

А. И. ГОМОНОВА, А. С. ЛОГГИНОВ, К. Я. СЕНАТОРОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ШИРОКОЙ БАЗЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРИОДА**

Описываются схема и метод измерения времени жизни неосновных носителей заряда в широкой базе четырехслойного полупроводникового триода. Дается теоретическое обоснование метода измерения. Выводится расчетная формула, связывающая измеряемое время рассасывания избыточного заряда с временем жизни. Приведены результаты эксперимента.

Полагая, что устройство и принцип действия этих приборов в настоящее время хорошо известны [1—9], ограничимся лишь необходимым для дальнейшего изложения схематическим описанием прибора. Схема (рис. 1,а) и вольтамперная характеристика (рис. 1,б) прибора даны на рис. 1.

Какие же процессы протекают при передаче сигнала через любую полупроводниковую структуру? Это перенос заряда неосновных носителей за счет дрейфа или диффузии или совместного их действия и рекомбинация неосновных носителей в базовых областях, где протекает дрейф и диффузия.

Совокупность процессов переноса и рекомбинации определяют заряд носителей в базах. При этом заряд, очевидно, будет при прочих равных условиях тем больше, чем слабее процесс рекомбинации.

Оценку скорости протекания рекомбинационных процессов принято связывать с понятием времени жизни носителей заряда. При рассмотрении конкретных приборов эта величина является некоторой эффективной величиной, учитывающей ряд факторов, ведущих к убыли заряда.

Очевидно, время выключения или включения полупроводникового прибора, связанное соответственно с убыванием или возрастанием заряда, должно определяться временем жизни. Это время входит во все предложенные и используемые на практике выражения, необходимые для расчета времен переключения в схемах.

По существу в четырехслойном приборе процесс переключения определяется состоянием двух базовых областей. Времена жизни в

этих областях могут существенно различаться. При этом измерение времени жизни в узкой базе при наличии вывода от нее, что всегда имеется в управляемых приборах, вполне доступно. Измерение это аналогично измерению времени жизни в обычных диодах [12].

Результаты измерений дают относительно малые величины, (порядка 0,1—0,3 мксек). Измерение же времени жизни в широкой базе затрудняется отсутствием вывода от этой базы. Но именно заряд в этой базе определяет инерционность прибора.

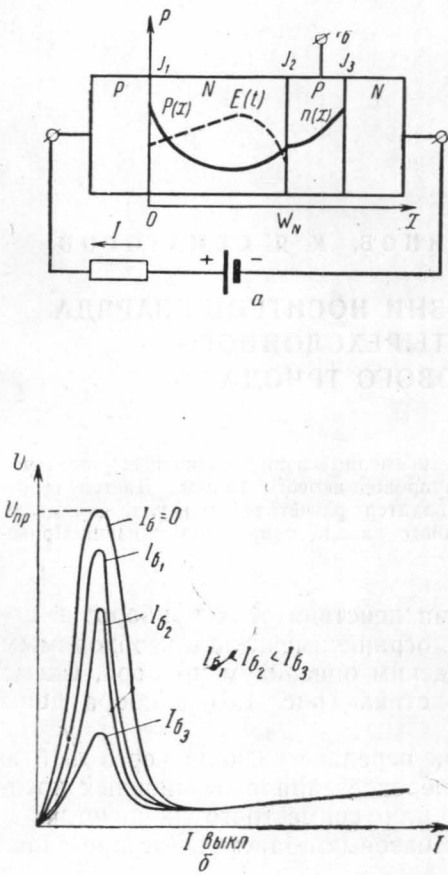


Рис. 1

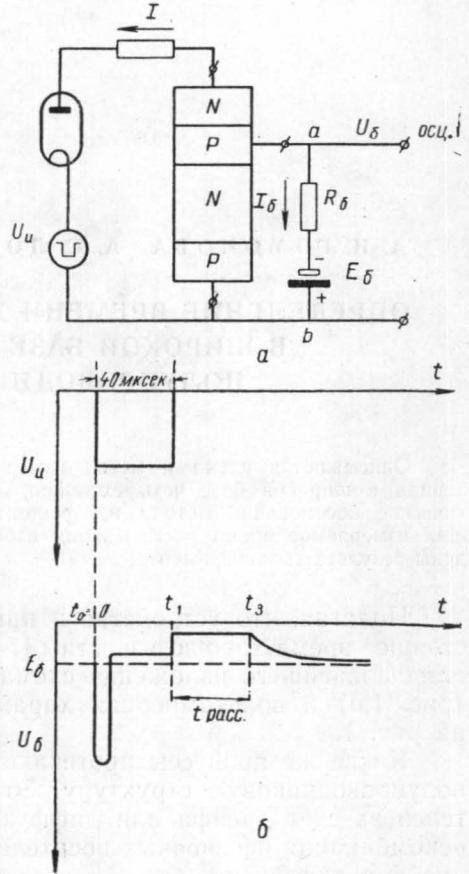


Рис. 2

В связи с этим была предпринята попытка разработать методику определения времени жизни неосновных носителей в широкой базе, используя наличные три вывода управляемого прибора.

Теоретическое обоснование похожего метода измерения в обычных полупроводниковых триодах, базы которых всегда тонки, возможно получить, используя известные выражения для режимов насыщения [11]. Специфической особенностью исследуемых четырехслойных приборов являются процессы, протекающие в широкой базе.

В связи с этим необходимо заново поставить теоретическую задачу о рассасывании избыточного заряда в широкой базе при большом сигнале. При этом ее необходимо ставить так, чтобы можно было обосновать предполагаемую методику определения времени жизни с использованием указанной схемы. На рис. 2,а изображена схема

включения четырехслойного триода, для исследования процесса рассасывания неосновных носителей в широкой базовой области. На рис. 2,б дана осциллограмма наблюдаемого напряжения в точках $a-b$. В момент $t=0$ на четырехслойный прибор подается импульс напряжения, который приводит триод в открытое состояние. В этом случае центральный переход находится в режиме насыщения. Таким образом, все три перехода смещены в прямом направлении. Распределение концентрации неосновных носителей во включенном состоянии для широкой базовой области с учетом электрического поля и больших уровней инжекции было получено в работе Кузьмина [9]. Оно показано схематически на рис. 1. После окончания импульса триод в течение некоторого времени остается в режиме насыщения, поэтому через центральный переход в это время протекает ток, определяемый напряжением батареи и последовательно включенным сопротивлением R_6 , $J_6 = \frac{U_6}{R_6}$.

Этот ток будет протекать до тех пор, пока концентрация у центрального перехода не достигнет равновесного значения p_{no} , при этом напряжение на центральном переходе станет равным нулю. Время протекания тока, равного $J_6 = \frac{U_6}{R_6}$, называется временем рассасывания носителей $t_{рас}$.

Процесс рассасывания неосновных носителей в широкой базовой области происходит за счет рекомбинации при наличии тока в цепи коллектор — база.

Теоретическая постановка задачи.

Будем рассматривать процессы только в широкой базе, поскольку процесс уничтожения заряда в тонкой базе заканчивается весьма быстро.

Эффективность крайнего эмиттерного перехода равна $\gamma=1$, что обычно хорошо выполняется на практике, так как проводимости эмиттерной области в 10^2-10^3 раз больше проводимости базовой области.

Четырехслойный триод будем рассматривать как одномерную модель. Заметим, что условие одномерности должно хорошо выполняться для $p-N-P$ — части структуры как за счет геометрии структуры в этой части, так и за счет отсутствия базового вывода, в направлении которого обычно имеется поперечная составляющая тока базы.

Эффективное время жизни носителей τ_p в широкой базовой области считается постоянным.

Плотность объемного электрического заряда ρ в базовой области равна нулю, т. е. база электрически нейтральна.

Задача рассматривается для большего уровня инжекции, т. е. в широкой базовой области $p_n \gg Nd$. Последнее предположение вполне реально, так как для существующих четырехслойных триодов большим уровням инжекции соответствуют уже токи включения (см. рис. 1), которые лежат в пределах 3—10 *ма*.

Распределения концентрации дырок p в базе за время рассасывания найдем, решая следующую систему уравнений, описывающих поведение дырок и электронов в широкой базовой области.

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \text{grad } p, \quad (1)$$

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \text{grad } n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_n}{\tau_p} - \frac{1}{q} \text{div } J_p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_p}{\tau_n} + \frac{1}{q} \operatorname{div} J_n, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} E = \frac{4\pi\rho}{\varepsilon}, \quad (5)$$

$$\rho = q(p - n + Nd), \quad (6)$$

$$J = J_p + J_n, \quad (7)$$

где все обозначения величин являются общепринятыми.

Сформулируем граничные условия для этой задачи. Можно считать, что у эмиттерного перехода $I_p(0) = I_0$, аналогично, ток коллектора: $I_p(W_N) = I_0$.

Решая систему двух уравнений (1) и (2) относительно тока и используя выражения для токов на границах, получим два граничных условия

$$\frac{dp}{dx}(0) = -\frac{I_0}{2qD_pS} = b_1,$$

$$\frac{dp}{dx}(W_N) = -\frac{I_0}{2qD_pS} = b_1.$$

В качестве начального условия возьмем распределение концентрации неосновных носителей, полученных в работах [9, 10],

$$p(x) = -a_1 L e^{-\frac{x}{L}} + \left(a_2 L e^{-\frac{W}{L} N} - a_1 L e^{-\frac{2W_N}{L}} \right) e^{\frac{x}{L}},$$

где

$$a_1 = -\frac{J}{2qD_p}, \quad a_2 = \frac{J[1 - \xi(b+1)]}{2b_q D_p},$$

L — эффективная диффузионная длина для больших токов $b = \frac{D_n}{D_p} = \frac{\mu_n}{\mu_p}$,

ξ — часть дырочного тока, дошедшая до коллектора.

Решая нормированное уравнение непрерывности для дырок при указанных граничных и начальных условиях, получим выражение для концентрации дырок в широкой базе для любого момента времени в течение процесса рассасывания заряда. Результат получается в виде знакпеременного сходящегося ряда и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} p(X, T) - p_n = W & \left\{ \lambda (a_2 - a_1) e^{-\frac{T}{\lambda}} + b_1 \times \right. \\ & \times \left(X - \frac{1}{2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi^2 n^2 (1 + \lambda \pi^2 n^2)} \left[2b_1 - \lambda \pi^2 n^2 \times \right. \\ & \times (a_2 - a_1 - 2b_1) e^{-\frac{T}{\lambda} (1 + \lambda \pi^2 n^2)} \left. \right] \cos \pi n X + \\ & + \sum_{m=2}^{\infty} \frac{2}{1 + \lambda \pi^2 m^2} \left[\lambda (a_2 - a_1) e^{-\frac{T}{\lambda} (1 + \lambda \pi^2 m^2)} \right] \cos \pi m X \left. \right\}, \end{aligned}$$

где

$$X = \frac{x}{W}, \quad T = \frac{L^2 t}{W^2 \tau_{ж}} = \lambda \frac{t}{\tau_{ж}}.$$

Проведенная оценка сходимости полученного выражения показывает, что можно ограничиться двумя членами ряда. Концентрация носителей у центрального перехода в момент $t = t_{рас}$ равна равновесной. Тогда для $t_{рас} > 2\tau_{ж}$ с учетом, что $\lambda = \frac{L^2}{W^2} \approx \frac{1}{9} \div \frac{1}{10} \approx \frac{1}{\pi^2}$ (что вполне реально для существующих четырехслойных триодов), получаем упрощенное выражение для времени рассасывания

$$t_{рас} = \tau_{ж} \ln a \frac{I}{I_0}.$$

С учетом данных для реальной структуры получаем

$$t_{рас} = \tau_{ж} \ln 0,37 \frac{I}{I_0}.$$

Полученное выражение может служить для практического определения времени жизни в широкой базовой области N -типа. Для этого нужно измерить время t рассасывания с помощью осциллографирования напряжения на базе (см. рис. 2,б).

Времена жизни, полученные таким способом для 12 образцов четырехслойных триодов, оказались в пределах 0,81—2,42 мксек. Измерения проведены для токов I , текущих через прибор в прямом направлении до $2, a$, и токов базы в процессе измерения $I_0 = 0,5 \div 1$ ма.

В заключение следует сказать.

В результате решения теоретической задачи о рассасывании избыточного заряда носителей в широкой базе при большом сигнале получено выражение для распределения концентрации неосновных носителей в этой базе с течением времени.

Предложены схема и метод измерения времени жизни неосновных носителей заряда в широкой базовой области, не имеющей внешнего вывода. Предложена расчетная формула для определения времени жизни неосновных носителей. Полученные значения для $\tau_{ж}$ хорошо согласуются с данными для четырехслойных управляемых десятиамперных полупроводниковых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moll I. L., Tanenbaum M., Goldey L. M., Holonyak N. Proc. SRE, 44, No. 9, 1174, 1956.
2. Shockley W., Electronic Industries, 16, No. 8, 1957.
3. Shockley W., Gibbons. Semiconductor Products, Jan/Feb, 9, 1958.
4. Mackintosh. Proc. IRE, 46, No. 6, 1229, 1958.
5. Aldrich R. W., Holonyak N. Proc. IRE, 46, No. 6, 1958.
6. Jouscher K. J. of Electronics and Control, 6, VIII, 573—586, 1957.
7. Misawa T. Electronics and Control, 7, No. 60, 523—533, 1958.
8. Mc. Duff. Communications and Electronics, март 1960 г.
9. Кузьмин В. А. «Радиотехника и электроника», январь 1963 г.
10. Стафеев В. И. ЖТФ, XXVIII, вып. 8, 1631, 1958.
11. Ржевкин К. С., Швейкин В. И. «Радиотехника и электроника», IV, вып. 7, 1959.
12. Gossick B. R. J. of Appl. Phys., 26, No. 11, 1356, 1955.

Поступила в редакцию
4. 4 1963 г.

Кафедра теории
колебаний