T}{eL}, \quad (28)$$

где E_x — продольное тянущее поле.

В соответствии с неравенством (28) величина параметра анизотропии, при которой дрейфовое поле превышает диффузионное, равна

$$a > \frac{l_e T}{eLU_v} \cong 0.1. \quad (29)$$

Поскольку в рассматриваемом случае максимальное значение параметра анизотропии несколько меньше $a = 0.06$ (что соответствует величине упругого механического напряжения 86 МПа), то влияние механического напряжения на величины U_v , I_v будет пренебрежимо мал.

Кратко рассмотрим схемы преобразователей механических величин (давления, силы, ускорения) на однопереходных тензотранзисторах. Подобно схемам на однопереходных транзисторах [1–3,15], в схемах с использованием однопереходных тензотранзисторов также возможно использование любого из известных режимов: усиления, генерации синусоидальных и релаксационных

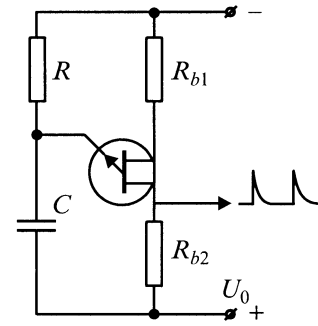


Рис. 7. Схема простейшего мультивибратора на однопереходном тензотранзисторе.

колебаний, переключения, детектирования и др. Наиболее удобны однопереходные тензотранзисторы для применения в переключающих устройствах и схемах релаксационных генераторов.

На рис. 7 показана схема простейшего мультивибратора на однопереходном тензотранзисторе, частота которого зависит от величины упругого механического напряжения в базе тензотранзистора. В установившемся режиме период колебаний мультивибратора равен [1–4]

$$T(\sigma) = RC \ln \left[\frac{U_v - U_0}{U_p(\sigma) - U_0} \right]. \quad (30)$$

Зависимость частоты выходного сигнала мультивибратора от величины упругого механического напряжения в базовой области однопереходного тензотранзистора представлена на рис. 8.

Таким образом, в результате проведенного анализа получены выражения, описывающие величины тока (напряжения) переключения и впадины на входной характеристике кремниевого однопереходного тензотранзистора, а также проведена оценка их зависимости от

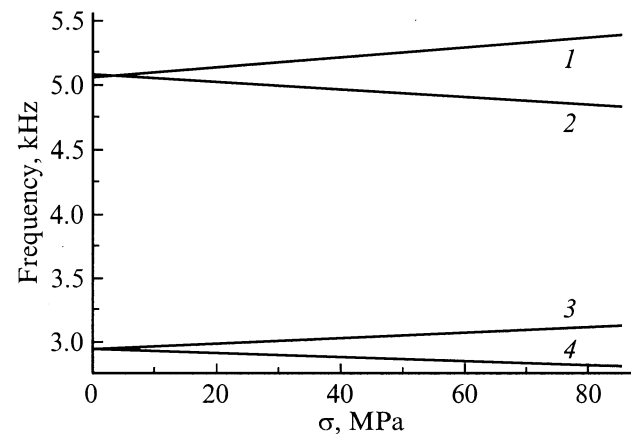


Рис. 8. Расчетная зависимость частоты генерации мультивибратора по схеме на рис. 7 от величины упругого одноосного механического напряжения сжатия (1, 3) и растяжения (2, 4) в базовой области тензотранзистора. U_{bb} (В): 1,2 — 6; 3,4 — 4. Расчет выполнен для $RC = 10^{-3}$ с, $U_0 = 10$ В.

значения механического напряжения в базовой области тензотранзистора, разности потенциалов между базовыми электродами, геометрических размеров базы.

Список литературы

- [1] Недолужко И.Г., Сергиенко Е.Ф. Однопереходные транзисторы. М.: Энергия, 1974. 101 с.
- [2] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [4] Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Гальваномагнитные приборы. М.: Радио и связь, 1983. 104 с.
- [5] Гуменюк С.В., Подлепецкий Б.И. Зарубежная электронная техника. 1989. Вып. 12 (343). С. 3–48.
- [6] Бабичев Г.Г., Жадько И.П., Козловский С.И. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 9. С. 84–89.
- [7] Baltés H.P., Popović R.S. // Proc. IEEE Trans. 1986. Vol. 74. N 8. P. 1107–1132.
- [8] Бойко И.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. Киев, 1994. Вып. 27. С. 94–98.
- [9] Бойко И.И., Романов В.А. // ФТП. 1977. Т. 11. Вып. 5. С. 817–835.
- [10] Gribnikov Z.S., Lotova G.I., Romanov V.A. // Phys. Stat. Sol. 1968. Vol. 28. P. 815–825.
- [11] Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1970. 416 с.
- [12] Бабичев Г.Г., Гузь В.Н., Жадько И.П. и др. // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 7. С. 1244–1250.
- [13] Zhadko I.P., Babichev G.G., Kozlovskiy S.I. et al. // Sensors and Actuators. 2001. Vol. 90. N 1–2. P. 89–95.
- [14] Грибников З.С., Литовский Р.Н. // ФТП. 1980. Т. 14. Вып. 4. С. 675–679.
- [15] Горяинов С.А., Абезгауз И.Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1967. 200 с.