

©1995 г.

КРЕМНИЕВЫЙ ДВУХКОЛЛЕКТОРНЫЙ $n-p-n$ -ТЕНЗОТРАНЗИСТОР С УСКОРЯЮЩИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В БАЗЕ

С.И.Козловский

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252650, Киев, Украина
(Получена 11 июля 1994 г. Принята к печати 13 января 1995 г.)

Проведен расчет пространственных распределений электрического потенциала и концентрации неравновесных носителей заряда в базовой области двухколлекторного тензотранзистора с протяженным эмиттером. На основе расчета определена оптимальная топология тензотранзистора. Показано, что выходной сигнал тензотранзистора обусловлен двумя эффектами: эффектом поперечного отклонения неравновесных носителей заряда и модуляции инжекции. Причем вклад последнего возрастает с увеличением ширины эмиттерного $n-p$ -перехода.

1. Ранее [1] был описан кремниевый тензопреобразователь, чувствительным элементом которого является двухколлекторный $p-n-p$ -транзистор с ускоряющим электрическим полем в базовой области. Мерой внешнего механического воздействия в таком преобразователе является величина разбаланса коллекторных токов, вызываемая эффектом поперечного отклонения неосновных носителей заряда (дырок), инжектируемых эмиттерным переходом и дрейфующих в продольном поле базы. Возникающее при деформации базы отклонение электронно-дырочных пар от одного из коллекторов к другому обусловлено только величинами недиагональных компонент тензора подвижности дырок, поскольку в данной конструкции преобразователя аналогичные компоненты тензора электронной подвижности практически равны нулю. Отсюда следует, что в исследованном $p-n-p$ -транзисторе ускоряющее поле в базовой области практически не меняет своего направления под воздействием внешнего механического напряжения, так что указанный выше эффект поперечного отклонения дырок является действительно единственным эффектом, определяющим работу прибора в целом [1].

Качественно иная ситуация возникает в конструктивно аналогичном преобразователе на основе двухколлекторного $n-p-n$ -транзистора. В данном случае при воздействии упругой деформации дрейф основных носителей (дырок) приводит к появлению поперечной составляющей ускоряющего электрического поля. В этих условиях также возникает эффект отклонения инжектированных неосновных носителей

(электронов) от одного коллектора к другому, однако это отклонение вызвано не анизотропией электронной подвижности, а указанной выше поперечной компонентой ускоряющего электрического поля. Помимо этого наведенная деформацией поперечная разность потенциалов в базовой области может существенно модулировать эффективность локальной инжекции электронов протяженным эмиттерным переходом, что будет вносить дополнительный вклад в рассогласование коллекторных токов, которыми определяется как абсолютная чувствительность, так и эффективность преобразования тензотранзистора.

В настоящем сообщении приводится анализ работы такого кремниевое $n-p-n$ -тензотранзистора. При этом основное внимание уделено изучению сравнительного влияния двух эффектов (поперечного отклонения и модуляции инжекции неосновных носителей заряда) на основные характеристики тензотранзистора. Принцип действия описываемого здесь тензотранзистора формально эквивалентен принципу работы аналогичного магнитотранзистора [2,3], у которого холловское поле модулирует процесс инжекции неосновных носителей заряда и дополнительно обуславливает их отклонение к одному из коллекторов.

2. Топология тензотранзистора представлена на рис. 1. Как и ранее [1], будем полагать, что тензотранзистор располагается на мембране, трансформирующей равномерно распределенную по ее поверхности нагрузку в одноосную деформацию сжатия (растяжения) его базовой области. В результате деформации подвижность основных носителей заряда (дырок) u_p становится анизотропной в плоскости xy с отличными от нуля недиагональными компонентами u_{pxy} .

Теоретический анализ работы тензотранзистора проведем в приближениях:

а) слабого уровня инжекции, когда в любой точке базы $p-p_0 \simeq n-n_0 \ll p_0$, где n и p — полные, а n_0 и p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок;

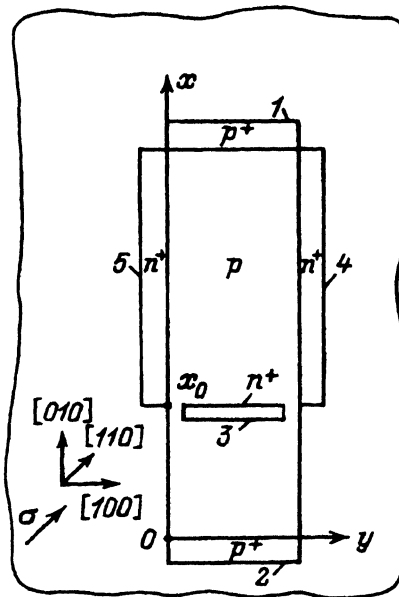


Рис. 1. Топология тензотранзистора: 1, 2 — базовые электроды, 3 — эмиттер, 4, 5 — коллекторы; σ — направление одноосного напряжения.

б) слабых деформаций, когда параметр анизотропии

$$a = -u_{pxy}/u_{pyy}$$

достаточно мал, т. е. $|a| \ll 1$. Ограничим базу тензотранзистора координатами $0 \leq x \leq l_x$, $0 \leq y \leq l_y$, $0 \leq z \leq l_z$. Тогда пространственные распределения потенциала φ и концентрации носителей заряда описываются уравнениями

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

$$D_n \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + 2\alpha_x \frac{\partial n}{\partial x} + 2\alpha_y \frac{\partial n}{\partial y} \right) - \frac{n - n_0}{\tau} = \rho(x', y') \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\varphi(0, y) = 0, \quad \varphi(l_x, y) = \varphi_1, \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} + a \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) (x, 0, l_y, z) = 0, \quad (4)$$

$$n(0, y, z) = n(l_x, y, z) = n(x, l_y, z) = n(x, 0, z) = n(x, y, l_z) = n_0, \quad (5)$$

$$D_n \frac{\partial n}{\partial z} (x, y, 0) = s(n - n_0), \quad (6)$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов, τ — время жизни неравновесных носителей, s — скорость поверхностной рекомбинации,

$$\alpha_x = eE_x/2T, \quad \alpha_y = eE_y/2T, \quad E_x = -\partial\varphi/\partial x, \quad E_y = -\partial\varphi/\partial y,$$

T — температура в энергетических единицах.

В нашем случае плотность источника неравновесных носителей $\rho(x', y')$ описывается выражением

$$\rho(x', y') = n_0 \left\{ \exp[\alpha(x', y')] - 1 \right\}, \quad (7)$$

$$\alpha(x', y') = e \left[\varphi_0 + E_x x' + E_y (y' - l_y/2) \right] / T, \quad (8)$$

где φ_0 — напряжение начального смещения эмиттерного n - p - n -перехода.

Решение задачи (1), (3), (4) для потенциала φ имеет вид [4]

$$\varphi(x, y) = \varphi_1 \left[x/l_x + a\varphi_2(x, y) \right], \quad (9)$$

$$\varphi_2(x, y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n x}{l_x}}{n^2} [(-1)^n - 1] \frac{\operatorname{sh} \left[\frac{\pi n}{l_x} \left(y - \frac{l_y}{2} \right) \right]}{\operatorname{ch} \left(\frac{\pi n l_y}{2 l_x} \right)}. \quad (10)$$

На основе выражений (8), (9) можно оптимизировать как геометрические размеры базы тензотранзистора, так и положение эмиттера.

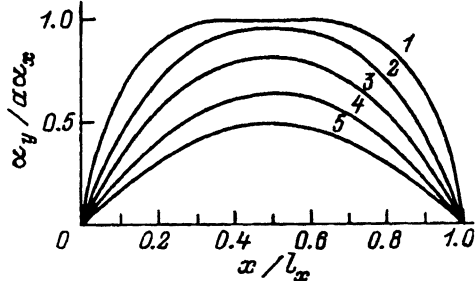


Рис. 2. Распределение нормированного значения поперечного поля по длине базы при различных соотношениях l_y/l_x : 1 — 0.2, 2 — 0.4, 3 — 0.6, 4 — 0.8, 5 — 1.0.

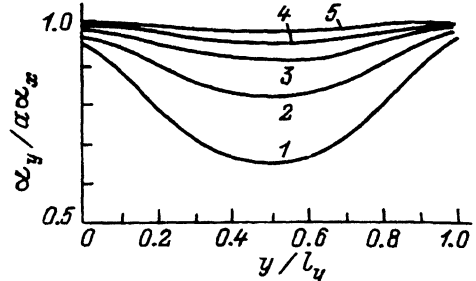


Рис. 3. Распределение нормированного значения поперечного поля по ширине базы (для $l_y/l_x = 0.25$) при различных значениях y/l_y : 1 — 0.1, 2 — 0.15, 3 — 0.2, 4 — 0.25, 5 — 0.3.

На рис. 2, 3 показаны пространственные распределения приведенной величины поперечного поля (параметра $\alpha_y/a\alpha_x$) для различных соотношений l_y/l_x и x/l_x . Как видно из рисунков, максимальная величина достигается при следующих соотношениях: $l_y/l_x \approx 0.25$, $0.25 < x/l_x < 0.75$. Из рис. 2 также следует, что в интересующей нас области базы можно считать

$$E_x \approx \varphi_1/l_x, \quad E_y \approx aE_x.$$

С учетом принятых упрощений функцию источника для задачи (2), (5), (6) при $x > x_0$ можно представить в виде

$$n(x, y, z, x', y', z') = (4l_x/D_n l_y l_z) \exp[\alpha_x(x - x') + \alpha_y(y - y')] \times \\ \times \sum_{m,k=1}^{\infty} \frac{\sin q_k z - q_k A(z)}{\beta_{mk} \operatorname{sh} \beta_{mk}} \operatorname{sh} \left[\beta_{mk} \left(1 - \frac{x}{l_x} \right) \right] \times \\ \times \operatorname{sh}(\beta_{mk} x'/l_x) \sin(q_m y) \sin(q_m y') \sin(q_k z'), \quad (11)$$

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

$$A(z) = L \left(e^{(2l_x - z)/L} - e^{z/l_x} \right) / \left[S - 1 - (S + 1)e^{2l_x/L} \right], \quad (12)$$

$$S = sL/D, \quad L = \sqrt{D_n \tau}.$$

Тогда выражение для концентрации неравновесных носителей находим интегрированием по объему эмиттера V_e :

$$n(x, y, z) = \iiint_{x', y', z' \in V_e} dx' dy' dz' \rho(x', y') n(x, y, z, x', y', z'). \quad (13)$$

3. Дальнейшее рассмотрение проведем для следующих размеров (все размеры в мкм): базы $l_x \times l_y \times l_z = 200 \times 50 \times 10$, эмиттера $l'_x \times l'_y \times l'_z = 4 \times 40 \times 3$, $x_0 = 42$, $L = 30$, глубина залегания коллекторных переходов — 3 мкм. Тянущее поле равно $E_x = 500$ В/см, скорость поверхностной рекомбинации $S = 0$. Параметр анизотропии $a = \pi_{44}\sigma/2$, где π_{44} — сдвиговый пьезорезистивный коэффициент для p-Si.

В расчетах выбрано значение $a = 0.055$, чему соответствует одноосное напряжение $\sigma = 800 \text{ кг/см}^2$. Возможные изменения в каждом конкретном случае оговариваются особо. Заметим, что условие малого уровня инжекции накладывает ограничения на величину l'_y :

$$l'_y \ll \ln\left(\frac{p_0}{n_0} + 1\right) / \alpha_y. \quad (14)$$

В обратном случае генерируемые n - p -переходом неравновесные носители будут закорачивать поперечное поле и модуляция инжекции исчезает. Важным для наблюдения эффекта модуляции инжекции является выбор начального напряжения смещения эмиттерного n - p -перехода, которое должно обеспечивать достаточно малый уровень инжекции при отсутствии анизотропии электропроводности. Для нашего случая выбираем величину

$$\varphi_0 \simeq E_x(l_x + |a|l'_y - x_0),$$

при этом каждая точка эмиттерного n - p -перехода смещена в прямом направлении разностью потенциалов $\sim (5 \div 6)T/e$.

На рис. 4 показаны поперечные распределения концентрации неравновесных носителей заряда в базе тензотранзистора, вдоль линии, задаваемой координатами в мкм: $(80, y, 3)$. Видно, что в отсутствие 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. На этом же рисунке для сравнения показано распределение концентрации неравновесных носителей, обусловленное только лишь эффектом поперечного отклонения (кривая 3). Как видно из рисунка, влияние эффекта модуляции инжекции на перераспределение носителей тока значительно сильнее.

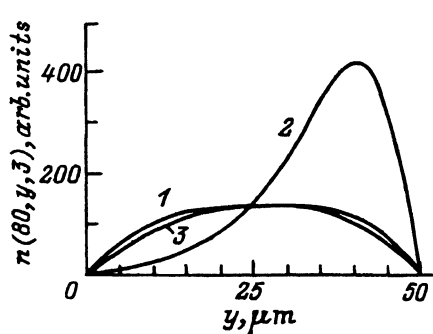


Рис. 4. Поперечное распределение концентрации неравновесных носителей при различных значениях параметра анизотропии a : 1 — 0, 2, 3 — 0.055.

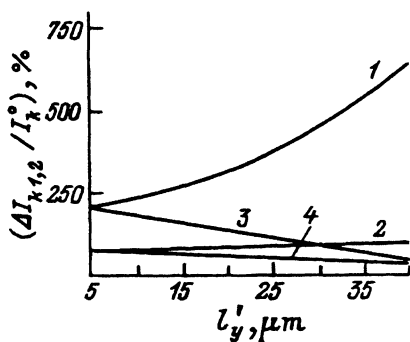


Рис. 5. Относительные изменения коллекторных токов при деформации в зависимости от ширины эмиттера для двух случаев: 1, 2 — влияние эффекта отклонения и модуляции инжекции; 3, 4 — влияние эффектов отклонения.

$$I_{k1,2} = -e \int_{x_0}^{l_x} dx \int_0^{l_z} D_n \frac{\partial n}{\partial y} \Big|_{y=c, l_y} dz. \quad (15)$$

На рис. 5 показаны относительные изменения коллекторных токов $\Delta I_{k1,2}/I_k^0$ ($I_{k1}^0 = I_{k2}^0 = I_k^0$ при $a = 0$) с деформацией в зависимости от ширины эмиттерного $n-p$ -перехода для двух случаев: при наличии (кривые 1, 2) и отсутствии (кривые 3, 4) эффекта модуляции инжекции. Как уже отмечалось выше, в нашем случае изменение тока коллекторов обусловливается двумя эффектами: во-первых, поперечного отклонения неравновесных носителей к одному из коллекторов (в зависимости от знака a) в поперечном поле E_y , которое создают при дрейфе основные носители заряда (дырки), и, во-вторых, эффектом модуляции инжекции эмиттера. Для различных величин ширины эмиттерного перехода l'_y вклад этих эффектов в изменение коллекторного тока при деформации различен. При малых значениях l'_y эффект модуляции инжекции мал, и весь эффект обусловлен поперечным отклонением носителей заряда. С ростом l'_y при прочих равных условиях вклад эффекта отклонения падает, а модуляции инжекции увеличиваются. Такой ход кривых согласуется с данными работы [3], полученными для двухколлекторного магнитотранзистора.

Очевидно, что наиболее эффективного улучшения выходных характеристик тензотранзистора можно достичь при увеличении ускоряющего электрического поля в базе (см. зависимость $\Delta I_{k1,2}/I_k^0$ от E_x на рис. 6). На рис. 7 показаны зависимости $I_{k1,2}$ от величины параметра анизотропии для двух случаев, при наличии и отсутствии эффекта модуляции инжекции (кривые 3, 4 и 1, 2 соответственно). Как видно из рисунка, зависимость $I_{k1,2}(a)$ при модуляции инжекции имеет ярко выраженный нелинейный характер.

Результаты исследования характеристик тензотранзистора от длины диффузионного смещения носителей и скорости их рекомбинации на планарной поверхности базы практически не отличаются от приведенных в [1].

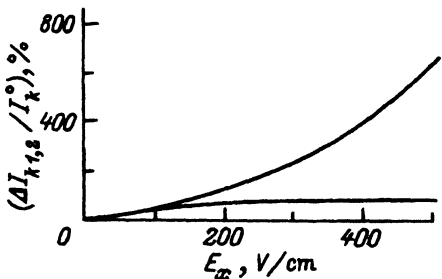


Рис. 6. Полевая зависимость относительного изменения тока коллекторов.

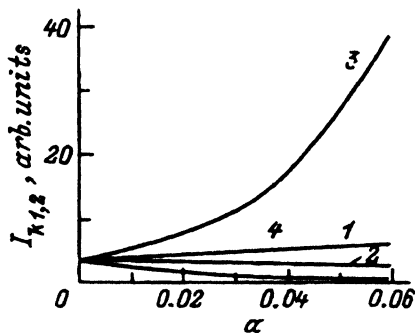


Рис. 7. Зависимость изменения коллекторных токов от параметра анизотропии: 1, 2 — влияние эффекта отклонения; 3, 4 — влияние эффектов отклонения и модуляции инжекции.

Автор благодарен И.П.Жадько и В.А.Романову за помощь при выполнении работы и обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] Г.Г. Бабичев, В.Н. Гузь, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов. ФТП, **26**, 1244 (1992).
- [2] H.P. Baltes, R.S. Popovic. Proc. IEEE, **34**, 1107 (1986).
- [3] И.П. Викулин, М.А. Глауберман, В.В. Егоров, Н.А. Канищева. ЖТФ, **59**, 170 (1989).
- [4] И.И. Бойко, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов. Оптоэлектрон. и полупроводн. техника, **27**, 94 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

A silicon double-collector strain transistor with accelerating base electric field

S.I.Kozlovsky

Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Sciences, 252650 Kiev, the Ukraine
