

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. А. МАКАРОВ, Р. Э. ДЯЗЯН, И. М. КОРОНЕВСКИЙ,
А. К. СОЛОВЬЕВ, И. А. ЧАРЫКОВ

ОСТАТОЧНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ В ПЕНАСЫЩАЮЩИХСЯ
СТРУКТУРАХ ТИПА $p-n-p-n$

В статье определяются условия возникновения обратного напряжения на центральном $p-n$ переходе четырехслойной структуры, находящейся в открытом состоянии и рассматривается ее вольтамперная характеристика. Из литературы, посвященной исследованию вольтамперных характеристик тиристоров, известно, что в ряде случаев наблюдается обратное смещение на центральном $p-n$ переходе тиристора, находящегося во включенном состоянии [1]. При этом, величина остаточного напряжения на приборе, как правило, намного больше, чем остаточное напряжение, вычисленное из общепринятой теории [2, 3]. Характерным является тот факт, что большинство случаев появления повышенного остаточного напряжения возникает при уменьшении коэффициентов передачи транзисторных структур тиристора. Это видно из следующих примеров. Для получения полностью управляемых тиристоров, как известно [4], стремятся уменьшить коэффициент передачи транзистора с неуправляемой базой. При этом анализ каталогов выключаемых тиристоров, выпускаемых иностранными фирмами, показывает, что величина остаточного напряжения у этих приборов составляет несколько вольт. То есть увеличение коэффициента выключения тиристора ведет к повышению величины остаточного напряжения. Увеличение остаточного напряжения тиристора, находящегося во включенном состоянии, происходит также в случае, когда уменьшают время выключения тиристора, за счет снижения времени жизни дырок в n -базе. На рис. 1 показана корреляция между временем выключения и величиной остаточного напряжения для четырехслойных структур, изготовленных по технологии приборов типа ВКУ-150*. Уменьшение времени выключения достигалось путем варьирования режимов диффузии золота в широкую n -базу через прилегающую к ней внешнюю p -область. Из рисунка видно, что уменьшением времени жизни неосновных носителей, по крайней мере, в n -базе, а следовательно, и с уменьшением коэффициента пере-

* Кривая рис. 1 построена по экспериментальным данным Ерванского СКБ полупроводников и металлосерамики.

носа через нее, величина остаточного напряжения возрастает до нескольких вольт.

В обширной литературе, посвященной анализу статических и динамических характеристик четырехслойных приборов в настоящее

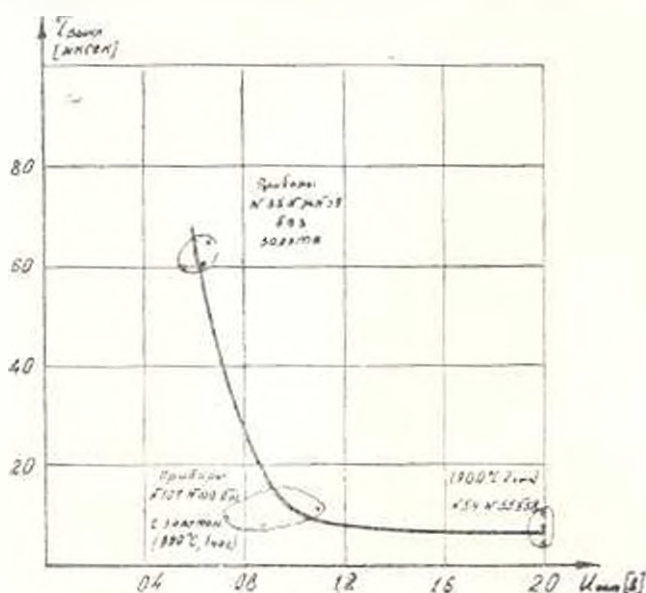


Рис. 1.

время нет достаточно убедительного объяснения отсутствия инверсии знака напряжения на центральном $p-n$ переходе и, соответственно, возникновения большого остаточного напряжения. Объяснение причины появления обратного напряжения на центральном $p-n$ переходе тиристора во включенном состоянии данное в работе [1] нельзя признать удовлетворительным, поскольку оно основывается на рассмотрении зависимости колоколообразной функции $I = I(1 - a_1 - a_2)$ только от тока и не учитывается изменение a_1 и a_2 от напряжения на структуре. В данной работе определяются условия, при которых не происходит изменения знака напряжения на центральном $p-n$ переходе тиристора во включенном состоянии и исследуется вольтамперная характеристика этих приборов в открытом состоянии.

Рассмотрим вольтамперную характеристику тиристора в области тока, где заканчивается участок отрицательного и начинается участок положительного дифференциального сопротивления. В рассматриваемом случае напряжение на всей структуре примерно равно напряжению на центральном $p-n$ переходе. Поэтому для простоты рассуждений будем считать, что уравнение, связывающее напряжение на центральном $p-n$ переходе с током через структуру

$$1 - a_1 - a_2 = \frac{I_n}{I}, \quad (1)$$

является уравнением вольтамперной характеристики тиристора. На

участке отрицательного дифференциального сопротивления при напряжении далеко от пробивного напряжения центрального перехода отношение собственного тока центрального перехода I_{s2} к полному току I составляет величину порядка $10^{-4} \div 10^{-6}$.

Это позволяет записать уравнение (1) в виде [5]

$$1 - \alpha_1 - \alpha_2 = 0. \quad (2)$$

Рассмотрим одномерную модель $p-n-p-n$ структуры, показанной на рис. 2. Будем считать, что зависимость α_1 и α_2 от тока опре-

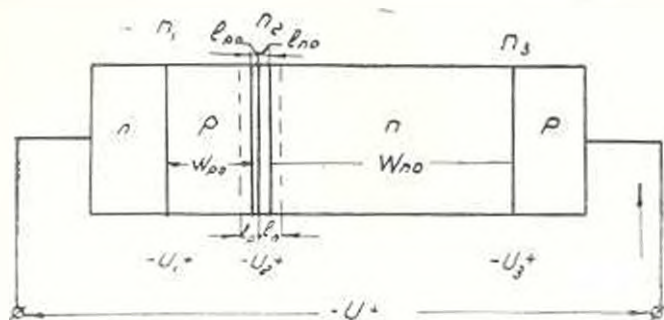


Рис. 2.

деляется только коэффициентами инжекции γ_1 и γ_2 эмиттерных переходов n_1 и n_2 , а зависимость от напряжения коэффициентами переноса через p - и n -базы α_1 и α_2 , зависящими от напряжения на переходе n_2 за счет эффекта Эрли

$$\alpha_1(I, U) = \gamma_1(I) \cdot \alpha_1(U_2);$$

$$\alpha_2(I, U) = \gamma_2(I) \cdot \alpha_2(U_2).$$

Механизм переноса неосновных носителей во внутренних p - и n -областях прием чисто диффузионным, тогда

$$\alpha_1 = \operatorname{sch} \frac{W_{p1} - \Delta l_F}{l_n}; \quad (3a)$$

$$\alpha_2 = \operatorname{sch} \frac{W_{n1} - \Delta l_F}{l_p}. \quad (3b)$$

где W_{p1} и W_{n1} — ширина p - и n -базы при напряжении на центральном $p-n$ переходе, равном нулю;

l_p и l_n — ширина слоя пространственного заряда центрального перехода, лежащая в p - и n -базах при $U_2 \neq 0$;

l_{p1} и l_{n1} — ширина слоя пространственного заряда перехода n_2 , обусловленная соответственно акцепторной и донорной примесью при $U_2 = 0$;

$$\Delta l_p = l_p - l_{p1}, \quad \Delta l_n = l_n - l_{n1}.$$

l_n и l_p — диффузионная длина электронов и дырок.

Так как переходы n_1 и n_3 смещены в прямом направлении, то

изменением их ширины можно пренебречь по сравнению с Δl_n и Δl_p и считать, что коэффициенты γ_1 и γ_2 зависят только от напряжения U_2 .

Зависимость коэффициентов инжекции эмиттерных переходов от тока I , учитывая, что проводимость внешних областей много больше внутренних, запишем в виде [6, 7]:

$$\gamma_1 = \frac{2 - I/I_{10} - 2\sqrt{1 + I/I_{10}}}{I/I_{10}}, \quad (4a)$$

$$\gamma_2 = \frac{2 + I/I_{20} - 2\sqrt{1 + I/I_{20}}}{I/I_{20}}, \quad (4b)$$

где I_{10} , I_{20} — постоянные, имеющие размерность тока.

Как показывает расчет, зависимость γ_1 и γ_2 от напряжения U_2 более слабая, чем зависимость $x_1(U_2)$, $x_2(U_2)$ и ею можно пренебречь. В отечественных тиристорах переход n_p получают диффузионным методом с распределением примеси N_{np} довольно хорошо подчиняющемуся экспоненциальному закону:

$$N_{np} = N_{npr} (1 - e^{-ax}). \quad (5)$$

Для исследованных в данной работе тиристоров типа МД-63 исходная концентрация примеси $N_{npr} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($x = 15,0 \text{ м.м. см.}$). Величина градиента примеси в центральном $p-n$ переходе определялась по экспериментальной зависимости величины барьерной емкости от обратного напряжения. Причем, в широком диапазоне напряжений $C_{11} \sim U^{-1/2}$, что указывало на плавный характер $p-n$ перехода. Вычисленное значение градиента примеси a было равно 10^{12} см^{-1} .

Величина контактной разности потенциалов и величины l_p и l_n для плавного $p-n$ перехода в равновесных условиях ($U_2 = 0$) рассчитывались по методике, предложенной в [8]. Результаты расчета приведены на рис. 3, откуда видно, что для высоковольтных тиристоров ($a = 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-1}$) величины l_p и l_n соизмеримы с размерами широкой и узкой баз. При напряжении на центральном переходе, большем контактной разности потенциалов ϕ_k , можно считать

$$\Delta l_p = \Delta l_n = \left(\frac{3}{2} \frac{e a_n}{I a} \right)^{1/2} U_2^{1/2} = k U_2^{1/2}, \quad (6)$$

где $k = 4,7 \text{ мкм. в}^{-1/2}$.

Из соотношений (2-4) и (6) получим:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{2 + \frac{I}{I_{10}} - 2\sqrt{1 + I/I_{10}}}{I/I_{10}} \operatorname{sch} \frac{W_{p_1} - k U_2^{1/2}}{L_n} - \\ - \frac{2 + I/I_{20} - 2\sqrt{1 + I/I_{20}}}{I/I_{20}} \operatorname{sch} \frac{W_{n_2} - k U_2^{1/2}}{L_p} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

Решая графическим способом это трансцендентное уравнение можно найти напряжение на центральном переходе $U_2 = U_2(I)$ и, зная вольт-амперные характеристики эмиттерных переходов $U_1 = U_1(I)$ и $U_3 = U_3(I)$, определить вольтамперную характеристику тиристора:

$$U(I) = U_1(I) + U_2(I) + U_3(I).$$

Рассмотрим подробнее зависимость $U_2 = U_2(I)$. Для простоты положим $\gamma_1 = \gamma_2$, т. е. будем считать, что $I_{10} = I_{20} = I_0$.

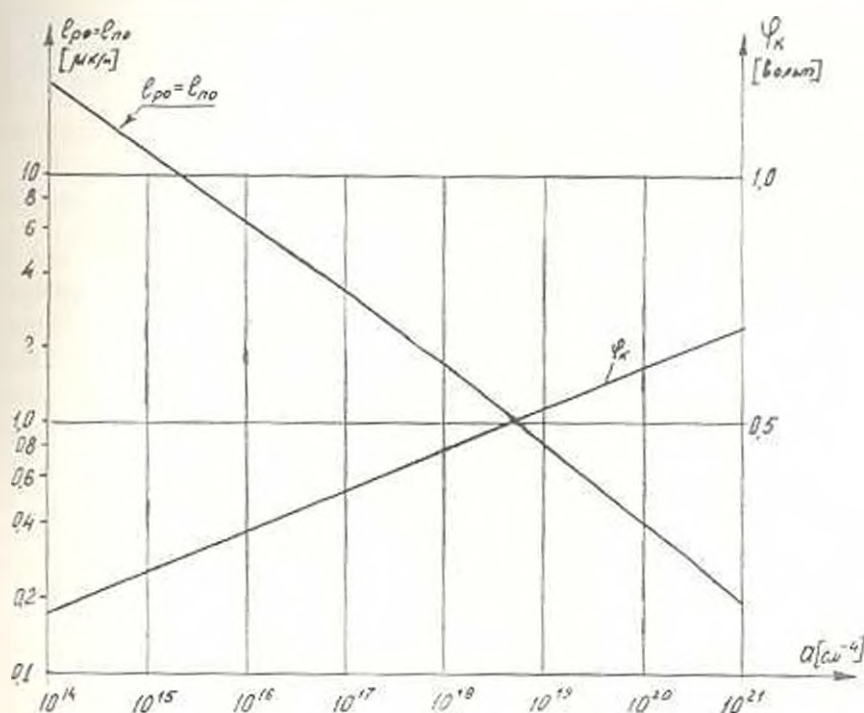


Рис. 2.

В этом случае уравнение (7) перепишем в виде

$$\operatorname{sch} \frac{W_p - kU_2^{3/2}}{L_n} + \operatorname{sch} \frac{W_n - kU_2^{3/2}}{L_p} = \frac{I/I_0}{2 + I/I_0 - 2(1 - I/I_0)} \quad (8)$$

Отсюда следует, что с увеличением тока через структуру I , правая часть уравнения (8) уменьшается, стремясь при $I \gg I_0$ к единице. Для выполнения равенства левая часть должна так же уменьшаться за счет снижения напряжения U_2 . В том случае, если сумма коэффициентов переноса через р- и n-базы при $U_2 = 0$ превышает единицу, то при токе $I = I_{\text{max}}$, напряжение на центральном р-и переходе упадет до нуля. Таким образом, условием изменения полярности напряжения на переходе P_2 является неравенство

$$\operatorname{sch} W_p/L_n + \operatorname{sch} W_n/L_p > 1.$$

При обратном неравенстве, с увеличением тока через структуру

ру. напряжение U_2 будет падать, стремясь при $I \gg I_0$ к постоянной величине U_{20} , определяемой выражением:

$$\operatorname{sch} \frac{W_{p.} - kU_{20}^{1,3}}{L_n} - \operatorname{sch} \frac{W_{a.} - kU_{20}^{1,3}}{L_p} = 1. \quad (9)$$

Следовательно, при токах $I \gg I_0$ напряжение на центральном $p-n$ переходе остается, во-первых, обратным и, во-вторых, постоянным по величине. Дифференциальное сопротивление структуры в этом случае определяется только положительными дифференциальными сопротивлениями эмиттерных переходов. Следует помнить, что уравнение (1) получено из условия, что концентрация неосновных носителей у границ центрального перехода при $U_2 \gg \frac{kT}{e}$ равна нулю, поэтому при

обратном напряжении $U_{20} \gg \frac{kT}{e}$ центральный $p-n$ переход не инжектирует. Это обстоятельство, особенно, важно при рассмотрении переходных процессов переключения тиристора. В этой связи интересны экспериментальные данные, приведенные на рис. 1, откуда видно, что наиболее сильное изменение времени выключения наблюдается при изменении величины остаточного напряжения от 0,6 до 1 вольта. У приборов с $U_{ост} > 1$ вольта $\tau_{выкл.}$ с увеличением остаточного напряжения меняется намного слабее. Этот факт может быть объяснен тем, что у приборов, имеющих величину $U_{ост} < 1$ в, центральный $p-n$ переход во включенном состоянии насыщен, поэтому основной долей времени выключения является время рассасывания избыточного заряда неосновных носителей границ перехода P_2 .

В случае же, когда $U_{ост} > 1$, центральный $p-n$ переход в открытом состоянии тиристора не инжектирует, поскольку он находится под обратным смещением и этап выхода его из насыщения отсутствует.

Уравнение (9) решается аналитически относительно U_{20} , если

$$\frac{kU_{20}^{1,3}}{L_n} \ll 1 \quad \text{и} \quad \frac{kU_{20}^{1,3}}{L_p} \ll 1,$$

$$U_{20} = \left[\tau_4^{1,3} + \frac{1 - x_{10} - x_{20}}{\frac{k}{L_n} x_{10} \sqrt{1 - x_{10}^2} - \frac{k}{L_p} x_{20} \sqrt{1 - x_{20}^2}} \right]^3 - \tau_4. \quad (10)$$

где

$$x_{10} = \operatorname{sch} \frac{W_{p.}}{L_n}, \quad x_{20} = \operatorname{sch} \frac{W_{a.}}{L_p}.$$

Для линейного $p-n$ перехода, в котором $k_1 = k_2 = \frac{214}{\alpha}$, выражение (10) можно переписать в виде:

$$U_{20} = \left[\frac{1 - x_{10} - x_{20}}{\tau_4^{1,3} - \frac{a^{1,3}}{214 L_n} x_{10} \sqrt{1 - x_{10}^2} + \frac{1}{L_p} x_{20} \sqrt{1 - x_{20}^2}} \right]^3 - \tau_4. \quad (11)$$

В более общем случае, когда γ_1 и γ_2 стремятся к величине < 1 , U_{z0} следует определять из уравнения:

$$1 - \frac{\operatorname{sch} \frac{W_{p1} - k_1 U_{z0}}{L_A}}{1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \operatorname{cth} \frac{W_{p1} - k_1 U_{z0}}{L_A}} - \frac{\operatorname{sch} \frac{W_{p2} - k_2 U_{z0}}{L_B}}{1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_p} \operatorname{cth} \frac{W_{p2} - k_2 U_{z0}}{L_B}} = 0. \quad (12)$$

Как видно из соотношения (11), при прочих равных условиях остаточное напряжение на тиристоре будет тем больше, чем резче центральный переход. То есть величина остаточного напряжения определяется не только разностью $1 - (x_{10} + x_{20})$, но и характером распределения примеси в центральном переходе.

На рис. 4 показана методика построения зависимости напряжения U_z от тока через $p-n-p-n$ структуру I . Для построения каждой точки задается некоторое значение тока. При расчете принима-

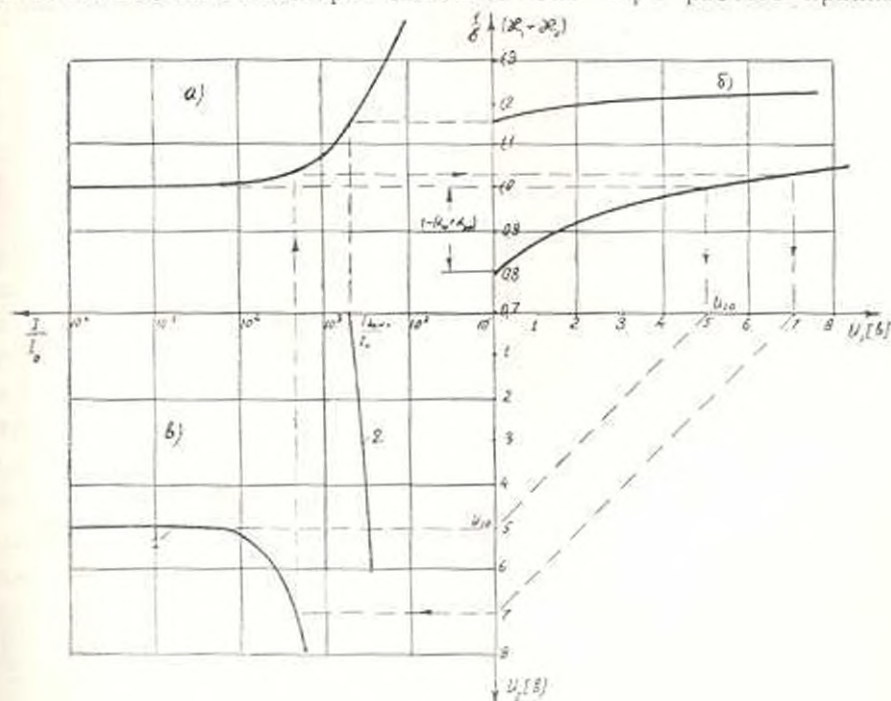


Рис. 4.

лось, что центральный переход линейный с градиентом примеси, равным $a = 10^{18} \text{ см}^{-2}$, ширина запирающего слоя при $U_z = 0$ определялась по рис. 3. Значение коэффициента k для кремнивого линейного перехода определялось по формуле $k = 214 a^{1/3}$. При $a = 10^{18} \text{ см}^{-2}$ величина k равна $10 \text{ мкн в}^{-1/3}$.

Размеры базовых областей и диффузионные длины электронов и дырок были взяты соответственно равными:

$$W_n = 100 \text{ мкн}; \quad L_p = 40 \text{ мкн};$$

$$W_p = 40 \text{ мкн}; \quad L_n = 33,5 \text{ мкн}.$$

Из рис. 4 видно, что при токах больших $II_0 = 10^4$, напряжение U_2 стабилизируется на уровне $U_{20} = 5$ в, что соответствует остаточному напряжению на тиристоре $U_{\text{ост}} = 6$ в, считая, что $U_1 + U_2 = 1,0$ в. Важно отметить, что сумма коэффициентов переноса при $U_2 = 0$ и, соответственно, максимальная сумма коэффициентов передачи транзисторных структур равна всего 0,80. На рис. 4в (кривая 2) показан участок вольтамперной характеристики тиристора с параметрами, типовыми для прибора УД-63: $W_n = 150 \text{ мкн}$, $W_p = 50 \text{ мкн}$, $L_n = 71,1 \text{ мкн}$, $L_p = 88,4 \text{ мкн}$.

Зависимости $\Delta I_n = \Delta I_n(U_2)$ и $\Delta I_p = \Delta I_p(U_2)$ рассчитаны по формуле (6). У этого прибора сумма коэффициентов переноса при $U_2 = 0$ превышает единицу (кривая 2 на рис. 4б), поэтому при токе $\frac{I_{\text{вмкз}}}{I_0}$

напряжение на центральном $p-n$ переходе изменяет знак.

Из сравнения кривых 1 и 2, показанных на рис. 4в, видно, что у тиристора с ненасыщающимся центральным $p-n$ переходом участок отрицательного дифференциального сопротивления простирается в область токов, намного больших, чем у тиристора с $x_{n0} + x_{p0} > 1$. Это качественно подтверждается и экспериментальными данными.

Из опыта производства приборов УД-63 известно, что величина остаточного напряжения на тиристоре зависит от качества изготовления эмиттерного перехода Π_1 . Поэтому представляет интерес оценить это влияние. Полагая в уравнении (11), для простоты $\gamma_2 = 1$, найдем каким значением должен обладать коэффициент инжекции перехода $\Pi_1 = \gamma_{10}'$ при напряжении $U_2 = 0$ для того, чтобы остаточное напряжение на центральном переходе равнялось наперед заданной величине U_{20} . Результаты расчета U_{20} в функции от $(1 - \gamma_{10}')$ представлены на рис. 5 сплошной кривой. Размеры базовых областей и распределение примеси в переходах приняты те же, что и в предыдущем случае для прибора УД-63. Как следует из рис. 5, при изменении величины $1 - \gamma_{10}'$ от 0,165 до 0,227, что является существенным для коэффициента инжекции, напряжение на центральном переходе U_{20} изменяется всего на 1,2 вольт. И только, начиная со значений $1 - \gamma_{10}' = 0,23$, происходит резкое возрастание величины остаточного напряжения. Этим, вероятно, объясняется тот факт, что приборы с $U_{\text{ост}} = 3-5$ вольт встречаются довольно редко. На том же рисунке для сравнения приведена зависимость U_{20} в функции $1 - \gamma_{10}'$ (пунктирная кривая), рассчитанная без учета изменения коэффициента инжекции от напряжения на центральном переходе. Как и следовало ожидать, зависимость U_{20} от коэффициента инжекции γ_{10}' в этом случае получается более резкая. Таким образом, чем больше влияние напряжения U_2 на величину коэффициента инжекции перехода Π_1 , тем меньше сказываются

ся разброс γ'_{10} , получаемый при производстве приборов на величину остаточного напряжения.

Из описанного механизма образования вольтамперной характеристики четырехслойной структуры следует, что при условии $\alpha_{10} + \alpha_{20} < 1$ центральный $p-n$ переход не смещается в прямое нап-

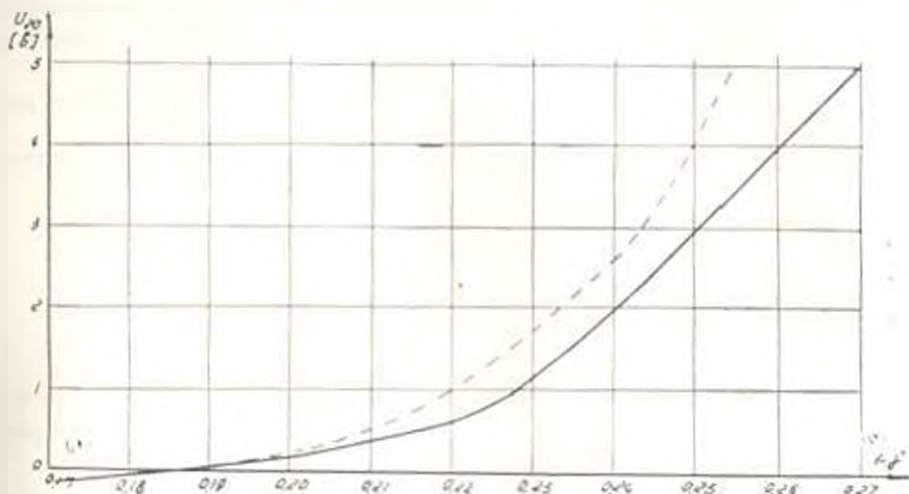


Рис. 5.

пряжение даже в открытом состоянии. Под открытым состоянием здесь понимается состояние тиристора с малым дифференциальным сопротивлением при напряжении, меньшем напряжения включения. Поскольку в таком состоянии могут находиться $p-n-p-n$ структуры как с прямосмещенным, так и с обратносмещенным центральным $p-n$ переходом, то, видимо, следует различать тиристоры, насыщающиеся и ненасыщающиеся.

В ы в о д ы

1. Рассмотрены условия возникновения обратного напряжения на центральном переходе тиристора во включенном состоянии. В основе анализа лежит зависимость протяженности обедненного слоя центрального перехода на коэффициенты переноса χ_1 , χ_2 и коэффициенты инжекции γ_1 , γ_2 транзисторных структур. Проанализированы вольтамперные характеристики включенного тиристора с обратносмещенным центральным переходом.

2. Показано, что центральный $p-n$ переход включенного тиристора смещается в прямом направлении в том случае, если при нулевом напряжении на нем сумма $(\alpha_{10} + \alpha_{20})$ превышает единицу. Если же во всем диапазоне токов $\alpha_{10} + \alpha_{20} < 1$, то смещение центрального перехода остается всегда обратным.

3. Величина обратного напряжения на центральном $p-n$ переходе в открытом состоянии зависит не только от разности $1 - (\alpha_{10} + \alpha_{20})$,

но и от распределения концентрации примеси в центральном $p-n$ переходе. Для линейного перехода остаточное напряжение тем больше, чем больше градиент примеси при прочих равных условиях.

4. С точки зрения анализа переходных процессов переключения необходимо классифицировать тиристоры на насыщающиеся и ненаасыщающиеся, поскольку в ненаасыщающихся структурах отсутствуют этапы накопления и рассасывания избыточного заряда неосновных носителей вблизи центрального $p-n$ перехода.

МЭИ

Поступило 17.XI.1967.

Վ. Ա. ՄԱԿԱՐՈՎ, Բ. Է. ԱՅՈՋՅԱՆ, Ի. Մ. ԿՈՐՈՆԵՎՍԿԻ Ա. Կ. ՍՈՒՈՎՅՈՎ, Ն. Ա. ՉԱՐԿԻՈՎ

ՄԱՅՏՈՐԴԱՅԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ $p-n-p-n$ ՏԻՊԻ ՉԱՌԵՏՎՈՂ ՍՏՐՈՒՏՈՒԹՅԱՆԵՐՈՒՄ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. փ.

Դիտվում են այն պայմանները, որոնց դեպքում n_2 կենտրոնական $p-n$ անցումը տիրիստորի միացված վիճակում գտնվում է հետադարձ շեղման տակ:

Վերլուծության հիմքում ընկած է տրանզիստորային ստրուկտուրաների հոսանքահաղորդման դրժակիցների կախումը n_2 անցման սարածական լիցքի շերտի լայնությունից: Կատարված է հետադարձ շեղմամբ կենտրոնական $p-n$ անցումով միացված տիրիստորի մոլտամպերային բնութագրերի վերլուծություն:

Ցույց է տրված, որ հետադարձ լարման u_{20} մեծությունը կախված է տրանզիստորային ստրուկտուրաների հոսանքահաղորդման դրժակիցների $(\alpha_{10} + \alpha_{20})$ գումարից (երբ կենտրոնական $p-n$ անցումում դերոյական լարում է) և անցման մեջ խառնուկների բաշխման բնույթից: Որքան մեծ է խառնուկի դրոդիկներ, այնքան մեծ է հետադարձ շեղումը զծալին կենտրոնական $p-n$ անցումում՝ $(\alpha_{10} + \alpha_{20})$ -ի տվյալ արժեքի դեպքում:

Նշվում է, որ շահեցվող ստրուկտուրաների միացման և անջատման ժամանակ բացակայում են ոչ հիմնական հոսանքակիրների ավելցուկային լիցքի կուտակման ու ցրման փուլերը կենտրոնական $p-n$ անցման սահմանի մոտ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Грехов И. В., Лебедев А. А., Минейчук И. А., Туклович В. М., Уваров А. И., Челмоков В. Е., Шумин В. Б., Яковчук И. И. Вольтамперная характеристика открытой диффузионной кремниевой четырехслойной структуры типа $p-n-p-n$. "Физика $p-n$ переходов". Рига, 1966.
2. Мола Дж., Тинсбиум М., Голдбер Дж., Холоньяк Н. Транзисторные переключатели $p-n-p-n$ типа. Сборник статей "Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением". Госизергоиздат, 1962.
3. Кузмин В. А. Вольтамперная характеристика полупроводниковых приборов со структурой $p-n-p-n$ во включенном состоянии. "Радиотехника и электроника", 1963, 8, № 1.
4. Storm H. "Electro-Technology", 1963, v. 72. X. № 4.

5. Кузьмин В. А., Сениторов К. Я. Четырехслойные полупроводниковые приборы. Изд. "Энергия", М., 1967.
6. Sah C. T., Noyce R., Shockley W. Carrier generation and recombination in $p-n$ junctions, Proc. IRE, 1957, v. 45, № 9, p. 1228.
7. Muss D. R., Goldberg G. Switching mechanism in the $p-n-p-n$ silicon controlled Rectifier, IEEE Trans. on E. D., 1963, 10, p. 113.
8. Shockley W. "The theory of $p-n$ junction in semiconductors and $p-n$ junction transistors". The Bell system technical Journal, v. XXVIII, № 3, 1949.