

УДК 621.383.52: 546.682

Многоканальный процесс включения $p-n-p-n$ -структур

А. В. Конюхов, Ю. М. Локтаев, В. Я. Павлик, Ю. А. Чесноков
ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина", Москва, Россия

Определены условия включения $p-n-p-n$ -структур с повышенным остаточным зарядом в n -базе при повторной подаче прямого напряжения. Рассчитан процесс нарастания тока при поэтапном включении каналов с произвольной задержкой. Обсуждены вопросы распределения критического заряда по площади структуры в целях обеспечения ее безопасного включения при неконтролируемых воздействиях.

При исследовании условий устойчивости выключения тиристоров корректный анализ блокирующей способности $p-n-p-n$ -структуры с остаточным зарядом в базовых слоях и подвергающейся включающему воздействию импульса положительного напряжения основан на понятии критического заряда $Q_{кр}$ [1]. При значительном остаточном заряде в слаболегированной n -базе в ней реализуются высокие уровни инжекции и вследствие этого возрастает быстродействие структуры.

Анализ dU/dt — стойкости тиристора и расчеты времени выключения $p-n-p-n$ -структур на основе диффузионной модели критического заряда проведены в [2–4]. В работе [5] рассмотрен процесс восстановления прямой блокирующей способности $p-n-p-n$ -структуры при высоком исходном уровне инжекции в n -базе. В отличие от [2–4] в ней учтен эффект экстракции избыточного заряда дырок из n -базы расширяющейся областью объемного заряда (ОПЗ) коллекторного перехода на основе модели [6]. Показано, что при больших остаточных зарядах эффект экстракции по своему влиянию на условия переключения во много раз превосходит барьерно-емкостной эффект dU/dt . В работе рассчитаны и проанализированы коэффициенты эффективности различных начальных распределений заряда в зависимости от их формы, а также скорости нарастания и амплитуды блокирующего напряжения.

По достижении критического заряда $Q_{кр}$ в $p-n-p-n$ -структуре выполняются условия переключения и начинается регенеративное нарастание тока с постоянными $\tau_{1в}$ и $\tau_{вв}$ [7, 8]. При приложении к $p-n-p-n$ -структуре повторного прямого напряжения U_F со скоростью dU_F/dt ток перезарядки центрального $p-n$ -перехода и экстракция избыточного заряда из n -базы, играющие роль токов управления, распределены равномерно по площади структуры. Вследствие технологического разброса $Q_{кр}$ по площади структуры возможно поэтапное включение каналов с нежелательной локализацией энергии потерь в них.

Цель работы — анализ многоканального процесса включения $p-n-p-n$ -структур с остаточной плазмой в слаболегированной n -области при восстановлении прямой блокирующей способности прибора и оптимизация распределения плотности критического заряда для обеспечения безопасного включения при неконтролируемых воздействиях.

Этап задержки многоканального включения $p-n-p-n$ -структуры

Проведен анализ $p-n-p-n$ -структуры с резко несимметричными базовыми слоями и утечкой в n^+ -эмиттерном переходе I_R (рис. 1). К моменту приложения повторного прямого напряжения в n -базе имеется значительный остаточный заряд дырок $Q_p \gg qN_D W_n$, т. е. реализуются высокие уровни инжекции. В p -базе на этапе накопления критического заряда рост тока происходит при низких уровнях инжекции. Распределение электронов описывается уравнением

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n}{\tau_n}$$

с начальным условием $n(x, 0) = 0$.

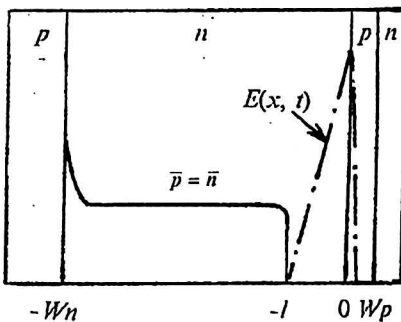


Рис. 1. Рассматриваемая $p-n-p-n$ -структура

Распределение дырок в n -базе при высоких уровнях инжекции описывается уравнением

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p}{\tau_p},$$

где $D = \frac{2b}{(b+1)} D_p$ — амбиполярный коэффициент диффузии;

τ_p — время жизни дырок.

Полагая коэффициент инжекции p^+ - n -перехода равным единице, получаем следующее граничное условие

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{-W_n} = -\frac{b}{b+1} \frac{I}{qD}.$$

Граничное условие с учетом экстракции дырок движущейся границей ОПЗ $l(t)$ найдем, следуя основным положениям модели [6]. Как и в [6], будем полагать, что концентрация избыточного остаточного заряда распределена од-

нородно по n -базе с плотностью $\bar{p} \cdot e^{-x/\tau_p}$. Расчеты коэффициентов эффективности полного остаточного заряда в зависимости от степени его локализации в базовой области [5] показывают, что они изменяются в диапазоне 0,6—2. Причем предельные значения коэффициентов соответствуют либо локализации заряда вблизи p^+ -эмиттера, либо практически у центрального $p-n$ -перехода, что физически мало оправдано.

Рассмотрим экстракцию дырок движущейся границей ОПЗ $l(t)$ при однородном распределении остаточного заряда. При смещении границы ОПЗ на δl захватывается заряд

$$\Delta Q_p = q\bar{p} e^{-l/\tau_p} \delta l.$$

При высоких уровнях инжекции в n -базе и однородном распределении носителей дырочная компонента тока равна

$$I_p = \frac{1}{(b+1)} I.$$

В p -базе превалирует диффузионный перенос тока инжектируемыми n^+ -эмиттером электронами, а дырочная компонента тока у n^+ -эмиттера равна нулю. Тогда изменение дырочной составляющей тока при переходе через ОПЗ из n -базы в p -базу

$$|\Delta I_p| = \frac{1}{(b+1)} I.$$

Из условия баланса заряда дырок

$$|\Delta I_p| \delta t = \Delta Q_p$$

получаем следующее выражение для тока экстракции дырок:

$$I_{\text{рех}} = -(b+1)q\bar{p} \cdot e^{-l/\tau_p} \frac{dl}{dt}.$$

Для резкого p - n -перехода положение границы ОПЗ связано с величиной приложенного напряжения $u_F(t)$ соотношением

$$l(t) = -\sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_D} \left(\frac{dU_F}{dt} \right) t}, \quad 0 \leq t \leq t_F.$$

Тогда ток экстракции дырок и барьерно-емкостная составляющая тока $I_{\text{см}}$ могут быть записаны в виде

$$I_{\text{ex}}(t) = (b+1)qp \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2qN_D} \left(\frac{dU_F}{dt} \right) t} \cdot e^{-l/\tau_p};$$

$$I_{\text{см}}(t) = qN_D \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2qN_D} \left(\frac{dU_F}{dt} \right) t}.$$

Для решения диффузионных уравнений в базовых областях потребуем выполнения условия непрерывности тока через p - n -переходы структуры

$$I = \frac{I}{b+1} - qD \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{-w_n} = \frac{I}{b+1} + I_{\text{ex}} + I_{\text{см}} + qD_n \left. \frac{\partial n}{\partial x} \right|_{l_p} = I_{\text{ут}} + qD_n \left. \frac{\partial n}{\partial x} \right|_{w_p}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ут}} = I_{R_0} + q\chi n(w_p)$ — ток утечки n^+ -эмиттерного перехода;

I_{R_0} , χ — параметры аппроксимации тока технологической утечки [1]. При

выводе (1) использовано, как и в [7], граничное условие $\left. \frac{dp}{dx} \right|_l = 0$.

Для определения условий включения $p-n-p-n$ -структуры воспользуемся преобразованием Лапласа [9]. Изображение для тока через $p-n-p-n$ -структуру имеет вид

$$I(s) = (I_{\text{ex}}(s) + I_{\text{см}}(s))F(s) - \frac{(b+1)I_{R_0}}{b} \frac{1}{s} F(s), \quad (2)$$

где
$$F(s) = \frac{1}{\left(\text{ch} \frac{w_p}{L_n} \sqrt{1 + s\tau_n} - \frac{b+1}{b} \right)}$$

При выводе (2), как и в [5, 7], положено, что $\chi = 0$. Оригинал функции $F(s)$ равен

$$F(t) = \frac{1}{\theta} e^{t/\tau_{\text{нв}}},$$

где $\theta = \frac{(w_p - l_p)^2}{2D_n}$ — диффузионное время пролета электронов через p -базу;

$$\tau_{\text{нв}} = \frac{a^2}{2\theta} - \frac{l}{\tau_n} \text{ — постоянная нарастания тока [7].}$$

Первый член (2) является сверткой и его оригинал находится из выражения

$$I_1(t) = \int_0^t (I_{\text{ex}}(\tau) + I_{\text{см}}(\tau)) F(t - \tau) d\tau.$$

Окончательное выражение, описывающее зависимость тока от времени, имеет вид

$$I(t) = \left[qN_D \sqrt{\frac{\pi\epsilon\epsilon_0}{2qN_D} \left(\frac{dU_F}{dt} \right) \tau_{\text{нв}}} \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{t}{\tau_{\text{нв}}}} + \right. \\ \left. + q(b+1)\bar{p} \sqrt{\frac{\pi\epsilon\epsilon_0}{2qN_D} \left(\frac{dU_F}{dt} \right) \frac{\tau_p \cdot \tau_{\text{нв}}}{(\tau_p + \tau_{\text{нв}})}} \cdot \text{erf} \sqrt{t \left(\frac{1}{\tau_{\text{нв}}} + \frac{1}{\tau_p} \right)} - \frac{(b+1)}{b} I_{R_0} \tau_{\text{нв}} \right] \frac{e^{-t/\tau_{\text{нв}}}}{\theta} - \\ - \frac{(b+1)}{b} \frac{I_{R_0}}{\left(\text{ch} \frac{w_p}{L_n} - \frac{(b+1)}{b} \right)}.$$

Регенеративное нарастание тока через $p-n-p-n$ -структуру начинается с момента t_g ($0 < t_g \leq t_F$), когда сумма заряда экстракции и заряда, введенного токами смещения, превысит $Q_{\text{кр}} = \frac{(b+1)}{b} I_{R_0} \tau_{\text{нв}}$, т. е. когда предэкспоненциальный множитель станет положительным. Введенную таким образом величину $Q_{\text{кр}}$ следует полагать критическим зарядом включения $p-n-p-n$ -структуры при высоких уровнях инжекции в n -базе, а время t_{gd} — временем задержки. На рис. 2 показана зависимость t_{gd} от скорости нарастания повторного напряжения (dU_D/dt) при различных значениях остаточного заряда.

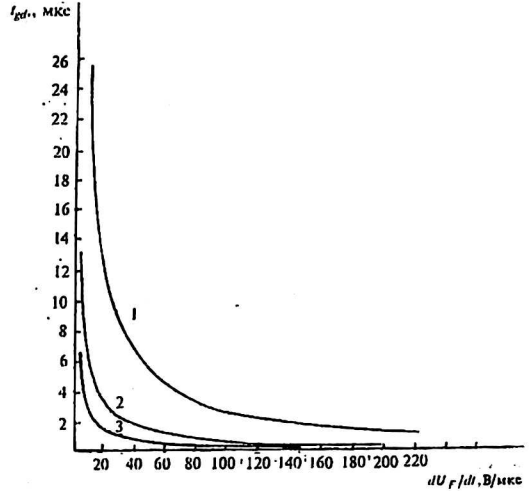


Рис. 2. Зависимость времени задержки включения от скорости нарастания повторного прямого напряжения при средних концентрациях остаточного заряда: 1 — $p = N_D$; 2 — $p = 2N_D$; 3 — $p = 3N_D$

Процесс поэтапного включения $p-n-p-n$ -структуры

При достаточно больших скоростях роста повторно приложенного напряжения dU_F/dt и значительных величинах остаточного заряда в n -базе в большей части p -базы реализуются высокие уровни инжекции, и процесс регенеративного роста тока протекает при высоких уровнях инжекции в обеих базах с постоянной нарастания $\tau_{вв}$ [8].

Технологические разбросы $Q_{кр}$ по площади структуры приводят к неодновременному включению всей структуры. Рассмотрим случай поэтапного включения каналов с одинаковой площадью $S_1 = S_2 = \dots = S_n = S$. Будем полагать, что времена жизни при высоких уровнях инжекции в каналах одинаковы $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = \tau$. Различие в величинах критического заряда каждого из каналов приводит к разнице времен задержек $t_{gd1} < t_{gd2} < t_{gd3} < \dots < t_{gdn}$.

При высоких уровнях инжекции в обеих базах падение напряжения на структуре связано с величиной тока и скоростью его нарастания соотношением [8]

$$U(t) = l \left(\frac{dI}{dt} + \frac{I}{\tau} \right),$$

где $l = (w_n + w_p)^3 / 12 \epsilon \epsilon_0 \gamma_{ns} \gamma_{ps} S$ — параметр, имеющий размерность индуктивности.

Рассмотрим процесс включения первого канала, имеющего задержку t_{g1} . При постоянной величине приложенного к структуре напряжения U_F рост тока в канале находится из уравнения

$$U_F = I_1 R + l \frac{dI_1}{dt} + \frac{l}{\tau} I_1.$$

Операторное изображение тока имеет вид

$$I_1(S) = \frac{U_F}{l} \frac{l}{S \left[\frac{R}{l} + \left(S + \frac{l}{\tau} \right) \right]} + \frac{I_{10}}{\left[\frac{R}{l} + \left(S + \frac{l}{\tau} \right) \right]},$$

где $I_{10} = I_1(t_{gd1})$.

При включении второго канала через время задержки t_{gd2} нарастание тока через структуру находится из уравнений

$$U_F = (I_1(t) + I_2(t))R + U(t),$$

$$U(t) = l \frac{dI_1}{dt} + \frac{l}{\tau} I_1 = l \frac{dI_2}{dt} + \frac{l}{\tau} I_2.$$

Их решение дает следующие выражения:

$$I_1(S) = I_2(S) + \frac{I_1(t_{gd2})}{\left(S + \frac{l}{\tau}\right)},$$

$$I_2(S) = \frac{U_F}{l} \frac{l}{S\left(S + \frac{l}{\tau_2}\right)} - \frac{RI_1(t_{gd2})}{l\left(S + \frac{l}{\tau}\right)\left(S + \frac{l}{\tau_2}\right)}.$$

Здесь $\frac{l}{\tau_2} = 2 \frac{R}{l} + \frac{l}{\tau}$.

Рассматривая поэтапное включение каналов, можно получить следующие рекуррентные соотношения для тока через n -й канал и падение напряжения на структуре

$$I_n(S) = \frac{U_F \tau_n}{l} \frac{l}{S(1 + \tau_n S)} - \frac{R[I_1(t_{gdn}) + I_2(t_{gdn}) + \dots + I_{n-1}(t_{gdn})] \tau_n}{l(1 + S(\tau))(1 + S\tau_n)}, \quad (3)$$

$$U(S) = \frac{U_F \tau_n}{\tau} \frac{l}{S(1 + \tau_n S)} + \frac{U_F \tau_n}{(1 + S\tau_n)} - \frac{R[I_1(t_{gdn}) + I_2(t_{gdn}) + \dots + I_{n-1}(t_{gdn})] \tau_n}{(1 + S\tau_n)}. \quad (4)$$

Здесь $\frac{l}{\tau_n} = \frac{l}{\tau} + n \frac{R}{l}$.

Зависимость тока $I_n(t)$ через n -й канал от времени и спад напряжения на $p-n-p-n$ -структуре в процессе включения описываются выражениями:

$$I_n(t) = \frac{U_F \tau_n}{l} \left(1 - e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_n}} \right) - \frac{R[I_1(t_n) + I_2(t_n) + \dots + I_{n-1}(t_n)] \left(e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau}} - e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_n}} \right)}{l(\tau - \tau_n)}, \quad (5)$$

$$U(t) = \frac{U_F \tau_n}{l} \left(1 - e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_n}} \right) + [U_F - R(I_1(t_n) + I_2(t_n) + \dots + I_{n-1}(t_n))] e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_n}}, \quad (6)$$

где $t_n = t_{ng}$ — момент включения n -го канала ($t \geq t_n$).

Явная зависимость тока через n -й канал и падения напряжения на нем от времени (5)–(6) позволяют рассчитать мощность потерь $P(t) = I_n(t)U(t)$ и энергию потерь $E(t) = \int_0^t P(t) dt$ при многоканальном включении $p-n-p-n$ -структуры.

Выражения (3)—(6) получены для произвольного выбора времени задержки включения каналов t_{gdn} . Это означает, что при совпадении значительного числа t_{gdn} можно рассматривать случай включения нескольких каналов $p-n-p-n$ -структуры. На рис. 3 приведены расчетные зависимости тока и напряжения от времени при многоканальном включении.

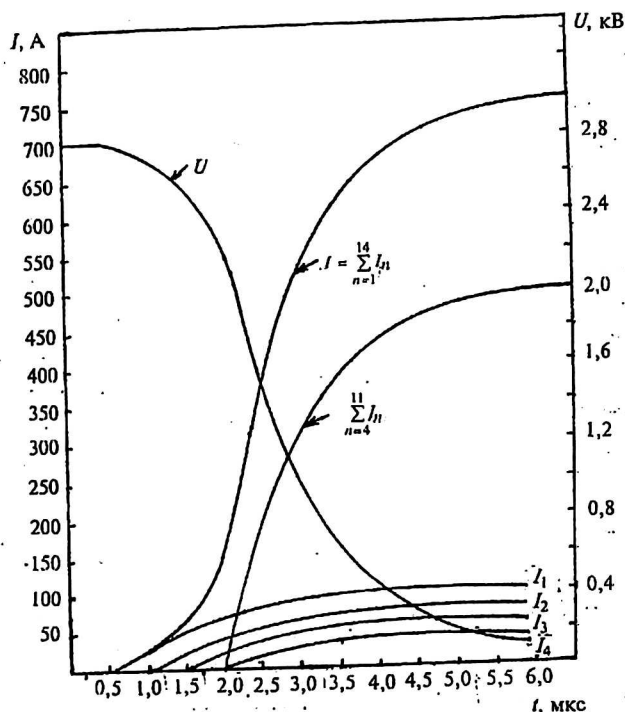


Рис. 3. Зависимость тока и напряжения на $p-n-p-n$ -структуре от времени при поэтапном включении 14 каналов при значениях параметров:
 $S = S_1 = S_2 = \dots = S_n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$; $W_n = 770 \text{ мкм}$; $W_p = 70 \text{ мкм}$;
 $\tau = 21 \text{ мкс}$; $R = 3,5 \text{ Ом}$; $U_F = 2,8 \text{ кВ}$

Регулирование величины $Q_{кр}$ либо за счет локального электронного или γ -облучения, либо за счет плотности технологической шунтировки позволяет создавать в $p-n-p-n$ -структуре участки с повышенным быстродействием.

В режимах, когда остаточный заряд мал ($p \approx 0$), dU/dt — стойкость прибора определяется лишь величиной I_{R_0} , т. е. плотностью технологической шунтировки. В режимах несанкционированного включения при большом остаточном заряде участки с повышенным быстродействием позволяют снизить плотность энергии потерь в приборе.

Выводы

1. При учете эффекта экстракции остаточного заряда определены условия включения $p-n-p-n$ -структур при высоких уровнях инжекции в n -базе при повторном приложении прямого напряжения. Показано, что при значительном остаточном заряде в n -базе $p-n-p-n$ -структуры условия включения выполняются на фронте импульса прямого напряжения.

2. Развита модель многоканального включения $p-n-p-n$ -структур при высоких уровнях инжекции в обеих базах, учитывающая разбросы плотности критического заряда по площади структуры.

Литература

1. Уваров А. И. Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов. — М.: Наука, 1969. С. 151—161
2. Боронин К. Д., Дерменджи П. Г. //Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18. № 10. С. 2123—2132.
3. Расчет силовых полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1980. — 184 с.
4. Грехов И. В., Горбатюк А. В., Костина Л. С. //Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 3. С. 606—614.
5. Горбатюк А. В., Павлышев Я. И., Паламарчук А. И., Попова М. В. //Там же. 1984. Т. 29. № 10. С. 2014—2021.
6. Бенда Х., Шпенке Е. //ТИИЭР. 1967. Т. 55. № 8. С. 92.
7. Кузьмин В. А., Павлик В. Я., Родов В. И. //Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18. № 1. С. 152—165.
8. Кузьмин В. А., Павлик В. Я., Шуман В. Б. //Там же, 1981. Т. 26. № 6. С. 1270—1274.
9. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. — 208 с.

Multichannel turn-on process of $p-n-p-n$ -structures

A. V. Konioukhov, Yu. M. Loktaev, V. Ya. Pavlik,
Yu. A. Chesnokov

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Conditions of turn-on $p-n-p-n$ -structures with higher residual charge in n -region at repeat impulse forward voltage are determined. The process of growth current with sequence turn-on channels at arbitrary delay times are calculated. The questions of distribution of critical charge in area structure in order to ensure safety turn-on at noncontrol influence are discussed.