

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

В.Ф. Агафонников

Переходные процессы в полупроводниковых диодах

Руководство к лабораторной работе  
по курсу "Физика полупроводниковых структур"  
для студентов радиоконструкторского факультета

Томск 2012

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В полупроводниковых диодах переходные процессы наблюдаются при любом, достаточно быстром изменении падения напряжения на нем или силы протекающего через него тока. Для наблюдения переходных процессов необходимо, чтобы время изменения  $U$  или  $J$  было меньше или сравнимо с временем жизни неосновных носителей заряда в базе диода ( $\tau_p$  для базы n-типа) или с постоянной времени перезарядки емкости р-п перехода  $\tau_{RG}$ . Эти условия вытекают из того, что переходные процессы в полупроводниковых диодах обусловлены двумя явлениями: установлением стационарного распределения концентрации неосновных носителей в базе диода и перезарядкой емкости р-п перехода.

Целью данной работы является изучение переходных процессов в полупроводниковых диодах при различных режимах его эксплуатации.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В зависимости от полярности подаваемого на диод напряжения и направления изменения  $U$  и  $J$  при анализе переходных процессов можно выделить следующие наиболее характерные случаи:

- 1) переключение диода из нейтрального в пропускное состояние;
- 2) переключение диода из пропускного в нейтральное состояние;
- 3) переключение диода из пропускного в запирающее состояние.

Рассмотрим детально каждый переходный процесс из вышеперечисленных.

Включение диода можно осуществить в двух режимах – режиме генератора напряжения или режиме генератора тока. Режим генератора тока реализуется, когда сопротивление нагрузки  $R_H$  значительно превосходит сопротивление диода  $R_D$ . При этом сила тока в цепи меняется так же, как и подаваемое с генератора прямоугольных импульсов напряжение, скачком от нуля до  $J = U_0 / R_D + R_H \approx U_0 / R_H$ , где  $U_0$  – амплитуда импульса напряжения на выходе генератора. Скачкообразное изменение силы тока в цепи обеспечивается безынерционностью омического сопротивления нагрузки. Включение диода в режим генератора напряжения будет иметь место, если  $R_D \gg R_H$ . Однако этот случай редко реализуется в практике, и мы его рассматривать не будем.

Анализ переходного процесса проведем при низком уровне инжекции ( $\Delta p/n_n < 1$ ) для плоскостного диода с полуограниченной базой n-типа, в котором рекомбинацией и генерацией носителей в области пространственного заряда (ОПЗ) р-п перехода можно пренебречь. При увеличении тока, протекающего через такой диод, от нуля до стационарного значения  $J_c = U_0 / R_H$  в момент времени  $t = 0$  возникает инжекция дырок из р- в n-область и их концентрация вблизи р-п перехода с течением времени будет увеличиваться. Спустя некоторое время в базе диода за счет процесса диффузии установится стационарное распределение дырок, соответствующее данному значению стационарного тока  $J_c$ . При этом число дырок, поступающих в базу диода в едини-

цу времени за счет инжекции, будет равняться числу дырок, гибнущих в это же время за счет рекомбинации с электронами.

Решая уравнение непрерывности для дырок в нестационарном случае при определенных граничных и начальных условиях, можно получить:

$$U(t) \approx U_c [1 - N_c e^{-t/\tau_p}] \quad (2.1)$$

где  $U_c$  – стационарное, установившееся напряжение на диоде;

$\tau_p$  – время жизни дырок в базе диода;

$N_c$  – некоторая константа.

Если толщина базы диода  $W \ll L_p$ , то формула, описывающая переходный процесс нарастания напряжения на диоде, будет аналогична (2.1), только вместо  $\tau_p$  будет некоторая величина  $\tau_s$ . При малых значениях скорости поверхностной рекомбинации ( $S_p$ ) в базе диода  $\tau_s$  будет связана с  $\tau_p$  и  $S_p$  следующим выражением:

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{S_p}{W} + \frac{1}{\tau_p} \quad (2.2)$$

где  $W$  – толщина базы диода.

С увеличением уровня инжекции, характер нарастания  $U(t)$  на диоде будет изменяться, так как падение напряжения на диоде будет  $U_g = U_{pn} + U_\delta$ , где  $U_\delta$  – падение напряжения на базе диода.

Падение напряжения на базе диода  $U_\delta$  должно уменьшаться с увеличением  $t$ , это следует и из чисто качественных соображений. Действительно, для базы диода n-типа при  $t = 0$

$$R_\delta \sim (e\mu_n n_0)^{-1},$$

а при  $t > 0$

$$R_\delta(t) \sim [e\mu_n n_0 + e(\mu_n \Delta n(t) + \mu_p \Delta p(t))]^{-1} \quad (2.3)$$

По мере накопления в базе диода инжектированных дырок и электронов, втягиваемых с омического контакта для восстановления электронейтральности,  $R_\delta$  должно уменьшаться.

Таким образом, при включении диода скачком тока на низком уровне инжекции он обладает инерционностью емкостного характера и инерционностью индуктивного характера на высоком уровне инжекции.

Выключение диода из пропускного состояния в нейтральное осуществляется разрывом цепи. Как показывает эксперимент, падение напряжения на диоде практически мгновенно уменьшается на некоторую величину  $\Delta U$ , а затем наблюдается плавный спад до нуля. Такую форму осциллограммы переходного процесса можно объяснить следующим образом. Первоначальный перепад напряжения на диоде обусловлен уменьшением до нуля падения напряжения на базе диода  $\Delta U = J R_\delta$ . При низком уровне инжекции оставшаяся после этого часть напряжения является падением напряжения на р-п переходе, которое уменьшается до нуля только после исчезновения избыточных дырок в базе диода.

Поскольку при  $t > 0$  ток через диод не течет, то избыточная концентрация дырок в базе диода может уменьшаться только за счет их рекомбинации с электронами. Итак, в рассматриваемом случае временная зависимость падения напряжения на р-п переходе определяется скоростью рекомбинаций избыточных дырок в базе диода с электронами.

Задача по нахождению аналитических выражений  $U(t)$  на р-п переходе решается так же, как и в предыдущем случае.

При низком уровне инжекции ( $\Delta p/n_n \ll 1$ )

$$U(t) \approx U_c e^{-t/\tau_p} \quad (2.4)$$

При высоком уровне инжекции

$$U(t) \approx U_c - KT/e \cdot t/\tau_p \quad (2.5)$$

Для диода с тонкой базой выражения для  $U(t)$  будут аналогичны, только вместо  $\tau_p$  будет  $\tau_n$ , как и в предыдущем случае.

Рассмотрим переходные процессы, протекавшие в полупроводниковом диоде при резком переключении его из пропускного состояния в запертое. Когда диод включен в прямом направлении в базе диода за счет инжекции идет накопление дырок. Величина заряда, накапливаемого в базе диода, равна  $Q = J_{np} \tau_p$ . При переключении диода примерно половина его будет выброшена назад в р-область р-п перехода, а другая половина исчезнет за счет рекомбинации с электронами базы.

Как известно, обратный ток диода определяется концентрацией неосновных носителей тока около перехода и описывается соотношением:

$$\text{обратный ток} \quad j_s = \frac{ep_n D_p}{L_p} + \frac{en_p D_n}{L_n} \quad (2.6)$$

а так как то  $n_p \ll p_n$

$$\text{то} \quad j_s = \frac{ep_n D_p}{L_p} \quad (2.7)$$

Если диод мгновенно переключить из прямого направления в обратное, то за счет накопленных в базе дырок  $p_{nl}$  в начальный момент обратный ток будет иметь гораздо большую величину, чем в стационарных условиях (так как  $p_{nl} \gg p_{n0}$ ) т.е. обратное сопротивление перехода будет очень мало. Поэтому максимальный выброс обратного тока диода  $J_0$  чаще всего ограничивается полным сопротивлением цепи  $R_{\Sigma}$ , состоящим из сопротивления диода, сопротивления генератора обратного напряжения  $U_{обр}$  и измерительного сопротивления.

Тогда

$$J_0 = U_{обр} / R_{\Sigma} \quad (2.8)$$

и осциллограмма токов будет иметь вид, показанный на рис. 2.1.

В этом случае р-п переход ведет себя подобно емкости, а так как величина накопленного в базе заряда определяется диффузионной емкостью, то, следовательно, процесс переключения должен описываться теми же парамет-

рами, что и диффузионная емкость, т.е.  $J_{np} \tau_p$ . Расчеты показывают, что длительность плоской части импульса обратного тока  $t_1$  (см. рис. 2.1) может быть определена для плоского р-п перехода по формуле:

$$\text{erf} \sqrt{\frac{t_1}{\tau_p}} = \frac{1}{1 + J_0 / J_{np}} \quad (2.9)$$

$$\text{где} \quad \text{erfz} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-y^2) dy$$

При  $0.1 < J_0 / J_{np} < 1$  формула (2.9) может быть упрощена:

$$t_1 = 0,2 J_{np} / J_0 \cdot \tau_p \quad (2.10)$$

Осциллограмма тока диода при переключении диода из прямого направления в обратное при наличии ограничивающего сопротивления

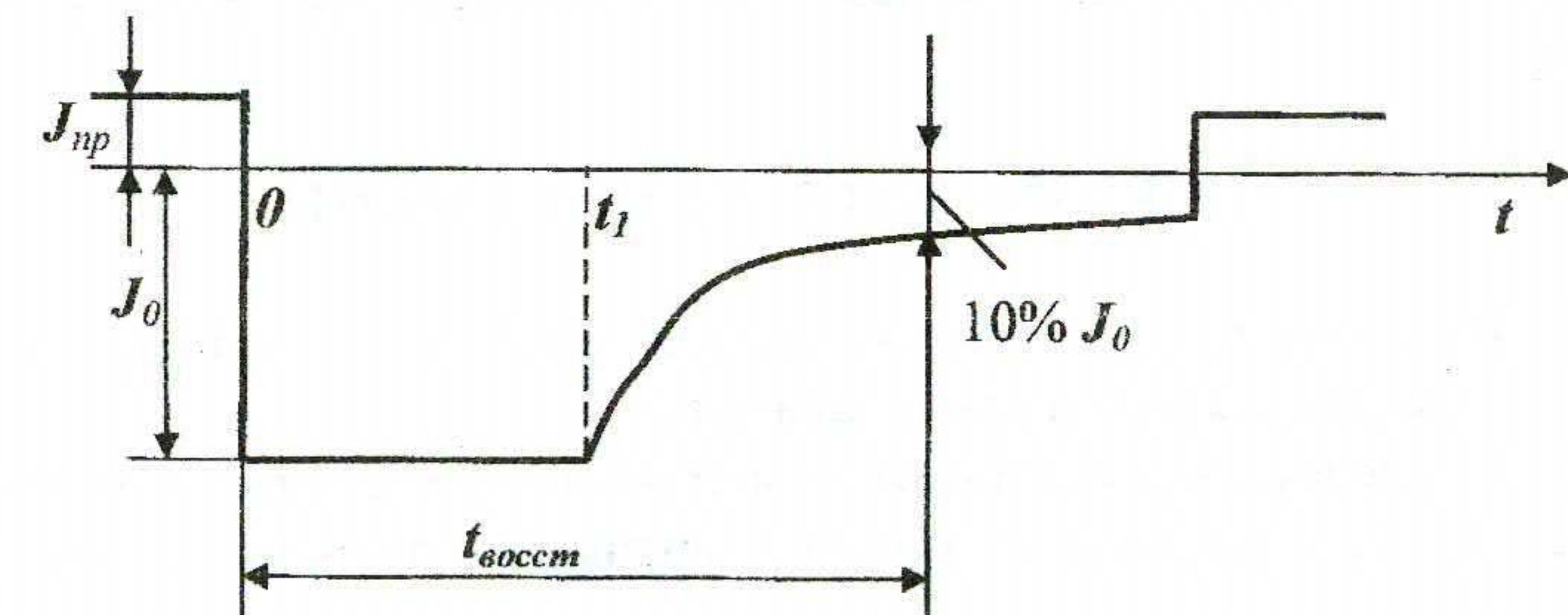


Рис. 2.1

Наблюдая картину переходного процесса, по осциллограмме тока через р-п переход (см. рис. 2.1) можно определить  $J_{np}$  и  $J_0$ ,  $t_1$  и по формуле (2.10) вычислить время жизни неосновных носителей в базе диода.

Чтобы количественно охарактеризовать переключающие свойства различных диодов, введен параметр - время восстановления обратного сопротивления диода  $t_{восст}$ ;  $t_{восст}$  измеряется интервалом времени от момента прохождения тока диода через нуль при переключении из прямого направления в обратное до момента достижения заранее заданной величины обратного тока  $J_p$ .  $J_p$  обычно выбирается в пределах  $(0,2-0,01) J_{np}$ , и оговаривается в технических условиях на диод.

При измерении  $t_{восст}$  сопротивление цепи выбирается достаточно малым (100 или 150 Ом), задается прямой ток и обратное напряжение.

В данной работе время восстановления  $t_{восст}$  определяется как время, в течение которого обратный ток диода достигает 10% от  $J_0$ . Это упрощает намерения и позволяет сравнивать переключающие свойства разнотипных диодов.

Наличие  $t_{восст}$  приводит при работе с короткими импульсами к значительному искажению импульсов, к падению запертых свойств диода, а при

работе на повышенных частотах - к уменьшению коэффициента выпрямления.

Каким образом можно уменьшить время восстановления?

Время восстановления можно уменьшить, уменьшая время жизни неосновных носителей в базе диода. С этой целью при изготовлении диодов база диода легировалась атомами никеля, золота, которые образуют в полупроводнике мощные центры рекомбинации, заметно уменьшая время жизни  $\tau_p$ . Но улучшение переходных характеристик наблюдалось только при токах меньше одного миллиампера. Реальные же диоды работают при больших токах, а при повышении плотности тока через переход рекомбинационные центры "забивались" и переставали влиять на  $\tau_p$ . Для уменьшения  $\tau_p$  диода облучали различными излучениями. При этом тоже возрастало прямое сопротивление.

Перспективным путем уменьшения  $\tau_p$  является уменьшение толщины базы диода.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Измерить  $t_{восст}$  для данных диодов при  $J_{np} = \quad$  мА,  $U_{обр} = \quad$  В,  $R_{\text{н}} = \quad$  Ом (по указанию преподавателя).

3.2. Исследовать и построить зависимости длительности полочки  $t_1$  от  $J_{np}$ ;  $U_{обр}$ ;  $R_{\text{н}}$ . Рассчитать и построить зависимость времени жизни от  $J_{np}$  по формуле:

$$\tau_p = \frac{t_1 \cdot U_{обр}}{0,2 J_{np} R_{\text{н}}}$$

3.5. Пронаблюдать переходные процессы включения в диодах на высоком и низком уровнях инжекции. Определить  $\tau_p$  при разных уровнях инжекции.

### 4. ПОЯСНЕНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЕ МАКЕТА

При выполнении работы на включенной схеме через испытуемый диод "Д" течет постоянный прямой ток по цепи: земля - выпрямитель - миллиамперметр - сопротивление  $R_1$  - диод - лампы Л1, Л2 - земля. Этот ток регулируется сопротивлением  $R_2$ . Если от генератора подаются отрицательные импульсы, то через диод "Д" течет обратный ток по цепи: емкость С1 - "Д" - переключатель SA3 - R16 - земля. Падение напряжения от этого тока на сопротивлении  $R_3$  снимается и замеряется на осциллографе. Вакуумные диоды Л1, Л2 позволяют исключить прямой ток через испытуемый диод, отводя его через Л1 и Л2, (см. приложение).

## 5. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ НА МАКЕТЕ

5.1. Пользуясь измерительной сеткой, по осциллограмме измерять время восстановления обратного сопротивления диодов, предложенных преподавателем. Для диодов Д810 обратное напряжение до 10 В, при более высоких напряжениях стабилитрон пробивается.

5.2. Положение переключателя  $R_3$  на макете соответствуют сопротивлениям:

1	-	50 Ом
2	-	430 Ом
3	-	910 Ом
4	-	2,7 КОм
5	-	3,9 КОм
6	-	4,3 КОм
7	-	5,6 КОм
8	-	6,2 КОм
9	-	6,8 КОм
10	-	8,2 КОм
11	-	10 КОм

Необходимо помнить, что полное сопротивление внешней цепи диода состоит из  $R_3$  и выходного сопротивления генератора (500 Ом или 75 Ом).

### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Что такое база диода?
- 6.2. Подробно объяснить происхождение "полочки" (см. рис. 2.1).
- 6.3. Объяснить вид зависимости "полочки" от внешних параметров ( $R_{\text{н}}$ ,  $J_{np}$ ,  $U_{обр}$ ).
- 6.4. Какой из переходных процессов наиболее длительный?

### 7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 7.1. Федотов А. Я. Основы физики полупроводниковых приборов. -М.: Сов. радио, 1969. -510с.
- 7.2. Викулин И. М., Стафеев В.Н. Физика полупроводниковых приборов. -М.: Сов. радио, 1980. -197с.
- 7.3. Носов Ю. Р. Физические основы работы полупроводникового диода в импульсном режиме. -М.: Наука, 1968. - 100с.
- 7.4. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. -Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2000 -334с.