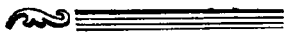
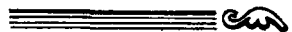


# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



№ 1 — 1965



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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ ПРИ БОЛЬШОМ СИГНАЛЕ

Проводится исследование динамики процесса установления напряжения на открытом четырехслойном приборе. Анализируется изменение концентрации неосновных носителей в базах и конфигурация электрических полей в них, а также связанное с этим перераспределение напряжений на элементах прибора, составляющих всю структуру.

Анализ процессов, протекающих в четырехслойном приборе, довольно сложен и требует рассмотрения явлений во всех четырех областях прибора. В то же время для практических целей необходимо знать, каким образом устанавливаются различные параметры приборов при изменении тока, протекающего через него, и, в частности, как меняется напряжение на приборе.

В работе [1] показано, что для существующих ныне приборов типа Д-235, Д-238 главную роль при определении их быстродействия играет широкая базовая область  $N$ -типа. Можно считать, что наличие заряда в узкой базовой  $P$ -области не оказывает существенного влияния на инерционные свойства приборов. Возможность пренебрежения узкой базовой  $P$ -областью связана, во-первых, с большим различием в легированности базовых областей (легированность  $P$ -базы на 1—2 порядка выше легированности  $N$ -базы), во-вторых, со значительным различием в ширине этих областей (ширина  $N$ -базы  $100 \div 150$  мк,  $P$ -базы —  $5 \div 10$  мк). Пренебрежение инерционными свойствами  $P$ -базы обусловлено различием эффективного времени жизни неосновных носителей в широкой и узкой базовых областях:  $\tau_p = (1 \div 3) 10^{-6}$  мксек и  $\tau_n = (0,3 \div 0,5) 10^{-6}$  мксек. Вышеизложенное дает возможность предположить, что процессы установления в четырехслойном приборе определяются главным образом изменением заряда в широкой базовой области. Специфической особенностью четырехслойных приборов является то, что ширина их базовой  $N$ -области больше диффузионной длины  $L_p$ . Поэтому исследование изменения концентрации неосновных носителей при изменении тока, протекающего через прибор, должно проводиться с учетом действия электрического поля. Кроме того, все процессы нужно исследовать при больших уровнях инжекции, ибо этому условию уже удовлетворяют токи включения четырехслойных приборов [1].

Статическая вольтамперная характеристика четырехслойного диода

во включенном состоянии (в режиме насыщения) с учетом влияния электрического поля и модуляции проводимости высокоомной базовой  $N$ -области подробно исследована в работе [1]. В настоящей работе исследуется динамический процесс установления напряжения на открытом приборе, процесс изменения концентрации носителей заряда в широкой базе и электрического поля в ней.

Практически процесс установления напряжения на четырехслойном приборе можно наблюдать по схеме, представленной на рис. 1. В момент  $t = 0$  на диод, находящийся во включенном состоянии (через диод протекает ток  $J$ ), подается положительный импульс тока. Длительность этого импульса должна быть достаточной для установления нового режима. Новому установившемуся режиму соответствует новая концентрация неосновных носителей в базах и новое напряжение на приборе. Установившаяся концентрация будет соответствовать току  $J + J_1$ , где  $J_1$  — ток в импульсе. Если ток  $J_1$  скачком уменьшить до нуля, то в базах будет происходить убывание избыточного заряда, накопленного за время импульса. Этот процесс закончится в тот момент, когда в базе будет вновь достигнута концентрация неосновных носителей, соответствующая току  $J$ . Если в качестве четырехслойного диода взять управляемый диод, то в нем напряжение между коллекторным и базовым электродами мало отличается от напряжения на всей структуре. Это еще раз подтверждает предположение о том, что главную роль в изучаемых в настоящей работе свойствах прибора играет широкая базовая область. В дальнейшем ограничимся рассмотрением установления концентрации неосновных носителей и полей только в широкой базовой области.

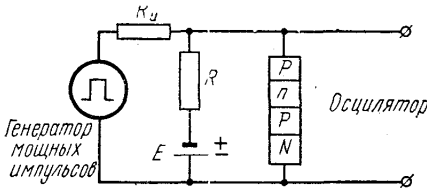


Рис. 1

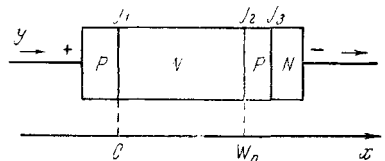


Рис. 2

### Теоретическое исследование процессов переключения

Распределение концентрации неосновных носителей в широкой базовой области описывается известной системой уравнений:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_n}{\tau_p} - \frac{1}{q} \operatorname{div} \bar{J}_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_p}{\tau_n} + \frac{1}{q} \operatorname{div} \bar{J}_n, \quad (2)$$

$$\bar{J}_p = q\mu_p p \bar{E} - qD_p \operatorname{grad} p, \quad (3)$$

$$\bar{J}_n = q\mu_n n \bar{E} + qD_n \operatorname{grad} n, \quad (4)$$

$$\bar{J} = \bar{J}_n + \bar{J}_p, \quad (5)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{4\pi q}{\epsilon} (p - n + N_d - N_a), \quad (6)$$

где  $p, n$  — концентрация дырок и электронов,  $p_n, n_p$  — равновесная концентрация неосновных носителей дырок и электронов,  $J_p, J_n$  — плот-

ности дырочного и электронного токов,  $\tau_p, \tau_n$  — эффективные времена жизни дырок и электронов, учитывающие все процессы, связанные с возникновением и убыванием носителей,  $E$  — напряженность электрического поля в базе,  $\mu_p, \mu_n, D_p, D_n$  — подвижности и коэффициент диффузии дырок и электронов,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды.

В общем случае уравнения нелинейны и решение задачи сопряжено с большими математическими трудностями. Для упрощения задачи сделаем следующие предположения:

1. Эффективность обоих эмиттерных переходов  $j_1$  и  $j_3$  (рис. 2) равна единице (коэффициент инжекции  $\gamma = 1$ ), т. е. ток через эмиттерный переход  $j_1$  — только дырочный, а через переход  $j_3$  — только электронный. Это условие обычно выполняется на практике, так как внешние эмиттерные области легированы значительно сильнее, чем внутренние базовые.

2. Четырехслойный диод представляется одномерной моделью. Следует отметить, что  $p$ - $n$  —  $p$ - $n$  диод лучше удовлетворяет условию одномерности, чем обычный полупроводниковый триод. Это обусловлено геометрией структуры и отсутствием вывода от широкой базовой области, в направлении которого обычно имеется поперечная составляющая базового тока.

3. Эффективное время жизни неосновных носителей  $\tau_p$  считается постоянным. В работе [2] показано, что при больших уровнях инжекции время жизни неосновных носителей не меняется.

4. Плотность объемного электрического заряда в базовой области равна нулю, т. е. база электрически нейтральна, и  $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial n}{\partial x}$ .

Для того чтобы ответить на вопрос об изменении концентрации неосновных носителей в широкой базе, необходимо решить уравнение непрерывности для дырок (одномерный случай (1)) с соответствующими граничными и начальными условиями. Сформулируем эти условия. Решим уравнения (3) и (4) для одномерного случая относительно плотности тока  $J_p$ . В результате получаем

$$\bar{J}_p = qD_p \frac{dp}{dx} \left[ 1 + \frac{(b-1)}{(b+1)p + bN_n} \right] + \frac{p\bar{J}}{(b+1)p + bN_n}, \quad (7)$$

где

$$\bar{J} = \bar{J}_n + \bar{J}_p, \quad b = \frac{\mu_n}{\mu_p} = \frac{D_n}{D_p}.$$

Для больших уровней инжекции (т. е. для случая  $p \gg N_n$ ) это уравнение будет иметь вид

$$\bar{J}_p = -\frac{2b}{b+1} qD_p \frac{dp}{dx} + \frac{\bar{J}}{b+1} \quad (8)$$

с учетом первого предположения  $\bar{J}_p(0) = J$ . Дырочная часть полного тока, протекающего через центральный переход  $j_2$ , выражается  $J_p(\omega_n) = \xi \bar{J}$ .

Расчеты, проведенные в работе [1], показывают, что величина  $\xi = 0,1$ . Таким образом, граничные условия для нашей задачи запишутся

$$\frac{dp}{dx}(0) = -\frac{J + J_1}{2qD_p S} = b_1, \quad (9)$$

$$\frac{dp}{dx}(\omega_n) = \frac{(J + J_1)[1 - \xi(b+1)]}{2qD_p b S} = b_2. \quad (10)$$

Начальное условие для распределения концентрации неосновных носи-

телей можно получить, решая уравнение непрерывности для дырок в стационарном случае. Как показано в работе [1], это уравнение имеет вид

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_n}{L}, \quad (11)$$

где

$$L = L_p \sqrt{\frac{2b}{b+1}}.$$

Решение этого уравнения:

$$p = p_n + Ae^{x/L} + Be^{-x/L}, \quad (12)$$

где

$$A = \frac{a_2 L - a_1 L e^{-\omega_n/L}}{e^{\omega_n/L} - e^{-\omega_n/L}}, \quad B = \frac{a_2 L - a_1 L e^{\omega_n/L}}{e^{\omega_n/L} - e^{-\omega_n/L}}. \quad (12a)$$

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  имеют вид:

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

Рассмотрим случай скачкообразного увеличения тока от  $J$  до  $J+J_1$ .

Для расчета прямого нестационарного процесса необходимо решить уравнение (1) для одномерного случая с граничными условиями (9), (10) и начальным условием (12).

Выражение для распределения концентрации неосновных носителей в широкой базовой  $N$ -области запишется так:

$$\begin{aligned} p(X, T) - p_n = & W \left\{ \lambda (b_1 - b_2 + a_2 - a_1) e^{-T/\lambda} + \right. \\ & \left. + \left[ b_2 \left( \lambda - \frac{1}{6} + \frac{1}{2} X^2 \right) - b_1 \left( \lambda + \frac{1}{3} - X + \frac{1}{2} X^2 \right) \right] \right\} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi^2 n^2 (1 + \lambda \pi^2 n^2)} [(b_1 + b_2) - \lambda \pi^2 n^2 (a_2 + a_1 - b_2 - b_1) e^{-T/\lambda(1 + \lambda \pi^2 n^2)}] \times \\ & \times \cos \pi n X + \sum_{m=2}^{\infty} \frac{2}{\pi^2 m^2 (1 + \lambda \pi^2 m^2)} [(b_1 - b_2) + \lambda \pi^2 m^2 (b_1 - b_2 + a_2 - a_1) \times \\ & \times e^{-T/\lambda(1 + \lambda \pi^2 m^2)}] \cos \pi m X, \quad (13) \end{aligned}$$

где  $X = \frac{x}{\omega_n}$  — безразмерное расстояние,  $\omega_n$  — толщина базы,  $T = \frac{D_p}{\omega_n^2} t = \frac{L^2 t}{\omega^2 \tau_p} = \lambda \frac{t}{\tau_p}$  — безразмерное время,  $\lambda = \frac{L^2}{\omega^2}$ . Зная выражение (13), трудно получить соотношение для электрического поля в широкой базе  $N$ -типа. Поле согласно системе уравнений для одномерного случая (1—6) равно:

$$E = \frac{J}{q\mu_p [(b+1)p + bN_n]} - \frac{kT}{q} \frac{(b-1)}{(b+1)p + bN_n} \cdot \frac{dp}{dX}. \quad (14)$$

Интегрирование  $E(X, T)$  по  $X$  для различных моментов времени позволяет исследовать процесс установления напряжения во времени

$$V_T = \int_0^1 E(X, T) dX. \quad (15)$$

В реально существующих четырехслойных приборах нет возможности измерять падение напряжения непосредственно на широкой базовой области и, следовательно, нет возможности прямо сопоставить теоретический результат с практическим. Измерения позволяют определить суммарное падение напряжения на трех  $p-n$  переходах, на толще областей и на контактах. Уравнение (13) позволяет определить напряжение на переходах  $j_1$  и  $j_2$ , т. е. при  $X=0$  и  $X=1$ , поскольку

$$V = \frac{kT}{q} \ln \frac{p}{p_n}. \quad (16)$$

Выражения (13), (14), (15) весьма громоздки, к тому же в выражениях (14) и (15) для получения точного решения необходимо учитывать большое число членов ряда в силу довольно медленной его сходимости, поэтому для вычисления  $p(XT)$ ,  $E(X, T)$  и  $V(T)$  была использована вычислительная машина «Стрела». Результаты вычислений приведены на рис. 3, 4, 5.

Эксперимент проводился на приборах типа Д-235, Д-238, при расчете были приняты следующие типовые параметры:  $L=40$  мк,  $\frac{W_n}{L}=3$ ,  $N_n=10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Для кремния, из которого изготовлен прибор,  $D_p=6,5$  см<sup>2</sup>/сек,  $b=4,8$ .

На рис. 3 показано изменение распределения концентрации неосновных носителей в базе  $N$ -типа во времени при подаче в открытый прибор положительной ступеньки тока в 1 а. На рис. 4 показано перераспределение напряженности электрического поля в базе при тех же условиях. Как и следует из физических соображений, с ростом концентрации неосновных носителей электрическое поле меняется за счет модуляции проводимости базы. На рис. 3 верхняя кривая дает распределение концентрации носителей для установившегося состояния. Эта кривая аналогична кривой распределения носителей, полученной в работе [1], в которой рассматривается стационарный режим.

Установление напряжения на приборе показано на рис. 5. Кривая 1 соответствует изменению напряжения на толще базы  $N$ -типа, кривая 2 — изменению напряжения на  $p-n$  переходе  $j_1$ , кривая 3 дает результирующее падение напряжения на всем приборе. Переходы  $j_2$  и  $j_3$  исключаются из рассмотрения, так как напряжение на всех трех переходах равно:  $V_j = V_{j_1} + V_{j_3} - V_{j_2}$ , но, как показано в работах [1, 3],  $V_{j_3} - V_{j_2} \approx \frac{kT}{q}$ , т. е.  $V_{j_2}$  и  $V_{j_3}$  близки по величине и противоположны по знаку, поэтому можно считать, что  $V_{j_2} \approx V_{j_3}$ , тогда  $V_j \approx V_{j_1}$ . Из рис. 5 видно, что главную роль в процессе установления напряжения на приборе, как и предполагалось, играет широкая база. Падение напряжения на переходе  $j_1$  меняется довольно слабо.

Для процессов установления при скачкообразном уменьшении тока все расчеты проводятся аналогично. Меняются только начальные и граничные условия.

### Сравнение теоретических и экспериментальных результатов

Проведенное выше теоретическое исследование позволяет рассчитать начальное падение напряжения на приборе при подаче положительной ступеньки тока, конечное значение напряжения в установившемся режиме и время установления напряжения на приборе. На рис. 6 изображена осциллограмма напряжения на четырехслойном приборе, наблюдаемая по схеме рис. 1. На этой осциллограмме хорошо заметно убыва-

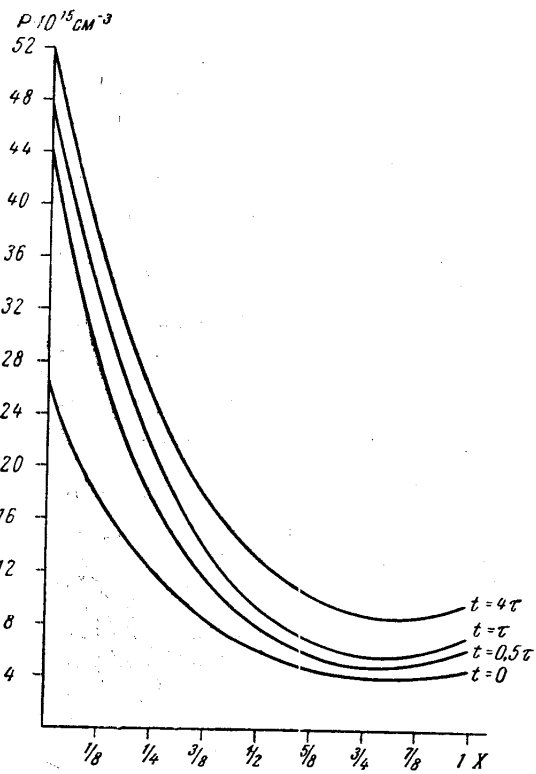


Рис. 3

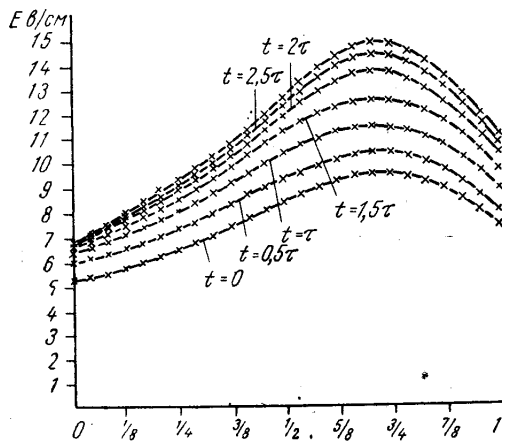


Рис. 4

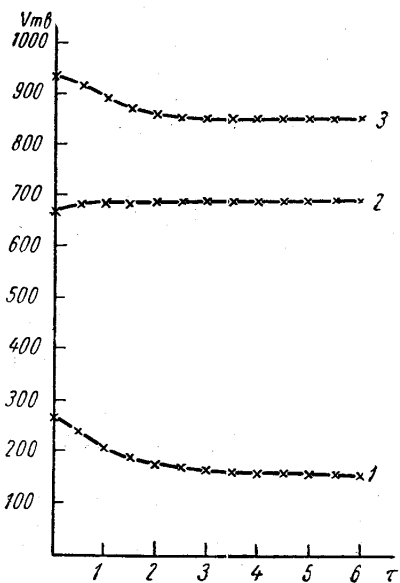


Рис. 5

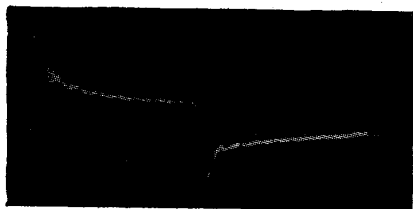


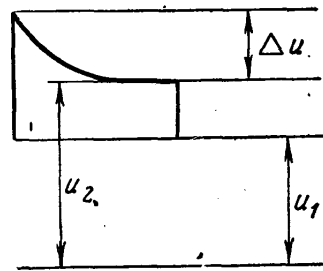
Рис. 6

ние напряжения во времени за счет увеличения концентрации неосновных носителей в широкой базовой области. Тот факт, что наблюдается модуляция именно широкой базовой области, подтверждается следующим образом.

Если на управляемом четырехслойном диоде наблюдать напряжение между коллекторным и базовым электродами, то осциллограмма напряжения мало отличается от напряжения на всем диоде. Так как вышеприведенный расчет описывает случай больших сигналов, то эксперимент необходимо ставить в соответствии с этим требованием. Для удовлетворительного обеспечения условия большого сигнала необходимо пропускать через прибор токи больше 300 *ма*, в этом случае  $\frac{P}{N_n} \gg 10$ . При

этом не требуется высокой чувствительности аппаратуры, и различные помехи не вносят существенных искажений. В соответствии с этим экспериментально наблюдалась переходная характеристика по напряжению при подаче на открытый прибор, через который протекает ток в 1 *а*, ступеньки тока также в 1 *а*. В таблице приведены результаты теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных перепадов напряжения на приборах

№ прибора	$\Delta u_{\theta}$	$u_{1\theta}$	$u_{2\theta}$
66	0,072	0,88	0,968
234	0,076	0,88	0,924
505	0,084	0,872	0,944
теоретический результат	0,085	0,85	—



Как видно из таблицы, имеет место хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Кривые установления напряжения на приборе позволяют определить время установления (по уровню 0,9 от значения поданного импульса). Определяемое таким образом время установления равно  $2,5 \tau_p$ . Экспериментально измеренное время установления составляет 7 *мксек*. Это значит, что время жизни неосновных носителей  $\tau_p = 2,8 \text{ мксек}$ . Таким образом, кривые установления падения напряжения на приборе позволяют примерно определить время жизни неосновных носителей в широкой базовой области.

## Выводы

Теоретически и экспериментально исследован процесс установления напряжения на открытом четырехслойном приборе при подаче на него ступеньки тока.

При теоретическом исследовании рассчитано распределение концентрации неосновных носителей и конфигурация электрических полей в базе четырехслойного прибора во время переходного процесса.

Знание изменения концентрации во времени позволило рассчитать временной ход напряжения на  $p-n$  переходах и таким образом выяс-

нить вклад модуляции сопротивления базы и изменения напряжения на  $p-n$  переходе  $J_1$  в общий переходной процесс установления напряжения на четырехслойном приборе.

Теоретический расчет показал, что процесс установления напряжения на четырехслойном приборе длится  $2,5 \tau_p$ .

Полученные теоретические результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин В. А. «Радиотехника и электроника», 8, вып. 1, 171, 1963.
2. Стафеев В. И. «Физика твердого тела», 1, вып. 6, 841, 1960.
3. Moll J. L. and oth. Proc. IRE, 44, No. 9, 1174, 1956.

Поступила в редакцию  
5. 2 1964 г.

Кафедра  
физики колебаний