

## ТЕНЗОТИРИСТОР С УСКОРЯЮЩИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ПЕРВОЙ БАЗЕ

© С.И.Козловский

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
252650 Киев, Украина  
(Получена 27 марта 1995 г. Принята к печати 15 сентября 1995 г.)

Проведен расчет напряжения включения, токов включения и удержания  $p^+ - n - p - n^+$ -тензотиристора. Расчет выполнен на основе двухтранзисторной модели, причем один из составляющих транзисторов является тензотранзистором с ускоряющим электрическим полем в базовой области. Полученные расчетные соотношения позволяют оптимизировать топологию тензотиристора и выбрать режим его работы.

Вопросы разработки микроэлектронных устройств, способных заменить различного рода контактные переключатели, являются весьма актуальными. Разработан ряд бесконтактных полупроводниковых переключателей тока, осуществляющих коммутацию выходной цепи под действием магнитного поля (магнитотиристоры) [1-3] и света (фототиристоры) [2].

В настоящей работе проведен расчет основных характеристик тиристора, коммутирующего внешнюю цепь под действием деформирующих усилий. Тензотиристор может быть изготовлен методами стандартной интегральной технологии на планарной стороне (профилированной) кремниевой мембраны, которая трансформирует равномерно распределенную по ее поверхности нагрузку в одноосную деформацию растяжения-сжатия той части мембраны, где расположен тензотиристор. Топология тензотиристора (для определенности типа  $p^+ - n - p - n^+$ ), электрическая схема его включения и кристаллографическая ориентация представлены на рис. 1. Конструктивно тензотиристор можно рассматривать как двухколлекторный тензотранзистор [4,5], в коллекторные области которого встроены дополнительные  $p - n$ -переходы. Расчет напряжения переключения, а также токов переключения и выключения (удержания) тиристора проведем в рамках двухтранзисторной модели [6-8] при следующих предположениях:

а) один из составляющих транзисторов является тензотранзистором с ускоряющим электрическим полем в базе;

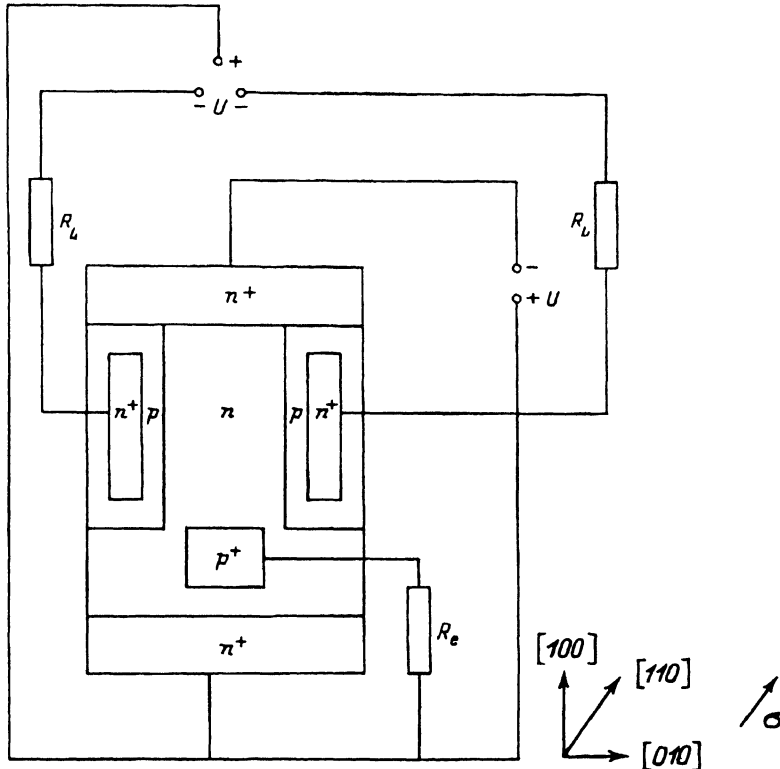


Рис. 1. Топология, кристаллографическая ориентация и схема включения тензотиристора.

б) токи рекомбинации  $I_{nr,pr}$  в прямо смещенных эмиттерных  $n-p$ - и  $p-n$ -переходах зависят от падения напряжения  $U$  на них по экспоненциальному закону

$$I_{nr,pr} = I_{nr,pr}^0 \exp(eU/2T), \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $T$  — температура в энергетических единицах;

в) при переключении тиристора пробой центрального (плавного)  $p-n$ -перехода имеет лавинный характер при равных коэффициентах лавинного умножения электронов и дырок.

Следуя [6,8], будем полагать, что величины коэффициентов передачи эмиттерных токов  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  — для составляющих  $p-n-p$  и  $n-p-n$ -транзисторов соответственно — связаны с протекающим через тиристор током  $I$  соотношением:

$$\alpha_{n,p}(I) = \alpha_{n,p}^0 \left( (1 + G_{n,p}I)^{1/2} - 1 \right)^2 / G_{n,p}I. \quad (2)$$

Здесь

$$\alpha_{n,p}^0 = \gamma_{n,p}^0 \beta_{n,p}, \quad (3)$$

$$G_{n,p} = 4I_{n,p}^0 / \gamma_{n,p}^0 (I_{nr,pr}^0)^2, \quad (4)$$

где  $I_{n,p} = I_{n,p}^0 \exp(eU/T)$  — величины инжекционных токов эмиттерных  $n-p$ - и  $p-n$ -переходов,  $\gamma_{n,p}^0$  — коэффициенты инжекции эмиттеров без учета рекомбинации [6-8],  $\beta_{n,p}$  — коэффициенты переноса составляющих  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторов.

Тогда выражения, связывающие напряжение переключения  $U_s$  и ток переключения  $I_s$  тензотристора, имеют вид [6,8]

$$U_s = U_b \left\{ 1 - \alpha_n^0 \left[ 1 - (1 + G_n I_s)^{-1/2} \right] - \alpha_p^0 \left[ 1 - (1 + G_p I_s)^{-1/2} \right] \right\}^{1/3}, \quad (5)$$

$$I_s = C U_s^{1/3} \left[ \alpha_n(I_s) (1 + G_n I_s)^{-1/2} + \alpha_p(I_s) (1 + G_p I_s)^{-1/2} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $U_b$  — напряжение лавинного пробоя центрального  $p-n$ -перехода,  $C$  — константа.

Величина тока выключения (удержания) тиристора  $I_h$  определяется выражением [6]

$$\alpha_n(I_h) + \alpha_p(I_h) = 1. \quad (7)$$

При наложении равномерно распределенной по поверхности мембраны нагрузки в базовой области составляющего тензотристора возникает механическое напряжение  $\sigma$  и обусловленная им анизотропия электропроводности. В результате этого наряду с продольным дрейфом неравновесных носителей заряда в тянущем электрическом поле базы возникнет его поперечная компонента, направленная к одному из коллекторов, тем самым изменится коэффициент переноса тензотристора  $\beta$ . Описанный выше механизм изменения величины  $\beta$  (эффект отклонения) имеет место для  $p-n-p$ -тензотристора [4]. Для конструкции тиристора с составляющим  $n-p-n$ -тензотристором существенный дополнительный вклад в изменение коэффициента переноса может вносить эффект модуляции инжекции [5].

Таким образом, коэффициент переноса составляющего тензотристора  $\beta(\sigma)$  определяется выражением вида

$$\beta(\sigma) = I_c(\sigma) / I_e(\sigma), \quad (8)$$

где  $I_c, I_e$  — величины токов коллектора и эмиттера, которые в общем случае зависят от механического напряжения в базе  $\sigma$ .

Для характеристики тензотиристора введем параметр — тензочувствительность по напряжению включения  $S_u$ , определив его следующим образом:

$$S_u = \frac{1}{U_s} \left| \frac{\partial U_s}{\partial \sigma} \right| = \frac{1}{U_s} \left| \frac{\partial U_s}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma} \right|. \quad (9)$$

Проведем анализ уравнений (5-7) и расчет основных характеристик  $p^+-n-p-n^+$ -тензотиристора. В этом случае зависящим от величины механического напряжения  $\sigma$  будет коэффициент переноса  $\beta_p$  составляющего  $p^+-n-p$ -тензотристора. Его величина определяется выражением (8) при токе  $I_e$ , не зависящим от значения  $\sigma$  (эффект модуляции инжекции отсутствует [4]). Тогда, согласно (5), максимальная

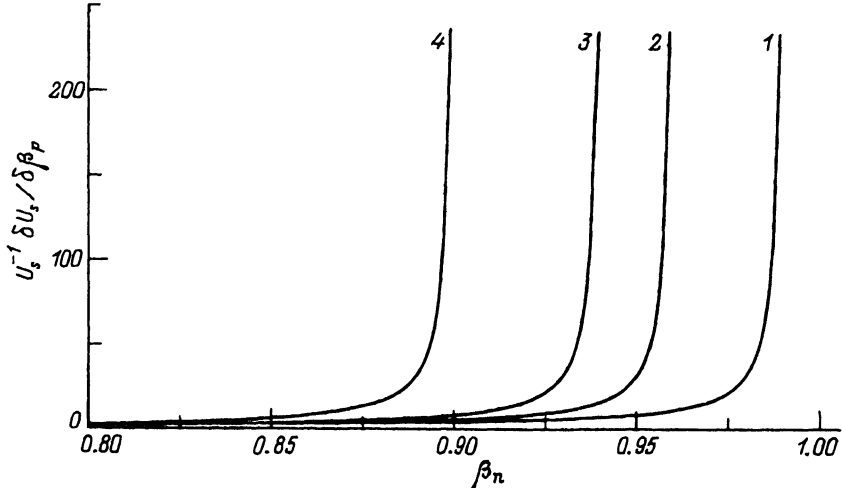


Рис. 2. Зависимость крутизны характеристики  $U_s(\beta_p)$  от величины коэффициента переноса  $\beta_n$  при различных величинах  $\beta_p$ : 1 — 0.03, 2 — 0.06, 3 — 0.08, 4 — 0.12.

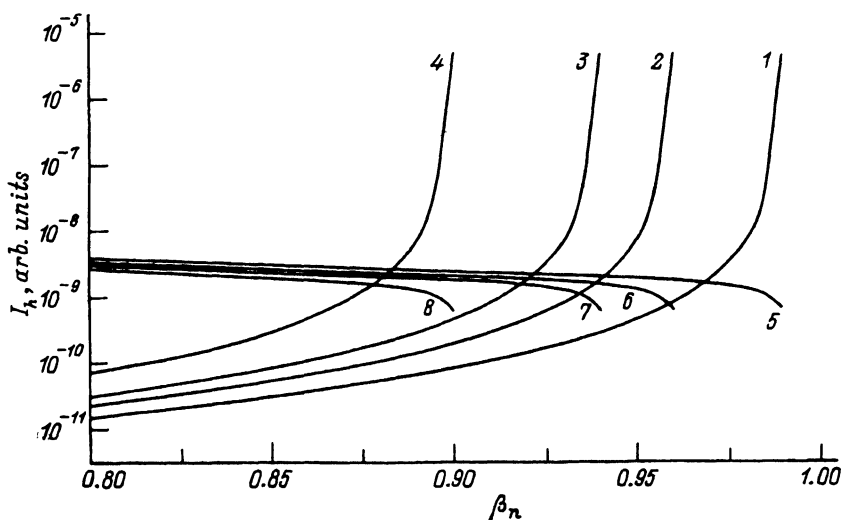


Рис. 3. Зависимость токов включения  $I_s$  (1-4) и удержания  $I_h$  (5-8) от величины коэффициента переноса составляющего  $n-p-n$ -транзистора при различных значениях коэффициента переноса составляющего  $p-n-p$ -тензотранзистора  $\beta_p$ : 1, 5 — 0.03; 2, 6 — 0.06; 3, 7 — 0.08; 4, 8 — 0.12.

величина  $S_u$  может быть получена при выполнении следующих неравенств:

$$G_{n,p}I_0 \gg 1, \quad (\alpha_p^0(\sigma))^2 G_n I_0 \gg 1, \quad \alpha_p^0(\sigma) \leq 1 - \alpha_n^0. \quad (10)$$

При выполнении неравенств (10) расчетные формулы (5-7) для напряжения включения  $U_s$ , токов включения  $I_s$  и удержания  $I_h$  упрощаются:

$$U_s = U_b(1 - \alpha_p^0 - \alpha_n^0)^{1/3}, \quad (11)$$

$$I_s = G_n G_p C^2 (U_b)^{2/3} (1 - \alpha_p^0 - \alpha_n^0)^{2/9} / \left( \alpha_p^0 \sqrt{G_n} + \alpha_n^0 \sqrt{G_p} \right)^2, \quad (12)$$

$$I_h = 4 \left( \alpha_p^0 \sqrt{G_n} + \alpha_n^0 \sqrt{G_p} \right)^2 / G_n G_p (1 - \alpha_p^0 - \alpha_n^0)^2. \quad (13)$$

Отметим, что полученная в этом приближении формула (11) для величины  $U_s$  совпадает с приведенной ранее [7].

На рис. 2, 3 показаны зависимости крутизны характеристики  $U_s(\beta)$ , токов включения и удержания тиристора  $I_s$  и  $I_h$  от значений коэффициента переноса  $\beta_n$  составляющего  $n-p-n$ -транзистора при различных величинах коэффициента переноса тензотранзистора  $\beta_p$ . Как видно из рисунка, тензочувствительность тиристора по напряжению переключения зависит не только от обусловленного деформацией изменения коэффициента переноса составляющего тензотранзистора, но и в значительной степени определяется его величиной при  $\sigma = 0$ . Таким образом, вопросы оптимизации топологии и выбора режима работы тензотиристора сводятся к достижению необходимых соотношений между величинами коэффициентов передачи эмиттерных токов составляющих его транзисторов  $\alpha_{n,p}^0$  в отсутствие деформации и значением  $|\partial\beta/\partial\sigma|$  составляющего тензотранзистора.

В силу конструктивных особенностей тензотранзистора (размеры его базовой области либо сравнимы, либо больше диффузионной длины неравновесных носителей заряда) величина  $\beta_p$  практически всегда значительно меньше единицы. Поэтому для получения максимальной тензочувствительности (рис. 2) значение  $\beta_n$  должно быть близким к 1. Величины  $\beta_n \leq 1$  легко достичь, если в качестве составляющего  $n-p-n$ -транзистора использовать дрейфовый транзистор с узкой базой подобно тому, как это имеет место в обычных  $p-n-p$ -структурах [6].

Из простых физических соображений следует, что для повышения значения  $\beta_p$  при  $\sigma = 0$  необходимо уменьшить рекомбинационные потери в базе (уменьшить объемную и поверхностную рекомбинации), а также значение тока через разделяющий  $p-n$ -переход [3]. Вопросы оптимизации тензотранзистора с целью достижения максимальных величин  $\partial I_c/\partial\sigma$ , а значит и  $|\partial\beta/\partial\sigma|$  (см. (8)), детально рассматривались ранее [4].

На рис. 3, 4 показаны расчетные (по формулам из работы [4]) левые зависимости коэффициента переноса  $\beta_p$  и его изменения  $\delta\beta_p$ , обусловленного деформацией при различных ширинах эмиттерного  $p-n$ -перехода. Как видно из рисунков, с ростом величины электрического поля  $E$  в базовой области тензотранзистора величина  $\beta_p$  несколько уменьшается, а  $\delta\beta_p$  практически линейно растет. Уменьшение значения  $\beta_p$  с увеличением  $E_x = U_{\delta\delta}/l_x$  (здесь  $l_x$  — длина базовой области) связано с уменьшением общего числа неравновесных носителей, дошедших до центрального  $p-n$ -перехода тензотиристора (коллектора составляющего тензотранзистора) из-за уменьшения времени их дрейфа в базовой области тензотранзистора. Уменьшение ширины эмиттерного перехода ведет при прочих равных условиях к уменьшению коэффициента переноса  $\beta_p$  при  $\sigma = 0$ , но при этом увеличивается

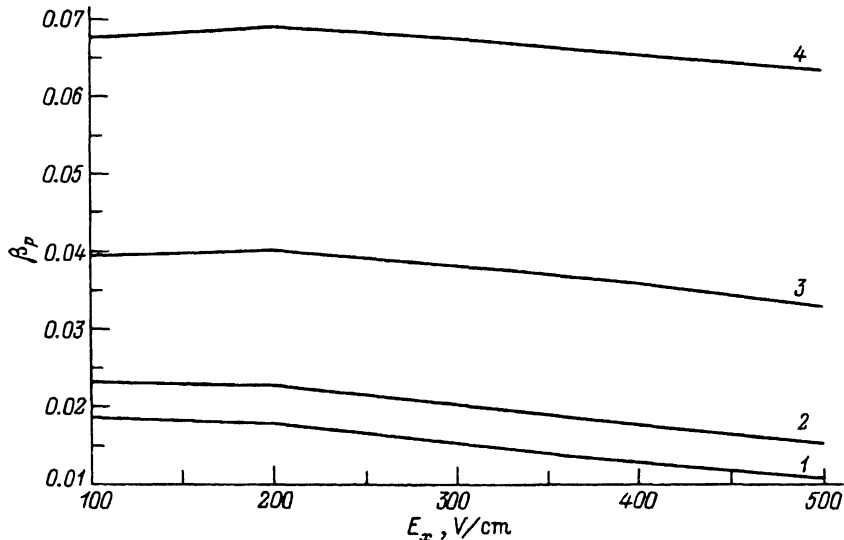


Рис. 4. Зависимость коэффициента переноса составляющего тензотранзистора  $\beta_p$  от величины тянущего электрического поля  $E_x$  в базе тензотранзистора при различных ширинах эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода  $l'_y$ , мкм: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 18.

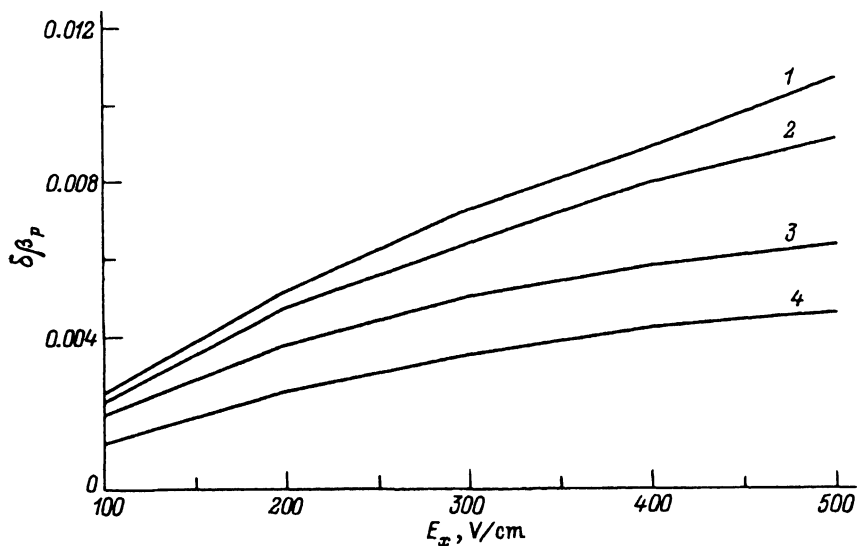


Рис. 5. Зависимость  $\delta\beta_p$  от величины тянущего поля  $E_x$  в базе составляющего тензотранзистора при различных ширинах эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода  $l'_y$ , мкм: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 18.

его изменение при наложении деформирующих усилий. Представленные на рис. 4, 5 результаты расчетов соответствуют следующим размерам базовой и эмиттерных областей составляющего тензотранзистора  $l_x \times l_y \times l_z = 100 \times 20 \times 10$ ,  $l'_x \times l'_y \times l'_z = 4 \times (5 \div 18) \times 2$ , (все размеры даны в микронах). Значение  $\sigma$  принято равным  $800 \text{ кгс/см}^2$ .

Кратко останавливаясь на вопросе взаимного влияния режимов работы левого и правого тензотиристоров, которое, как следует из топологии представленного на рис. 1 прибора, обусловлено наличием общих эмиттера и первой базы. Если при включении одного из тиристоров уровень инжекции в первой базе повысится настолько, что это приведет к уменьшению электрического поля в базовой области, между эмиттерным и центральным  $p-n$ -переходами другого (закрытого) тиристора, то прямо пропорционально этому уменьшению произойдет снижение тензочувствительности составляющего его тензотранзистора, а значит, и тензочувствительности тиристора по напряжению включения. Вследствие этого в пределе больших уровней инжекции может произойти потеря управления деформацией величин напряжения включения и тока включения. Поэтому весьма важным здесь является выбор величины сопротивления  $R_L$  и  $R_e$ , которые должны ограничивать значение проходящего через тиристор тока  $I$  на уровне, с одной стороны, обеспечивающем малый уровень инжекции в первой базе тиристора, а с другой — достаточным для его удержания в открытом состоянии ( $I \geq I_h$ ). Подобная ситуация имеет место и в формальном аналоге рассмотренного здесь тензотиристора, планарном магнитотиристоре [3]. В указанной работе приведены результаты экспериментальных исследований режима работы одного из магнитотиристоров при различных состояниях другого.

Следует отметить, что предложенная на рис. 1 топология тензотиристора не является единственно возможной. Так, например, в качестве составляющего тензотранзистора может быть использован тензотранзистор с радиальным распределением электрического поля в базе [9]. В зависимости от назначения прибора составляющих транзисторов может быть несколько, а их расположение может различаться от представленного на рис. 1. Однако эти отличия не снижают общности полученных результатов.

В заключение проведем численные оценки величины  $S_u$  для рассмотренного выше  $p^+ - n - p - n^+$ -тензотиристора. При  $|\partial\beta/\partial\sigma| \simeq 6 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$ ,  $\beta_- = 0.08$ ,  $\beta_n = 0.91$ ,  $\gamma_n^0 = \gamma_p^0 = 0.98$  получаем  $S_u \simeq 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кгс}$ . Заметим, что тензочувствительность тензотиристора по напряжению включения по крайней мере на 2 порядка превосходит чувствительность тензомостовой схемы [10].

Автор благодарен И.П. Жданько и В.А. Романову за интерес к работе и ее обсуждение.

### Список литературы

- [1] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева, В.В. Козел. ФТП, 24, 1959 (1990).
- [2] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. Полупроводниковые датчики (М., Сов. радио, 1975) с. 104.
- [3] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, В.В. Козел, Н.А. Канищева. ФТП, 18, 547 (1984).
- [4] Г.Г. Бабичев, В.Н. Гузь, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романиов. ФТП, 26, 1244 (1992).
- [5] С.И. Козловский. ФТП, 29, 1783 (1995).
- [6] В.А. Кузьмин. Тиристоры малой и средней мощности (М., Сов. радио, 1971) с. 184.
- [7] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) т. 1, с. 455.

- [8] Ю.С. Рябинкин. Радиоэлектроника, **10**, 2205 (1965).  
[9] В.Н. Гузь, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов. ФТП, **26**, 1723 (1992).  
[10] В.Н. Гузь, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов. ФТП, **24**, 409 (1990).

Редактор Т.А. Полянская

## Strain thyristor with an accelerating electric field in the first base

*S.I. Koslowski*

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

---