

$\omega_{пр} \sim 1/\tau_M$, намного больше, чем у толстых (диффузионных) $p-n$ -переходов. Однако предельная частота реальных туннельных диодов понижается вследствие влияния паразитных емкости и индуктивности оправы диода, хотя у современных хороших диодов она достигает $\sim 10^{10}$ Гц.

Различные применения туннельных диодов основаны на использовании падающего участка их вольтамперной характеристики. При этом важно отношение токов i_{max}/i_{min} и максимальная величина отрицательной дифференциальной проводимости $|di/du|_{max}$. Чем больше эти величины и чем больше предельная частота, тем лучше качество диода.

Наличие отрицательной дифференциальной проводимости позволяет использовать туннельные диоды для усиления и генерации СВЧ электрических колебаний, для смещения частот в супергетеродинных приемных устройствах (при этом, в отличие от обычных смесителей, здесь возможна компенсация потерь на преобразование), в качестве быстродействующих переключателей для счетно-решающих устройств и для других целей.

§ 4. Биполярный полупроводниковый триод

Одно из самых важных технических применений полупроводников, которое существенно стимулировало развитие современной физики полупроводников, заключается в их использовании для усиления и генерации электрических колебаний. Приборы, предназначенные для этих целей, получили общее название *транзисторов*.

Примером очень распространенного транзистора может служить биполярный полупроводниковый триод *). Его рабочая часть состоит из пластинки полупроводника (обычно — монокристаллического), в которой путем надлежащего распределения примесей созданы два близко расположенных $p-n$ -перехода (см. рис. 8.7). Область между обоими переходами принято называть *базой триода*, а оконечные области — *эмиттером* и, соответственно, *коллектором*. Такую систему из двух переходов можно осуществить двумя способами: создавая у эмиттера и коллектора дырочную проводимость, а у базы — электронную, т. е. структуру типа $p-n-p$ (рис. 8.7, а), либо структуру типа $n-p-n$ (рис. 8.7, б). Физические процессы в обоих случаях совершенно аналогичны и поэтому в дальнейшем для определенности мы будем говорить о $p-n-p$ -структуре.

Для разъяснения принципа действия триода удобно сначала остановиться на одной из возможных схем его включения, показанной

*) Название «транзистор» произошло от соединения слогов английских слов transfer (передавать) и resistor (сопротивление). «Биполярный» указывает на то, что в данном приборе используется явление инжекции, а следовательно, необходима биполярная проводимость полупроводника.

на рис. 8.7, в которой базовый электрод является общим для обеих цепей — эмиттера и коллектора («схема с общей базой»). Токи будем считать постоянными или изменяющимися медленно. Между эмиттером и базой приложено небольшое прямое напряжение, так что дырки из эмиттера инжектируются в область базы. Если толщина базы (расстояние между границами эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов) $\omega < L_p$, где L_p — длина диффузии дырок в базе, то значительная часть этих дырок не успеет рекомбинировать

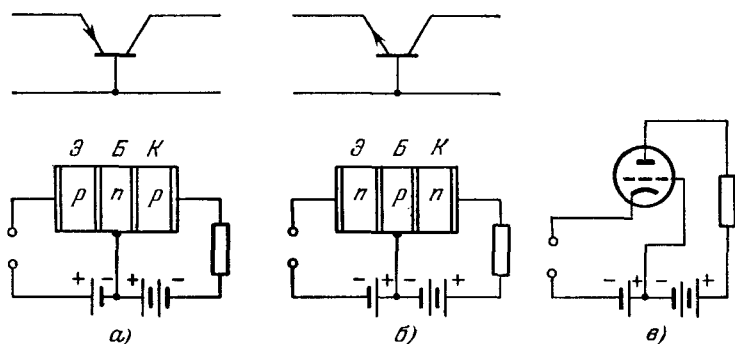


Рис. 8.7. Биполярный триод $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б) типов в схеме с общей базой и аналогия с вакуумным триодом (в). Сверху — условное изображение на схемах.

в области базы и дойдет до коллекторного перехода. Так как к коллектору приложено большое обратное напряжение (потенциал коллектора отрицателен относительно базы), то в коллекторном переходе существует сильное электрическое поле, затягивающее дырки в коллекторную область. Поэтому все дырки, достигшие коллекторного перехода, будут входить в коллектор и участвовать в образовании тока в цепи коллектора. Обе цепи оказываются связанными друг с другом с помощью инжектированных дырок, так что всякое изменение тока в цепи эмиттера вызывает определенное изменение тока в цепи коллектора. В этом смысле полупроводниковый триод аналогичен вакуумному триоду, причем роль катода играет эмиттер, роль анода — коллектор, а роль управляющей сетки — база (рис. 8.7, в).

Так же как и в случае вакуумных триодов, усиление колебаний осуществляется за счет использования энергии источников постоянного напряжения, включенных в схему.

Транзисторный эффект описанного типа был открыт в 1948 г. Дж. Бардином, В. Браттейном и В. Шокли.

Важной характеристикой полупроводникового триода является коэффициент усиления тока в схеме с общей базой, который, по

определению, есть

$$\alpha = \left(\frac{\Delta i_c}{\Delta i_e} \right)_{u_c = \text{const}}. \quad (4.1)$$

Здесь Δi_c — абсолютная величина малого изменения тока коллектора, вызванного малым изменением тока эмиттера Δi_e , при условии, что напряжение коллектор — база u_c поддерживается постоянным. Этот коэффициент существенно определяет параметры триода в различных схемах его включения.

Величина α определяется свойствами эмиттерной, базовой и коллекторной областей транзистора (в первую очередь — концентрациями равновесных носителей заряда в них), а также процессами рекомбинации в области базы и в эмиттерном p — n -переходе. Действительно, полный ток эмиттера i_e , в соответствии с формулой (1.1), можно представить в виде

$$i_e = i_{pe} + i_{ne} + i_r.$$

Здесь $i_{pe} = i_p^n(x_2)$ есть ток дырок, вступающих из эмиттера в базу, на границе эмиттерный переход — база при $x = x_2$ (ср. рис. 8.1); $i_{ne} = i_n^p(-x_1)$ — ток электронов, идущих из базы в эмиттер, на границе перехода при $x = -x_1$; i_r — ток, возникающий вследствие рекомбинации, внутри эмиттерного p — n -перехода. Так как к коллектору движутся только дырки, то составляющие тока i_{ne} и i_r не изменяют тока коллектора и являются бесполезными. Отношение

$$\xi_e = \frac{i_{pe}}{i_e} = \frac{i_{pe}}{i_{pe} + i_{ne} + i_r} \quad (4.2)$$

называется *эффективностью эмиттера*. Качество эмиттера тем лучше, чем ближе ξ_e к единице.

Вследствие рекомбинации в базовой области, дырочный ток, достигающий коллекторного перехода, $i_{pc} < i_{pe}$. Влияние рекомбинации в базе можно охарактеризовать *коэффициентом передачи дырок*

$$\beta = \frac{i_{pc}}{i_{pe}}. \quad (4.3)$$

Он тем ближе к единице, чем меньше отношение ω/L_p .

И, наконец, следует учесть, что полный ток коллектора тоже имеет дырочную и электронную составляющие. Поэтому, если

$$\xi_c = \frac{i_{pc}}{i_c} = \frac{i_{pc}}{i_{pc} + i_{nc}}, \quad (4.4)$$

то полный ток коллектора $i_c = i_{pc}/\xi_c$. Величину $1/\xi_c$ иногда называют «собственным коэффициентом усиления тока коллектора». Пользуясь этими понятиями, коэффициент α можно представить в виде

$$\alpha = \frac{\Delta i_{pc}}{\Delta i_{pe}} \frac{\xi_e}{\xi_c} = \beta \frac{\xi_e}{\xi_c}. \quad (4.5)$$

Отметим, что в биполярных полупроводниковых триодах толщину базы стараются сделать по возможности малой по сравнению с длиной диффузии, так что при положительном потенциале эмиттера концентрация дырок в базе бывает намного больше равновесной их концентрации. Поэтому обычно $i_{pc} \gg i_{nc}$ и, соответственно, можно положить $\xi_c \approx 1$.

Так как $\xi_e < 1$ и $\beta < 1$, то и $\alpha < 1$. Таким образом, в рассматриваемой схеме с общей базой получить усиление тока нельзя. Однако изменения напряжения на нагрузочном сопротивлении в цепи коллектора $\Delta u_c = R_c \Delta i_c$ при большой величине R_c могут быть значительно больше изменений напряжения эмиттера Δu_e , т. е. усиление по напряжению может быть значительно больше единицы.

Через базовый электрод триода протекает также некоторый ток i_b , равный

$$i_b = i_e - i_c. \quad (4.6)$$

Этот ток обусловлен электронными составляющими токов i_{ne} и i_{nc} , а также рекомбинацией дырок и электронов в базе, так как для

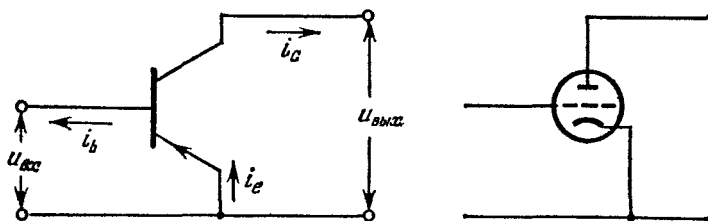


Рис. 8.8. Полупроводниковый триод в схеме с общим эмиттером.

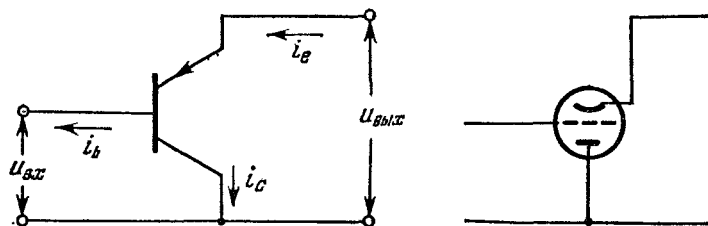


Рис. 8.9. Полупроводниковый триод в схеме с общим коллектором.

поддержания этой рекомбинации необходим постоянный приток электронов в базовую область. При $\xi_e = \xi_c = \beta = 1$ мы имели бы $i_b = 0$. В реальных триодах $i_b \neq 0$, однако $i_b \ll i_e, i_c$.

На рис. 8.8 и рис. 8.9 показаны две другие возможные схемы включения триода.

В схеме с общим эмиттером (рис. 8.8) управляющим током является ток базы i_b , а ток в выходной цепи — ток i_c . Соответственно

коэффициент усиления тока в этой схеме α_e определяется как

$$\alpha_e = \left(\frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \right)_{u_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} \quad (4.7)$$

Для схемы с общим коллектором (рис. 8.9) коэффициент усиления тока есть

$$\alpha_c = \left(\frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \right)_{u_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} \quad (4.8)$$

В отличие от схемы с общей базой, усиление по току в двух последних схемах может быть значительно больше единицы. Это происходит потому, что управляющий ток в этих схемах i_b намного меньше выходного тока i_c или, соответственно, i_e . Поэтому значительным изменениям выходного тока соответствуют только малые изменения управляющего тока.

Количественная теория биполярного триода получается при использовании основных уравнений, приведенных в § VII.3 (уравнений непрерывности и уравнения Пуассона), и условий на границах каждого из p — n -переходов. Для тонких переходов эти граничные условия имеют вид (VII.6.1). Отсюда можно найти распределение дырок (электронов) в области базы и вычислить токи i_e , i_c как функции напряжений на эмиттере и коллекторе u_e , u_c относительно базы. А это позволяет определить все параметры полупроводникового триода как активного четырехполюсника. Однако мы не будем останавливаться на этих довольно длинных расчетах, которые можно найти в руководствах по полупроводниковым приборам [1, 2].

Рассмотренный выше качественно биполярный триод представляет собой, конечно, лишь один из типов полупроводниковых усилителей, основанных на использовании явления инжекции. Имеются и другие полупроводниковые устройства, предназначенные для тех же целей. Некоторые из них основаны на других принципах и не используют явление инжекции вовсе. Помимо рассмотренных выше туннельных диодов, сюда относятся так называемые полевые транзисторы (в которых для управления током в выходной цепи используют модуляцию толщины слоя объемного заряда с помощью входного напряжения) и другие приборы.

§ 5. Гетеропереходы

До сих пор мы рассматривали p — n -переходы, образованные в одном и том же монокристалле путем соответствующего распределения примесей. В таких переходах (часто называемых гомопереходами) по обе стороны от границы раздела p - и n -областей мы имели одну и ту же решетку кристалла с одинаковыми характеристиками (шириной запрещенной зоны, электронным сродством и т. п.). Сейчас мы коротко остановимся на контактах двух различных полупроводников (гетеропереходах).