

РАБОТА 78

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРИОДА – ТРАНЗИСТОРА

Если к р-п-переходу приложить разность потенциалов в прямом направлении, то начинается переход дырок из р-полупроводника в п-полупроводник, а электронов – в обратном направлении. В цепи возникает ток. Дырки в п-полупроводнике и электроны в р-полупроводнике становятся неосновными носителями и рекомбинируют с основными носителями. Так как процесс рекомбинации протекает не мгновенно, то вблизи границы р-п-перехода происходит накопление неосновных носителей: в п-полупроводнике – дырок, в р-полупроводнике – электронов. Осуществляется как бы "впрыскивание" (инжекция) электронов в граничный слой р-полупроводника и дырок в граничный слой п-полупроводника. Концентрация неосновных носителей N вблизи перехода выражается формулой:

$$N = N_0 e^{-t/\tau},$$

где N_0 – концентрация неосновных носителей на границе р-п-перехода.

Если $t = \tau$, то $N_0/N = e$. Следовательно, τ представляет собой время, в течение которого концентрация уменьшается в $e \approx 2,71$ раз. За это время неосновные носители успевают пройти от границы внутрь полупроводника на расстояние L . Параметр τ называется средним временем жизни носителей, L – их диффузионной длиной.

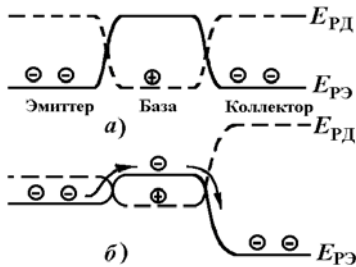


Рис. 1

Инжекция носителей тока лежит в основе работы полупроводникового триода (транзистора). Транзистор состоит из двух р-п-переходов, соединенных навстречу друг другу в виде либо р-п-р-, либо п-р-п-типа. Рассмотрим плоскостной транзистор п-р-п-типа. Он состоит из двух п-

областей, между которыми заключена р-область полупроводника. В отсутствие приложенных внешних напряжений расположение кривой потенциальной энергии электронов (сплошная кривая) и дырок (пунктирная кривая) показано на рис. 1а. В результате диффузии основных носителей на границах р-п-переходов образуются контактные разности потенциалов U и, соответственно, потенциальные барьеры eU (одинаковые, если одинаковы концентрации носителей в п-областях).

Приложим к этим переходам напряжения, как показано на рис. 2. К левому р-п-переходу прикладывается прямое напряжение U_3 . Энергетический потенциальный барьер для основных носителей при этом понижается на величину eU_3 , и становится равным $e(U - U_3)$ (рис. 1б). Через границу начинает протекать ток основных носителей. р-область изготавливается такой, чтобы концентрация основных носителей (дырок) была в ней значительно меньше концентрации основных носителей (электронов) в п-области, поэтому через левый р-п-переход течет, преимущественно, ток электронов из п-области в р-область. Левая п-область называется эмиттером, р-область – базой, а правая п-область – коллектором. К правому р-п-переходу прикладывается напряжение U_K в обратном направлении, поэтому энергетический барьер для основных носителей здесь повышается и становится равным $e(U + U_K)$. В отсутствие напряжения U_3 ток через этот переход обуславливается преимущественно неосновными носителями. Их концентрация мала, поэтому ток незначителен.

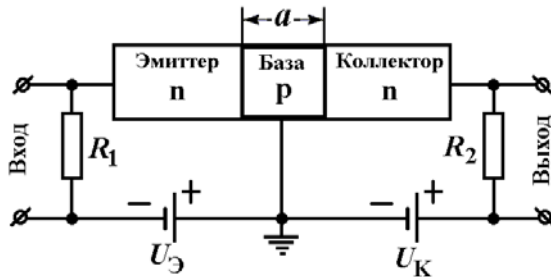


Рис. 2

В базовой области р-электроны становятся неосновными носителями и легко могут диффундировать через р-п-переход, попадая в коллектор. Если толщина a базы значительно меньше диффузионной длины ($a \ll L$), то почти все электроны "впрыснутые" в базовую область, достигают коллектора. Таким образом, к уже существующему незначительному току неосновных носителей добавляется значительный ток (в том же направлении) электронов из базы в коллектор. Так как ток через оба р-п-перехода создается одними и теми же электронами, то ток коллектора не превышает тока эмиттера, и

усиления тока в данной схеме не происходит. Но вследствие включения коллекторного перехода в запорном направлении сопротивление его велико, что позволяет включить в цепь коллектора большое нагрузочное сопротивление R_2 и, следовательно, снимать большое напряжение, величина которого сильно меняется при незначительном изменении напряжения сигнала на входе. Поэтому такое устройство будет работать как усилитель напряжения, подобный по своему действию усилителю на трехэлектродной лампе с общим катодом. Роль катода играет эмиттер, анода – коллектор, сетки – база.

Для успешной работы прибора необходимо, чтобы почти весь эмиттерный ток состоял из электронов, так как дырки к коллектору не идут и в усилении не участвуют. Отношение электронной составляющей тока эмиттера $I_{Эл}$ к полному току эмиттера $I_Э$ называется эффективностью эмиттера $\gamma = I_{Эл} / I_Э$. В типичных случаях $\gamma = 0,9999$. На пути от эмиттера к коллектору часть электронов рекомбинирует с дырками базовой области. Поэтому ток коллектора I_K меньше электронной составляющей тока эмиттера $I_{Эл}$. Отношение $\beta' = I_K / I_{Эл}$ называется коэффициентом переноса. В реальных транзисторах $\beta' = 0,9999$, т.е. фактически все электроны, инжектированные в базу, достигают коллектора. Коэффициентом усиления по току α называется отношение:

$$\alpha = \left(\frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э} \right)_{U_K = \text{const}} = \beta' \gamma \approx 1.$$

Коэффициент усиления по напряжению, равный

$$\mu = \Delta U_K / \Delta U_Э,$$

у современных транзисторов может превышать 10^4 . Теория транзисторов с p-p-переходами аналогична теории транзисторов с n-p-n-переходами, в которой электроны играют роль дырок, а дырки – электронов. Располагая триодами противоположной полярности, можно конструировать схемы, которые неосуществимы на вакуумных лампах.

Зависимости между входными и выходными токами и напряжениями в транзисторе принято представлять четырьмя семействами характеристик (рис. 3). На этом рисунке каждое семейство представлено лишь одной кривой. В правой верхней четверти содержится семейство выходных характеристик: $I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{Const}$. В верхней левой четверти находится семейство характеристик передачи по току при $U_{КЭ} = \text{Const}$. Левая нижняя четверть содержит семейство входных характеристик $U_{БЭ} = f(I_B)$ при $U_{КЭ} = \text{Const}$, а нижняя правая четверть –

семейство характеристик обратной связи по напряжению $U_{БЭ} = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{Const}$.

Выбрав некоторую точку А на характеристике в качестве рабочей, и задав таким образом I_K , можно найти соответствующие точки на других характеристиках (В, С, Д). Построив в окрестностях этих точек характеристические треугольники приращений, можно определить ряд параметров транзистора:

а) в точке А входную проводимость $\sigma = \left(\frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right)_{U_B = \text{Const}}$,

б) в точке В коэффициент усиления по току $\beta = \left(\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right)_{U_{КЭ} = \text{Const}}$,

в) в точке С входное сопротивление $R_{ВХ} = \left(\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right)_{U_{КЭ} = \text{Const}}$.

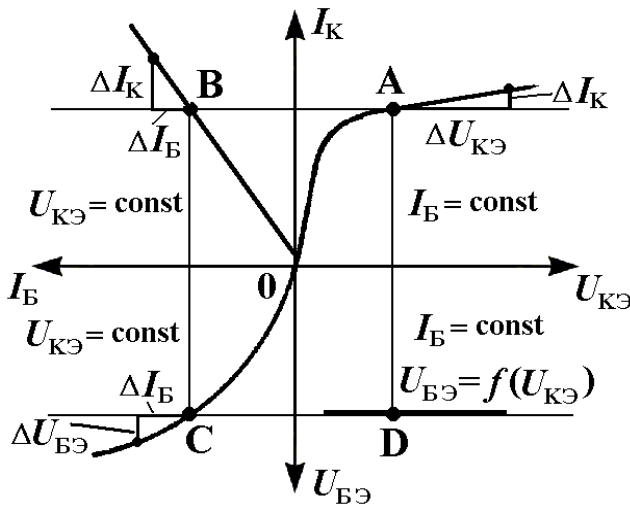


Рис. 3

Схема лабораторной установки приведена на рис. 4. Исследуемый транзистор Г – р-п-р-типа. Питание установки осуществляется от двух источников постоянного напряжения $Б_{БЭ}$ и $Б_{КЭ}$. Изменение напряжений $U_{БЭ}$ на базе Б и $U_{КЭ}$ на коллекторе К по отношению к эмиттеру осуществляется при помощи потенциометров R_1 и R_2 . Вольтметр V_1 предназначен для измерения напряжения $U_{БЭ}$, вольтметр V_2 – напряжения $U_{КЭ}$,

миллиамперметр mA – коллекторного тока I_K , и микроамперметр μA – тока базы I_B .

Внимание! Значения токов I_B и напряжений $U_{KЭ}$, рекомендованные для проведения опытов, указаны на панели установки.

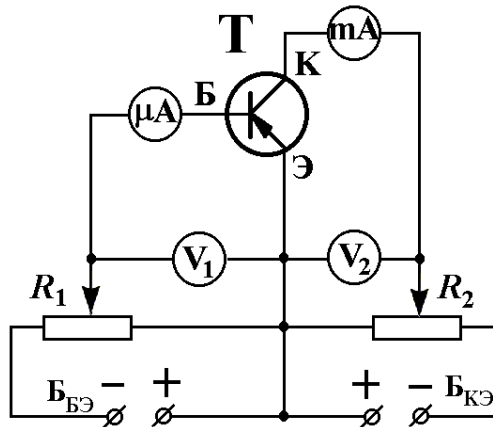


Рис. 4.

Задание.

1. Ознакомиться со схемой установки, расположением приборов и ручек управления, поставить потенциометры R_1 и R_2 в положения, соответствующие наименьшим значениям напряжений $U_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$, и включить установку.
2. Снять выходные характеристики $I_K = f(U_{КЭ})$ для трех значений силы тока I_B .
3. Снять характеристики передачи по току $I_K = f(I_B)$ для двух значений напряжения $U_{КЭ}$.
4. Снять входные характеристики $U_{БЭ} = f(I_B)$ для двух значений $U_{КЭ}$.
5. Снять характеристики обратной связи по напряжению $U_{БЭ} = f(U_{КЭ})$ для трех значений I_B .
6. По полученным данным построить четыре семейства характеристик и определить графически входную проводимость σ , входное сопротивление $R_{ВХ}$ и коэффициент усиления по току β (см. рис. 3).
7. Вычислить коэффициент усиления по току для схемы с общей базой по формуле:

$$\alpha = \beta / (\beta + 1).$$

Вопросы для подготовки.

1. Основы зонной теории проводимости твердых тел, p-n-переход в полупроводниках. Инжекция носителей тока. Понятие диффузионной длины носителей.
2. Устройство и принцип действия транзистора. Роль эмиттера, базы и коллектора.
3. Преимущества транзисторов по сравнению с вакуумными лампами.
4. Обозначения на схемах транзисторов p-n-p- и n-p-n-типов.
5. Статические параметры транзисторов.
6. Статические характеристики транзистора и определение по ним его параметров.
7. Простейшие электрические схемы усилителя низкой частоты и генератора на транзисторе.