

Государственный комитет Российской Федерации по высшей школе

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА

Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА
И БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к лабораторной работе № 207

Казань – 2009

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА И БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА: составитель: Урманчиев Л.М., Куншина Н.Б. 2010. 14 с.

Методические указания к лабораторной работе № 207/ Казан. гос. техн. ун-т.

Цель работы: изучение переходных процессов в полупроводниковом диоде и биполярном транзисторе в ключевом режиме, нахождение характеристических времён, изучение их зависимости от параметров прибора и схемы.

Ключевой режим.

Полупроводниковые приборы широко используются в качестве переключателей, т.е. устройств, имеющих два состояния: «открыто», когда сопротивление прибора очень мало, и «закрыто», когда оно очень велико. Время перехода диода из одного состояния в другое должно быть по возможности малым, так как этим определяется быстродействие аппаратуры.

Переходные процессы в полупроводниковых приборах существенно зависят от амплитуды импульса.

При малых плотностях тока переходные процессы в диоде определяются зарядом и разрядом барьерной ёмкости диода. Аналогичные процессы совместно с конечным временем пролёта носителей через базу определяют переходные характеристики транзистора в активном режиме.

Ключевой режим работы характеризуется большой амплитудой переключающего импульса, когда диод или транзистор переходят из состояния с большим внутренним сопротивлением (ключ разомкнут) в состояние с малым сопротивлением (ключ замкнут) и обратно. В этом режиме основными процессами, определяющими переходные характеристики, являются процессы накопления и рассасывания неравновесных носителей в базе прибора. Процессы заряда и разряда барьерных ёмкостей играют второстепенную роль. Ключевой режим работы полупроводниковых приборов лежит в основе принципа действия цифровых электронных схем.

Включение и выключение диода.

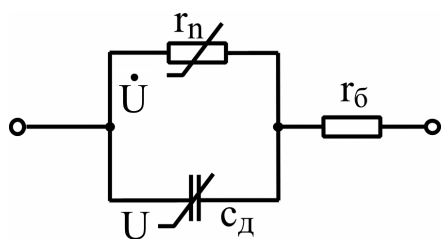


Рис.1

Рассмотрим явления, происходящие в диоде при прохождении через него прямоугольного импульса тока. Диод условно можно представить в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 1.

В этой упрощённой схеме диод представляется в виде последовательного

соединения сопротивления базы $r_{\bar{b}}$ и нелинейного сопротивления $p-n$ – перехода $r_{п}$, параллельно которому включена ёмкость $C_{д}$, складывающаяся из барьерной и диффузионной ёмкостей диода.

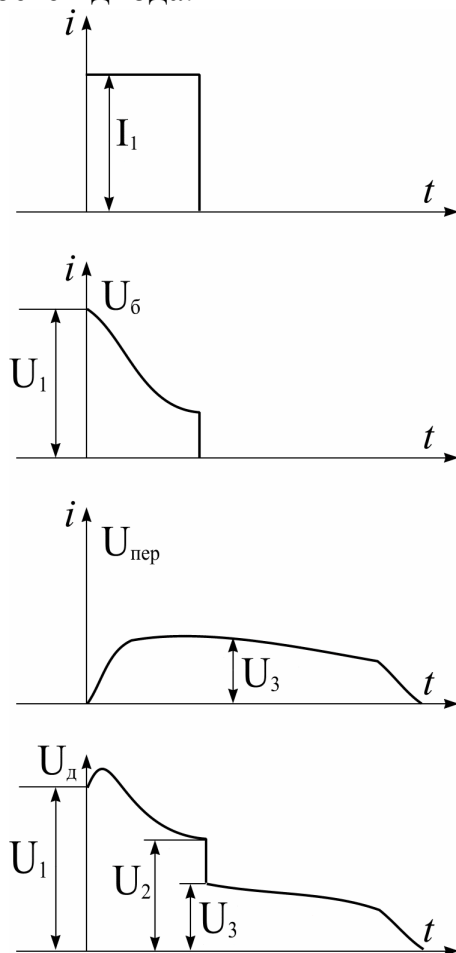


Рис.2

Временные диаграммы тока падения напряжения на базе, на переходе и суммарного напряжения на диоде при подаче импульса прямого тока представлены на рис.2. В начальный момент времени напряжение на диоде U_1 определяется падением напряжения на сопротивлении базы $r_{\bar{b}0}$; напряжение на переходе, шунтированном ёмкостью, отсутствует. По мере накопления дырок в базе сопротивление базы и, следовательно, напряжение на ней уменьшается. Ёмкость перехода заряжается, и напряжение перехода увеличивается.

В момент окончания импульса тока падение напряжения на базе диода скачком падает до нулевого значения. Величина скачка напряжения на диоде U_2-U_3 определяется амплитудой импульса тока I_1 и установившимся значением сопротивления базы $r_{\bar{b} \text{ уст.}}$.

Таким образом,

$$r_{\bar{b}0} = U_1 / I_1, \quad r_{\bar{b} \text{ уст.}} = (U_2 - U_3) / I_1. \quad (1)$$

Время установления прямого напряжения определяется на уровне 1,1 от установившегося значения при большом уровне инжекции или на уровне 0,9 U_2 и при малом уровне инжекции, когда напряжение на диоде возрастает.

После окончания импульса прямого тока напряжение на диоде определяется концентрацией неравновесных носителей в базе на границе с p - n -переходом:

$$U_D = U_{пер} = \varphi_T \lg \frac{p_n |_{x=0}}{p_{no}} \quad (2)$$

где $\varphi_T = \frac{kT}{e}$ – температурный потенциал (при комнатной температуре $\varphi_T \approx 0,026B$); $p_n |_{x=0}$ – концентрация дырок в базе на границе с p - n - переходом; p_{no} – равновесная концентрация дырок в базе.

Накопленные вблизи p - n -перехода дырки исчезают вследствие рекомбинации. Кроме того, они диффундируют вглубь базы. Основной вклад в изменение концентрации вносит рекомбинация, что приводит к экспоненциальному уменьшению концентрации дырок вблизи запирающего слоя. При больших уровнях инжекции спад напряжения на диоде на начальном участке происходит по линейному закону:

$$U_D = U_{пер} = U_3 - \varphi_T \frac{t}{\tau_p}, \quad (3)$$

где τ_p – время жизни неравновесных носителей в базе. Эта закономерность нарушается, когда избыточная концентрация дырок становится соизмеримой с равновесной. В конце переходного процесса наблюдается более крутой спад напряжения на диоде.

Уравнение (3) позволяет легко определить время жизни дырок в базе диода:

$$\tau_p = \varphi_T \frac{\Delta t}{\Delta U_D} \quad (4)$$

Для этого измеряют перепад напряжения ΔU_D на линейном участке кривой $U_D(t)$ и время Δt соответствующее этому перепаду.

Переключение диода из прямого направления в обратное.

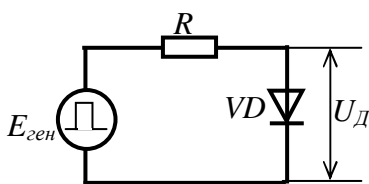


Рис.3

Рассмотрим диод, включённый в схему последовательно с резистором (рис.3). Переходные процессы в диоде, протекающие при смене полярности напряжения источника, зависят от величины сопротивления. Если сопротивление R мало, ток в цепи определяется током диода, так как большая часть напряжения прикладывается к диоду. Если же сопротивление R велико, то ток через диод обусловлен этим сопротивлением, по крайней мере, до тех пор, пока концентрация неосновных носителей на границах запирающего слоя остаётся повышенной.

В ключевом режиме прямой ток, как правило, ограничен сопротивлением R , прямое напряжение на диоде мало по сравнению с напряжением источника.

Временные диаграммы для этого случая приведены на рис.4:

Процессы при переключении диода. В исходном состоянии диод находится при обратном смещении $-E_2$, в цепи протекает ничтожный обратный ток I_0 . В момент $t=0$ подан импульс прямого напряжения E_1 (рис.4а). Прямой ток ограничен сопротивлением R : $I_1=E_1/R$, на диоде возникает падение напряжения $\Delta U_1=r_{\delta 0}I_1$. По мере заряжения емкости диода напряжение на диоде возрастает до максимального значения $U_{\text{пр.и}}$, а затем уменьшается из-за уменьшения сопротивления базы. Время установления прямого напряжения определяется по уровню 1,1 от установившегося значения.

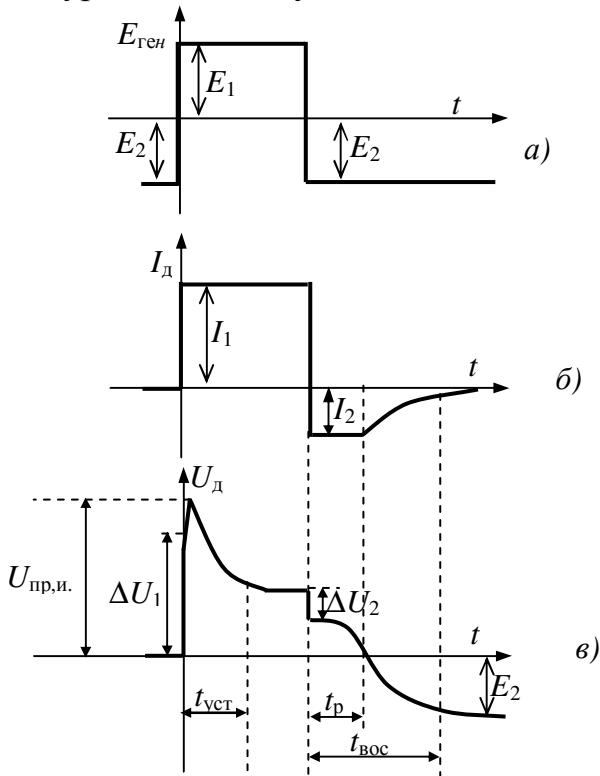


Рис.4

ной формуле

$$t_p = -\tau_p \ln \left[1 - \left(\frac{I_1}{I_1 + I_2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

После этого начинается процесс восстановления обратного сопротивления. Время восстановления обратного сопротивления диода $t_{\text{вос}}$ определяется как время, в течение которого обратный ток диода после переключения полярности приложенного напряжения с прямого на обратное достигает заданного уровня. Обычно принимается уровень 0,1 или 0,01 от значения прямого тока.

При переключении на обратное напряжение $-E_2$ возникает обратный ток I_2 :

$$I_2 = (E_2 + U^*)/R,$$

где U^* – напряжение открытого $p-n$ -перехода. На диоде появляется скачок напряжения ΔU_2 (рис.4в), обусловленный изменением падения напряжения на установившемся сопротивлении базы $r_{\delta \text{ уст}}$:

$$\Delta U_2 = (I_1 + I_2)r_{\delta \text{ уст}}$$

При этом на диоде сохраняется прямое напряжение, происходит рассасывание заряда: неосновные носители экстрагируются током через $p-n$ -переход и частично исчезают за счет рекомбинации. Время, за которое концентрация неравновесных носителей заряда на границе $p-n$ -перехода обращается в ноль, t_p , называется временем рассасывания. Время рассасывания t_p , можно оценить по приближённой формуле

Ключевой режим работы биполярного транзистора

Характер переходных процессов в транзисторе зависит от схемы включения и внутреннего сопротивления источников сигнала. Наибольшее распространение нашла схема ОЭ, поскольку она позволяет получить усиление по току. На рис.5 приведена схема простейшего транзисторного ключа. На рис.6 показано семейство статических выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ, нагрузочная характеристика и расположение рабочих точек А и В. Имеются три характерные области работы транзистора:

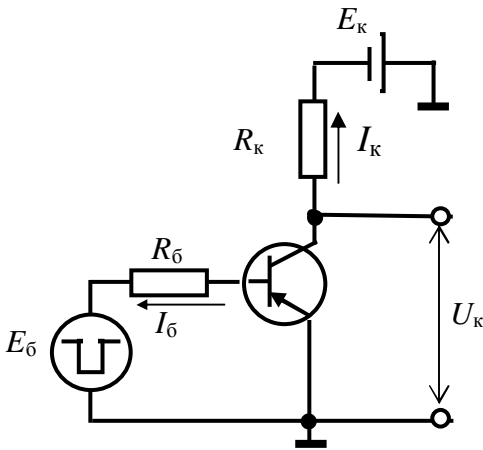


Рис. 5

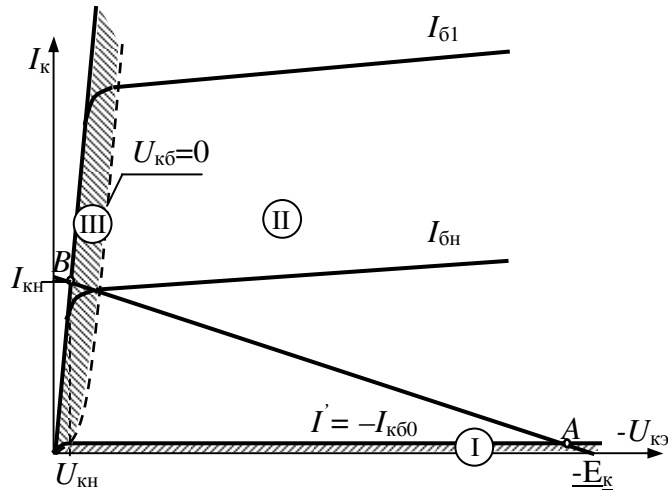


Рис. 6

область выключения (отсечки) I, область активного режима II и область насыщения III. В ключевых схемах транзистор находится в активном режиме лишь в переходном состоянии. В области насыщения коллекторный переход смещен в прямом направлении и инжектирует носители в базу, граница между областями II и III определяется условием $U_{кб}=0$. На рис.6 показана выходная характеристика при токе базы $I_{бн}$, соответствующей этой границе.

Если на базу подано запирающее (положительное для *p-n-p*-транзистора) напряжение $E_{б2}$, то ток базы равен $I_{б} \approx -I_{кб0}$, а ток коллектора $I'_к = I_{кб0}$. К коллекторному переходу приложено напряжение:

$$U_к = E_к - I'_к R_к \approx E_к$$

Рабочая точка на выходной характеристике находится в положении А, т.е. в режиме отсечки – транзистор закрыт. В точке А напряжение на электродах практически совпадает с эдс источников питания:

$$U_к \approx E_к; \quad U_б \approx E_{б2} \quad (6)$$

При подаче в цепь базы отпирающего тока $I_{б1}$ рабочая точка перемещается в положение В, в цепи коллектора протекает ток $I_{кн}$ и напряжение коллектора становится равным

$$U_{кн} = E_к - I_{кн} R_к$$

Статические параметры ключа: остаточное напряжение $U_{кн}$ во включенном состоянии (рис.6, точка В) и остаточный ток в выключенном (запертом) со-

стоянии (точка *A*). В точке *B* токи электродов определяются параметрами внешних цепей:

$$I_{\delta 1} \approx E_{\delta 1} R_{\delta}; \quad I_{\text{кн}} \approx E_{\text{к}} / R_{\text{к}}; \quad (7)$$

Для перевода в режим насыщения необходимо выполнить условие

$$I_{\delta 1} > I_{\text{бн}} \quad (8)$$

или, что то же

$$BI_{\delta 1} > I_{\text{кн}}, \quad (8a)$$

где $B=I_{\text{кн}}/I_{\text{бн}}$ – коэффициент усиления тока базы в режиме большого сигнала. Силу неравенства (8) характеризуют особым параметром – степенью насыщения S :

$$S=I_{\delta 1}/I_{\text{бн}} \quad (9)$$

Рассмотрим переходные процессы, происходящие при переключении ключа из состояния «выключено» в состояние «включено» и обратно. Временные диаграммы напряжений, токов накопленного заряда базы при включении и выключении транзисторного ключа приведены на рис.7.

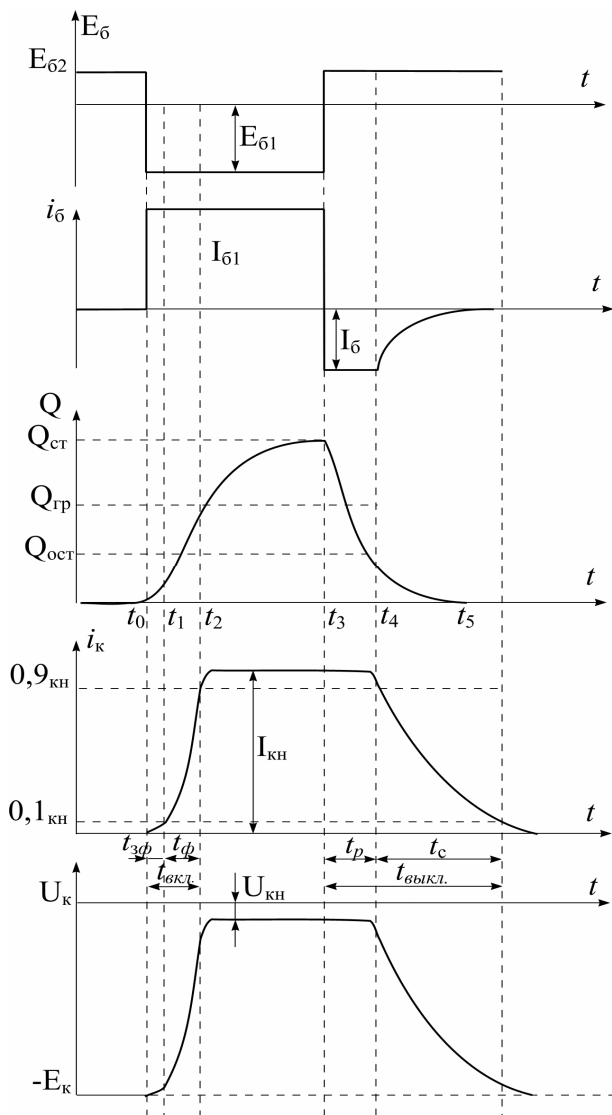


Рис.7

В исходном состоянии транзистор закрыт положительным напряжением $E_{\delta 2}$. Процесс отпириания транзистора при подаче на базу отрицательного напряжения $E_{\delta 1}$ можно разделить на три этапа: задержка фронта, формирование фронта и накопление заряда. Этап задержки фронта обусловлен зарядом входной емкости запертого транзистора от значения $E_{\delta 2}$ до напряжения открывания транзистора U^* (для кремниевого транзистора $U^* \approx 0,6B$, для германиевого $U^* \approx 0,2B$). Этот процесс протекает с постоянной времени τ_c

$$\tau_c = R_{\delta} C_{\text{вх}} \quad (10)$$

Входную емкость обычно принимают равной сумме барьерных емкостей эмиттерного и коллекторного переходов:

$$C_{\text{вх}} = C_{\text{э бар}} + C_{\text{к бар}} \quad (11)$$

Время задержки фронта $t_{3\phi}$ можно определять по формуле:

$$t_{3\phi} = \tau_c \ln \frac{E_{\delta 1} + E_{\delta 2}}{E_{\delta 1} - U^*} \quad (12)$$

В момент t_1 открывается эмиттерный переход и начинается инжекция носителей в базу, транзистор переходит в активный режим. На этом этапе коллекторный ток возрастает до значения $I_{кн}$. Процесс формирования фронта характеризуется эквивалентной постоянной времени $t_{оэ}$:

$$\tau_{оэ} = \tau + (B + 1)R_k \bar{C}_k \quad (13)$$

где τ – время жизни неосновных носителей в базе; \bar{C}_k – усредненная емкость коллекторного перехода. Длительность фронта $t_{\phi} = t_2 - t_1$ определяется формулой:

$$t_{\phi} = \tau_{оэ} \ln \left(\frac{BI_{\delta 1}}{BI_{\delta 1} - I_{кн}} \right) = \tau_{оэ} \ln \left(\frac{S}{S - 1} \right) \quad (14)$$

при $S \gg 1$ формула (14) упрощается:

$$t_{\phi} \approx \tau_{оэ} / S \quad (15)$$

В конце этапа формирования фронта в базе транзистора накапливается заряд $Q_{гр}$, а напряжение на переходе коллектор – база падает до нуля. После того, как транзистор начал работать в режиме насыщения, заметных внешних изменений в схеме ключа не происходит. Однако продолжается накопление заряда, причём на данном этапе заряд накапливается не только в базовом, но и в коллекторном слое. В конце этапа стационарный заряд $Q_{ст}$ определяется выражением

$$Q_{ст} = I_{\delta 1} \bar{\tau}, \quad (16)$$

где $\bar{\tau}$ – среднее время жизни носителей в базовом и коллекторном слоях. Длительность этого процесса составляет примерно $3\bar{\tau}$. Если длительность входного импульса меньше, чем $3\bar{\tau}$, накопленный заряд будет меньше стационарного значения.

Процесс выключения транзистора начинается в момент t_3 (рис.7), когда на базу подаётся запирающее напряжение. В момент переключения на обоих $p-n$ -переходах сохраняются прямые смещения, близкие к U^* . При этом коллекторный ток не меняется и остаётся равным $I_{кн}$. Базовый ток принимает значение:

$$I_{\delta 2} = -(E_{\delta 2} + U^*) / R_{\delta} \quad (17)$$

На первом этапе процесса выключения происходит рассасывание накопленного заряда током $I_{\delta 2}$. Окончание этапа рассасывания характеризуется тем, что концентрация избыточных носителей на коллекторной границе базы падает до нуля и на коллекторном переходе восстанавливается обратное напряжение. Только после этого может начаться уменьшение коллекторного тока и формирование среза импульса. Длительность этого процесса называется временем рассасывания t_p или временем задержки среза $t_{зс}$. В конце этого рассасывания в базе транзистора остаётся некоторый остаточный заряд $Q_{ост}$. Время рассасывания определяется выражением

$$t_p = \bar{\tau} \ln \left(\frac{I_{\delta 1} + I_{\delta 2}}{I_{\delta H} + I_{\delta 2}} \right) \quad (18)$$

Если запирающий ток настолько мал, что выполняются условия $I_{\delta 2} \ll I_{\delta 1}$, $I_{\delta 2} \ll I_{\delta H}$, это выражение принимает вид

$$t_p = \bar{\tau} \ln \cdot \frac{I_{\delta 1}}{I_{\delta H}} = \bar{\tau} \ln S \quad (19)$$

По окончании этапа рассасывания начинается последний этап переходного процесса – запираение транзистора. Длительность запираения обычно определяется процессом заряда коллекторной ёмкости, протекающей с постоянной времени $\tau_k = R_k \bar{C}_k$, длительность среза по уровню $I_k = 0,1 \cdot I_{кн}$ равна

$$t_c \approx 2,3 R_k \bar{C}_k \quad (20)$$

Общая инерционность транзисторного ключа характеризуется временами включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$:

$$t_{вкл} = t_{зф} + t_{\phi}; \quad (21)$$

$$t_{выкл} = t_p + t_c; \quad (22)$$

При практическом определении времён $t_{зф}$, t_{ϕ} , t_p , t_c обычно используются уровни $0,1 I_{кн}$ и $0,9 I_{кн}$

Описание лабораторного макета.

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис.8. Макет позволяет использовать переходные характеристики диода и транзистора в различных режимах работы. Генератор прямоугольных импульсов подключается к клеммам U_2 . С помощью переключателя S_1 осуществляется выбор последовательного сопротивления в цепи генератора. Подключение исследуемого прибора (VD или VT) производится переключателем S_2 .

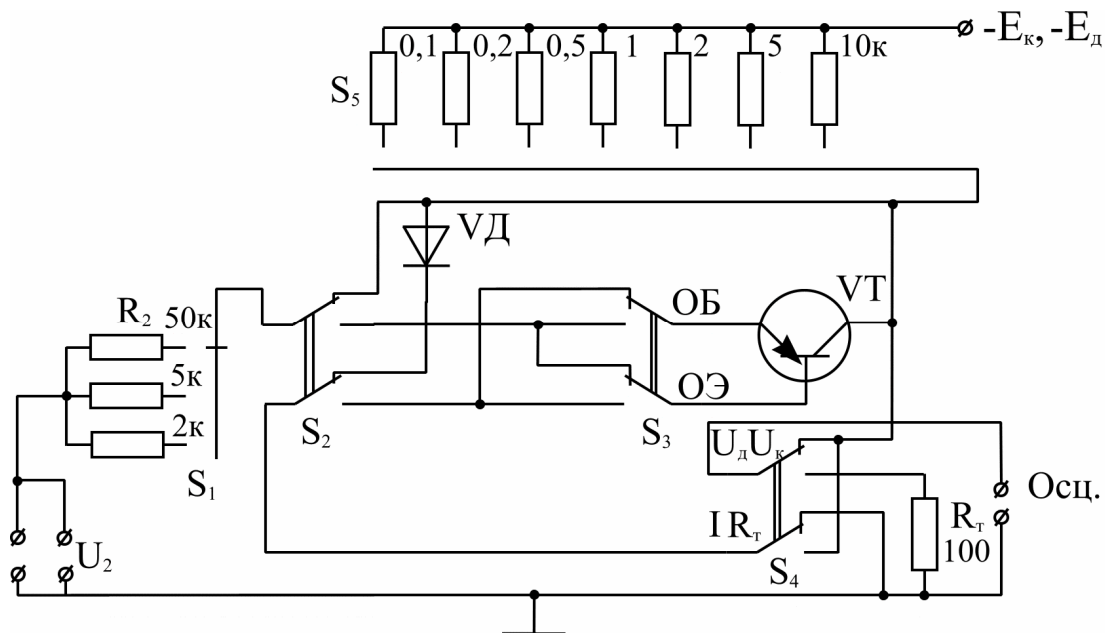


Рис.8

Транзистор можно включить в схему с общей базой или общим эмиттером с помощью переключателя $S3$. Переключатель $S4$ позволяет измерять падение напряжения на исследуемом приборе или на токоснимающем сопротивлении $R_T = 100$ Ом. Выбор сопротивления R_K в цепи коллектора транзистора, а также в цепи источника обратного смещения диода R_D осуществляется переключателем $S5$. В частности $S5$, позволяет отключать источник питания.

Все напряжения, за исключением напряжения питания E_K (E_D), измеряются осциллографом. Напряжение E_K (E_D) подаётся от сети постоянного тока 12 В с помощью специального разъёма.

Приборы, используемые в работе:

- лабораторный макет;
- генератор прямоугольных импульсов Г5-54;
- двухканальный осциллограф GOS-7630FC.

Порядок выполнения работы

Прежде чем приступать к выполнению работы, следует внимательно рассмотреть передние панели используемых приборов и уяснить назначение ручек управления. В данной работе исследуются характеристики кремниевого сплавного диода Д226 и германиевого сплавного $p-n-p$ -транзистора МП26.

З а д а н и е 1. Исследовать переходные характеристики диода при включении и выключении прямого тока, определить начальное $r_{б0}$ и конечное $r_{б\text{уст}}$ значения сопротивления базы, время жизни неравновесных носителей в базе τ_p .

Установить с помощью переключателя $S1$ макета $R_2 = 50$ кОм. Подсоединить выход генератора Г5-54 и вход канала 1 осциллографа к входным клеммам макета, вход канала 2 осциллографа подсоединить к выходным клеммам макета. Установить режим внешней синхронизации осциллографа от генератора. Установить: длительность импульса – 5 мкс, полярность – положительная, временной сдвиг – 0...1 мкс, частота повторения – 10 кГц, масштаб по оси “х” – 5 мкс/см. Масштабы по оси “у” выбираются в соответствии с измеряемыми напряжениями. Установить амплитуду импульса $E_2 = 20$ В, контролируя ее осциллографом.

Зарисовать осциллограмму напряжения на диоде, указав масштабы по осям напряжения и времени.

По осциллограмме определить требуемые параметры: $r_{б0}$, $r_{б\text{уст}}$ (см. ф-лу 1), τ_p (см. ф-лу 4).

Примечание. При нахождении параметров удобнее производить отсчет непосредственно с экрана осциллографа, выбирая нужный участок осциллограммы, оптимальную чувствительность и скорость развертки осциллографа.

З а д а н и е 2. Зарисовывать осциллограммы напряжения и тока диода при переключении из прямого направления на обратное, определить амплитуды прямого и обратного тока (I_1, I_2) и длительность плоской вершины обратного тока t_p . Сравнить экспериментальные значения t_p с рассчитанными по формуле (5) по значению τ_p , найденному в Задании 1.

Режим работы генератора Г5-54 – такой же, как и в задании 1 (устанавливается при $R_2=50$ кОм). Подсоединить макет к сети постоянного тока 12 В с помощью специального разъема. Установить сопротивление в цепи обратного смещения диода $R_d = 10$ кОм. Снять осциллограммы для двух значений $R_1=5$ кОм и $R_1=2$ кОм, установив масштаб по оси “х” – 2 мкс/см.

Примечание. Обратить особое внимание на правильность расположения осей координат на осциллограммах напряжения. Напряжение на токоснимающем сопротивлении измеряется при переключении S_4 в нижнее положение, напряжение 0,1 В соответствует току 1 мА.

З а д а н и е 3. В схеме с общим эмиттером исследовать переходные характеристики транзистора при большом входном сигнале. Найти ток базы $I_{бн}$, соответствующий границе режима насыщения, и снять зависимости времени задержки фронта $t_{зф}$, длительности фронта $t_{ф}$, времени рассасывания t_p и времени среза t_c для двух значений степени насыщения: $S=10$ и $S=20$. Зарисовать одну из осциллограмм напряжения на коллекторе.

3.1. Установить длительность отпирающего импульса – 50 мкс, полярность выходного импульса и импульса синхронизации – отрицательная, частота повторения – 10 кГц, временной сдвиг – 0-1 мкс. Установить на макете сопротивление генератора $R_2=50$ кОм, сопротивление нагрузки $R_k = 10$ кОм. Установить нулевую линию каналов 1 и 2 осциллографа в верхней части экрана, скорость развертки – 10 мкс/см, масштаб по оси “у” канала 2 – 2 В/см, канала 1 – 0,5 В/см.

Регулируя амплитуду отпирающего импульса, получить осциллограмму напряжения на коллекторе, характерную для ключевого режима. Уменьшая амплитуду импульса, добиться исчезновения задержки напряжения на коллекторе после окончания импульса (т.е. $t_p=0$). Ток базы при этом соответствует граничному значению $I_{бн}$. Измерить амплитуду импульса и вычислить $I_{бн}$.

3.2. Установить длительность отпирающего импульса – 5 мкс, скорость развертки – 5 мкс/см, масштаб по оси “у” канала 1 – 2 В/см. Переключить S_1 в положение $R_2=5$ кОм, ток базы при этом увеличится в 10 раз ($I_{б1}=10 I_{бн}$), что соответствует $S=10$.

Зарисовать осциллограммы отпирающего импульса и напряжения на коллекторе.

Измерить характерные времена задержки $t_{зф}$, $t_{ф}$, t_p , t_c . Измерение времен следует проводить с максимально возможной точностью, выбирая соответствующую длительность развертки.

3.3. Увеличить амплитуду отпирающего импульса в 2 раза ($S=20$). Повторить измерения $t_{зф}$, $t_{ф}$, t_p , t_c .

3.4. Из полученных экспериментальных данных вычислить параметры B (см.ф-лу 8.а.), $\tau_{оэ}$ (см.ф-лу 15), $\bar{\tau}$, (см.ф-лу 14) \bar{C}_k (см.ф-лу 20).

Экспериментальные результаты оформляются в виде таблицы

$I_{\delta 1}$, мА	S	$t_{зф}$, мкс	t_{ϕ} , мкс	t_p , мкс	t_c , мкс	$\tau_{оэ}$	$\bar{\tau}$,	\bar{C}_k

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Исследуемые схемы включения диода и транзистора.
2. Осциллограммы напряжения и тока диода и рассчитанные параметры согласно заданиям 1 и 2.
3. Типичную осциллограмму напряжения на коллекторе в ключевом режиме работы.
4. Таблицу экспериментальных данных по заданию 3.
5. Выводы по каждому заданию.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какие физические процессы определяют переходные характеристики диода и транзистора в импульсном режиме?
2. Как по осциллограмме напряжения на диоде найти сопротивление базы и время жизни носителей базы?
3. Что понимают под временем установления прямого напряжения диода?
4. Нарисуйте осциллограммы напряжения и тока диода в режиме переключения. Как изменяются осциллограммы при уменьшении сопротивления в цепи обратного смещения диода?
5. Чем отличаются режимы работы транзистора при малой и большой амплитуде импульса входного сигнала?
6. Что понимают под временем включения и временем выключения транзистора?
7. Как найти ток базы $I_{бн}$, соответствующей границе режима насыщения?
8. Как определить коэффициент передачи тока в режиме большого сигнала?
9. Как зависят длительность фронта, время рассасывания и время спада от амплитуды отпирающего импульса тока базы? Как по этим зависимостям найти эквивалентную постоянную времени $\tau_{оэ}$, среднее время жизни носителей $\bar{\tau}$ и усредненную емкость коллекторного перехода \bar{C}_k ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Аваев Н.А., Шишкин Г.Г. Электронные приборы: Учебник для вузов / Под ред. Г.Г. Шишкина. – М.: Изд-во МАИ, 1996, с.187-194.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001, с.384-303.