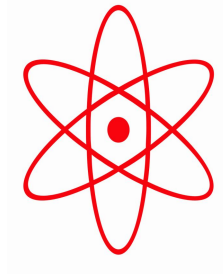


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФЭЛ-18

**ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ТРАНЗИСТОРА**

Тула, 2007 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: ознакомление с характеристиками биполярного транзистора, с методиками их определения, получение навыков практического исследования вольт-амперных характеристик транзистора и определения его параметров.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Общие сведения о транзисторах.

В 1948 году Д. Бардин и В. Брайтен обнаружили, что полупроводниковые устройства с двумя p - n переходами способны создавать усиление электрических колебаний по мощности. Они назвали это устройство транзистором (от английских слов "transfer" – преобразователь и "resistor" – сопротивление).

В настоящее время промышленность выпускает плоскостные транзисторы, представляющие собой монокристалл полупроводника, в

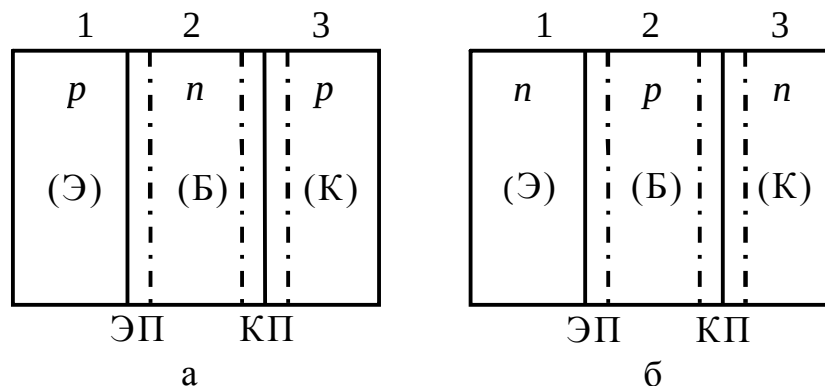


Рис. 1. Транзисторы p - n - p (а) и n - p - n (б) типа.

Каждая область имеет свое название:

- область 1 – эмиттер (Э),
- область 2 – база (Б),
- область 3 – коллектор (К)

котором две области с проводимостью одного типа разделены областью с проводимостью противоположного типа. Таким образом, могут быть получены структуры p - n - p и n - p - n типа (рис. 1). Средняя область называется базой (Б), а две другие, крайние – эмиттером (Э) и коллектором (К).

Между областями с разными типами проводимости образуются p - n переходы. P - n переход, образующийся между эмиттером и базой, называется



Рис. 2 Обозначение транзистора на электрических схемах а) $p-n-p$
б) $n-p-n$

эмиттерным переходом (ЭП); переход, образующийся между базой и коллектором, называют коллекторным переходом (КП).

Эмиттер осуществляет инжекцию (т.е. введение) неосновных носителей зарядов в базу, а коллектор—экстракцию (сбор) носителей. Транзистор, у которого эмиттер и коллектор имеют электропроводность p -типа относятся к $p-n-p$ -типу. Если же база p -типа, а коллектор и эмиттер n -типа, то это транзистор $n-p-n$ -типа (рис. 1). Так, если коллектор транзистора $p-n-p$ -типа подключается к отрицательному полюсу источника, то коллектор транзистора $n-p-n$ -типа к положительному. В условных графических изображениях эмиттер изображается в виде стрелки, которая указывает прямое направление тока эмиттерного перехода (рис. 2)

По технологии изготовления транзисторы делятся на сплавные, планарные, а также диффузионно-сплавные, мезапланарные и эпитаксиально-планарные (рис.3).

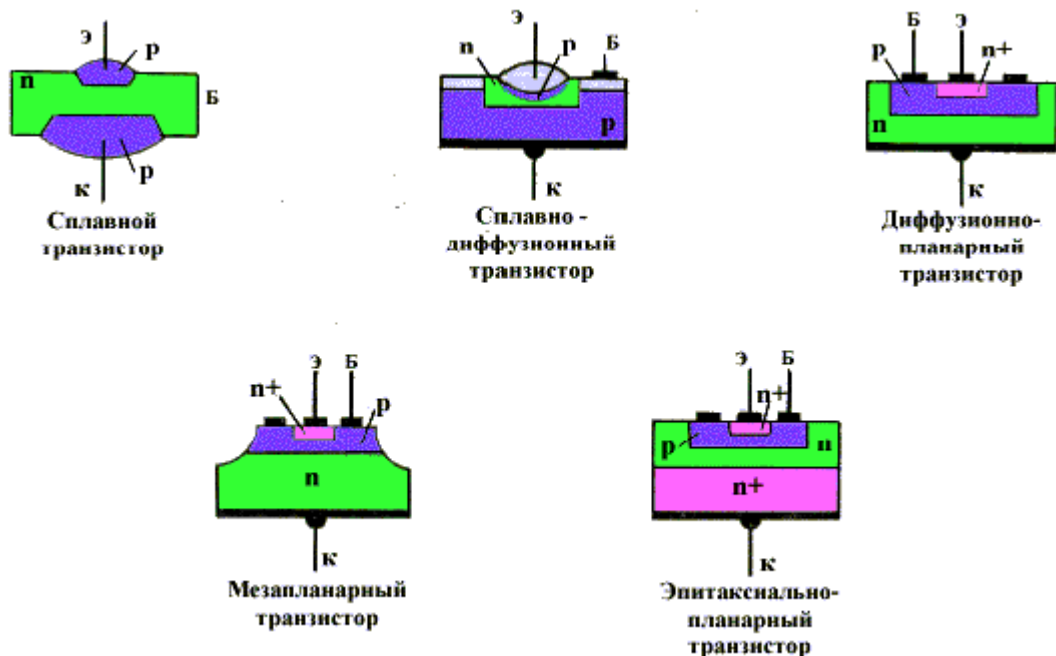


Рис.3. Разновидности транзисторов по технологии изготовления

Конструктивно биполярные транзисторы оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах (рис.4).

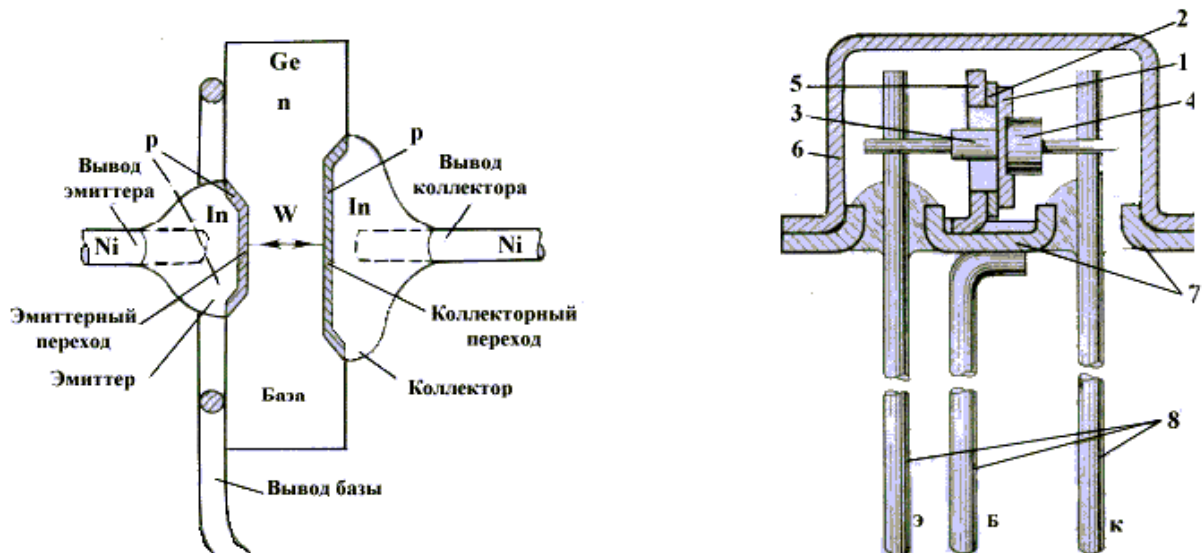


Рис.4. Конструктивное оформление биполярного транзистора

По характеру движения носителей тока в базе различают диффузионные и дрейфовые биполярные транзисторы.

Физические процессы в биполярном транзисторе

В рабочем режиме биполярного транзистора протекают следующие физические процессы: инжекция, диффузия, рекомбинация и экстракция.

Рассмотрим р-п переход эмиттер-база при условии, что длина базы велика. В этом случае при прямом смещении р-п перехода из эмиттера в базу инжектируются неосновные носители. Закон распределения инжектированных дырок по базе описывается следующим уравнением:

$$p_n(x) = p_{n0} e^{\beta V_G} e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (1)$$

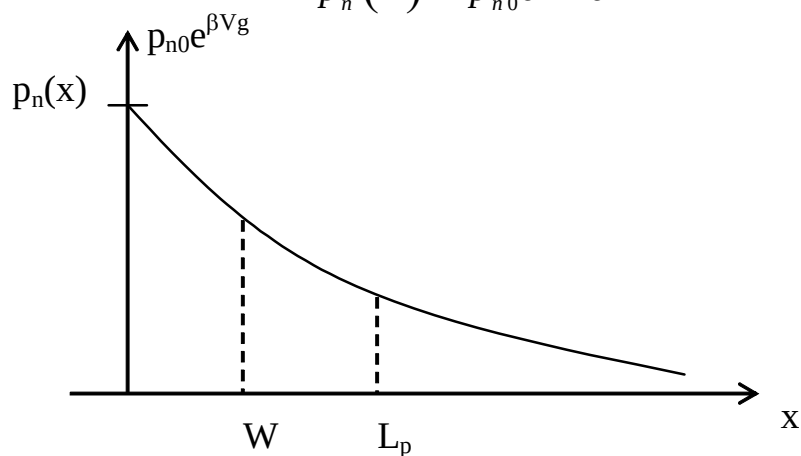


Рис.5. Распределение дырок в базе.

Процесс переноса инжектированных носителей через базу – диффузионный. Характерное расстояние, на которое неравновесные носители распространяются от области возмущения – диффузионная длина L_p . Поэтому, если необходимо, чтобы инжектированные носители достигли коллекторного перехода, длина базы W должна быть меньше диффузионной длины L_p . Это условие является необходимым для реализации транзисторного эффекта – управление током во вторичной цепи через изменение тока в первичной цепи.

В процессе диффузии через базу инжектированные неосновные носители рекомбинируют с основными носителями в базе. Для восполнения прорекомбинированных основных носителей в базе через внешний контакт должны подойти такое же количество носителей. Таким образом, ток базы – это рекомбинационный ток.

Биполярный транзистор в схеме с общей базой

На рис.6а показана зонная диаграмма биполярного транзистора в схеме с общей базой в условиях равновесия. Значками $\oplus$ и $\ominus$ на этой диаграмме указаны основные и неосновные носители.

Для биполярного транзистора в схеме с общей базой активный режим (на эмиттерном переходе - прямое напряжение, на коллекторном – обратное) является основным. Принцип работы транзисторов обоих типов одинаков, различие заключается лишь в том, что в транзисторе $n-p-n$ -типа через базу к коллектору движутся электроны, инжектированные эмиттером, а в транзисторе $p-n-p$ -типа – дырки. Для этого к электродам транзистора подключают источники тока обратной полярности. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться транзистор в активном режиме, для $p-n-p$ биполярного транзистора $U_э > 0$, $U_к < 0$.

Для биполярного транзистора $p-n-p$ типа в активном режиме эмиттерный переход смещён в прямом направлении, и через него происходит инжекция дырок как неосновных носителей в базу. База должна иметь достаточно малую толщину W ($W \ll L_p$, где L_p - диффузионная длина неосновных носителей), чтобы инжектированные в базу неосновные носители не успевали прорекомбинировать за время переноса через базу. Коллекторный переход, нормально смещенный в обратном направлении “собирает” инжектированные носители, прошедшие через слой базы.

Распределение дырок $p_n(x)$, инжектированных эмиттером в базу при условии $W \ll L_p$, в первом приближении описывается линейным законом:

$$p_n(x) = \frac{I_{эp} W}{q D_p} \left(1 - \frac{x}{W} \right) \quad (2)$$

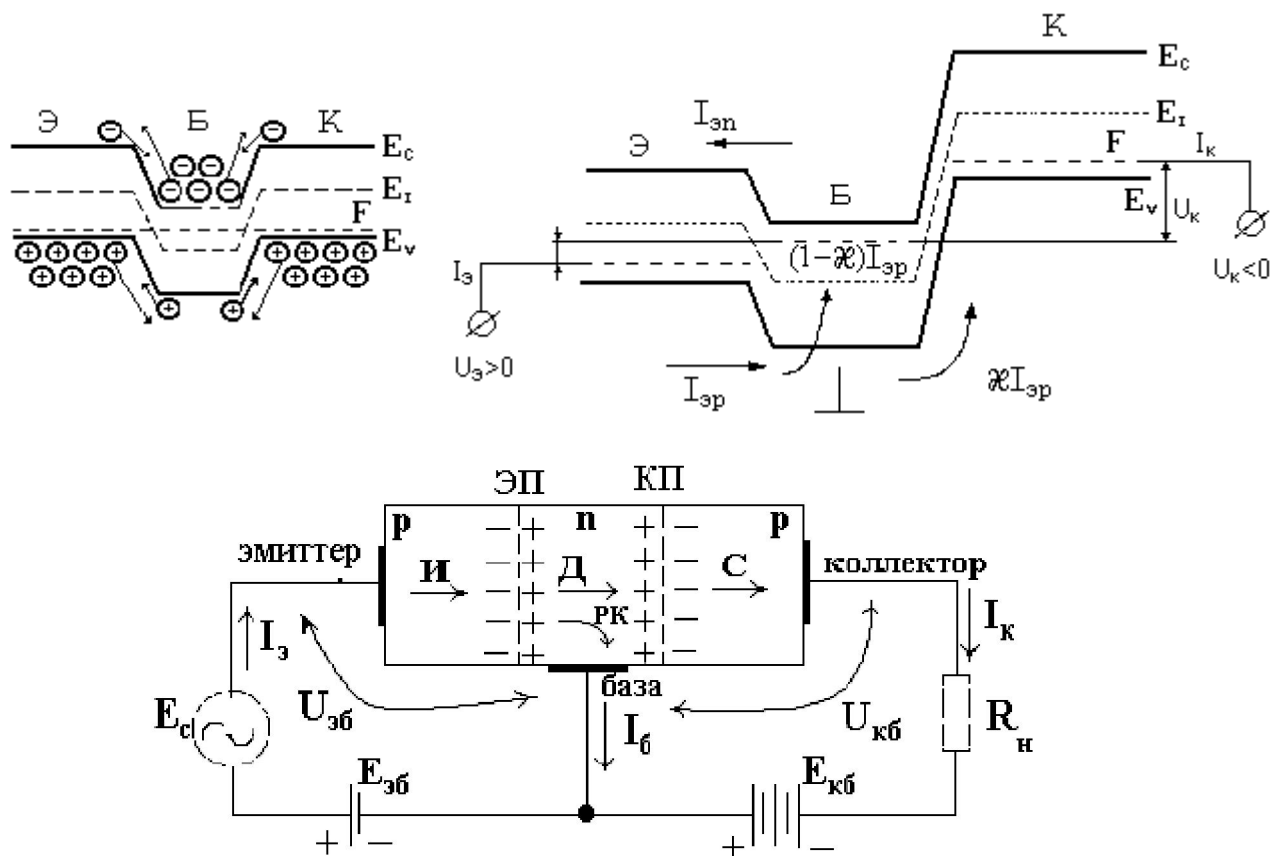


Рис.6. Зонная диаграмма биполярного транзистора и его включение по схеме с общей базой

При приложении к эмиттерному переходу прямого напряжения $U_{эб} > 0$ в биполярном транзисторе $p-n-p$ происходит инжекция дырок из эмиттера в базу $I_{эр}$ и электронов из базы в эмиттер $I_{эп}$. Ввиду того, что эмиттер легирован намного сильнее базы, ток инжектированных дырок $I_{эр}$ будет намного превышать ток электронов $I_{эп}$. Инжектированные в базу дырки в результате диффузии будут перемещаться к коллекторному переходу и если ширина базы w много меньше диффузионной длины L_p , почти все дырки дойдут до коллектора и электрическим полем коллекторного $p-n-p$ перехода будут переброшены в p -область коллектора. Возникающий вследствие этого коллекторный ток лишь немного меньше тока дырок, инжектированных эмиттером.

Рассмотрим конкретный пример включения транзистора в схему с общей базой. Как показано на рис. 6, коллекторная цепь транзистора подключается к источнику э.д.с. $-E_{кб}$ т.е. КП смещен в обратном направлении. В коллекторном переходе напряженность поля под действием $E_{кб}$ возрастает. Это приводит к появлению незначительного обратного тока $I_{ко}$ в коллекторной цепи, обусловленного движением неосновных носителей зарядов. Этот ток существенно возрастает с увеличением температуры, поэтому его называют тепловым током коллектора – $I_{ко}$.

Эмиттерный переход внешним источником напряжения смещен в прямом направлении (ЭП, рис.6). Напряженность поля эмиттерного перехода

при этом уменьшается. Через эмиттерный переход происходит инжекция дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. В цепи эмиттера появится ток, равный сумме токов, обусловленных электронной $I_{э(n)}$ и дырочной $I_{э(p)}$ электропроводностями:

$$I_э = I_{э(n)} + I_{э(p)} \approx I_{э(p)} \quad (3)$$

Особенность транзистора состоит, в том, что концентрация дырок в эмиттере намного больше концентрации электронов в базе. Поэтому дырочная составляющая тока эмиттера значительно больше электронной (3). В базе происходит накопление неосновных носителей зарядов–дырок. В результате диффузии дырки перемещаются к коллекторному переходу. Часть дырок при этом рекомбинирует в базе с электронами, что создают ток в цепи базы $I_б$. Но так как толщина базы очень мала (несколько микрометров), доля рекомбинированных дырок незначительна. Вблизи коллекторного перехода дырки оказываются под действием электрического поля, обратно включенного перехода, увлекаются им через переход в коллекторную область и далее – к выводу коллектора, где рекомбинируют с электронами, поставляемыми через внешнюю цепь источником э.д.с, что создает ток в коллекторной цепи $I_к$.

Таким образом, ток эмиттера равен сумме токов базы $I_б$ и коллектора $I_к$:

$$I_э = I_к + I_б \quad (4)$$

Ток коллектора состоит из потока дырок инжектируемых эмиттером за вычетом тока базы и собственного теплового тока коллекторного перехода:

$$I_к = I_{э(p)} - I_б + I_{к0} = \alpha I_э + I_{к0} \quad (5)$$

где $\alpha = I_к/I_э$ – коэффициент передачи тока эмиттера; $I_{к0}$ – тепловой ток обратно включенного коллекторного перехода.

Отсюда, ток базы равен:

$$I_б = I_э - I_к = (1 - \alpha) I_э - I_{к0} \quad (6)$$

Этот ток составляет не более 1% от тока эмиттера.

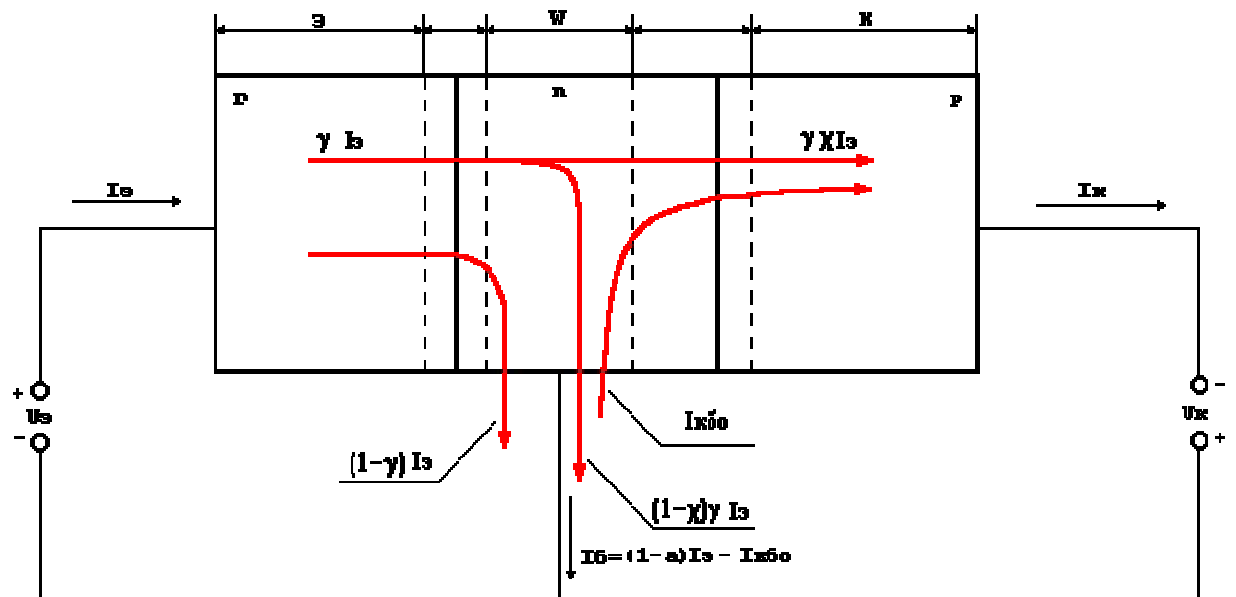


Рис.7. Токи биполярного транзистора по схеме с общей базой

Все сказанное справедливо также для транзистора п-р-п-типа с учетом высказанных ранее замечаний о перемене на противоположное направление движения токов и смене знаков источников питания схемы транзистора.

Дифференциальные физические параметры биполярного транзистора в схеме с ОБ

Основными величинами, характеризующими параметры биполярного транзистора является коэффициент передачи тока эмиттера α , сопротивление эмиттерного $r_э$ и коллекторного $r_к$ переходов, а также коэффициент обратной связи эмиттер – коллектор $\mu_{ЭК}$.

Дифференциальным коэффициентом передачи тока эмиттера α называется отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе

$$\alpha = \left. \frac{dI_K}{dI_э} \right|_{u_K = const}.$$

Сопротивление эмиттерного перехода $r_э$:

$$r_э = \frac{dU_э}{dI_э} \quad (I_к = const)$$

Сопротивление коллекторного перехода $r_к$:

$$r_к = \frac{dU_к}{dI_к} \quad (I_э = const)$$

Коэффициентом обратной связи называется отношение приращения напряжения на эмиттере к приращению напряжения на коллекторе при постоянном токе через эмиттер.

$$\mu_{\text{эк}} = \frac{dU_K}{dU_{\text{э}}} \quad (I_{\text{э}} = \text{const})$$

Дифференциальные параметры следующим образом выражаются через конструктивно-технологические параметры биполярного транзистора:

$$r_{\text{э}} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_{\text{э}}} \quad r_{\text{к}} = \sqrt{\frac{2qN_{\text{Д}}}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \frac{L_p^2}{W} \sqrt{|u_{\text{к}}|}}$$

$$\mu_{\text{эк}} = -\sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{qN_{\text{Д}}}} \frac{kT/q}{W \sqrt{|u_{\text{к}}|}} \quad \alpha = \frac{dI_{\text{к}}}{dI_{\text{эп}}} \frac{dI_{\text{эп}}}{dI_{\text{э}}} = \beta \cdot \gamma,$$

где γ – коэффициент инжекции (эффективность эмиттера) и β – коэффициент переноса

$$\gamma = \frac{dI_{\text{эп}}}{dI_{\text{э}}} = 1 - \frac{N_{\text{ДБ}}}{N_{\text{АЭ}}}; \quad \beta = \frac{dI_{\text{к}}}{dI_{\text{эп}}} = 1 - \frac{1}{2} \frac{W^2}{L_p^2}$$

Величины коэффициентов α , $r_{\text{к}}$, $r_{\text{э}}$, $\mu_{\text{эк}}$ лежат для биполярного транзистора в пределах: $\alpha = (0,95 - 0,995)$, $r_{\text{э}} = (1 \div 10) \text{ Ом}$, $r_{\text{к}} = (10^5 \div 10^6) \text{ Ом}$, $\mu_{\text{эк}} \cong 10^{-3} \div 10^{-4}$.

Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером.

С помощью данной экспериментальной установки изучается работа полупроводникового транзистора, включенного по наиболее часто применяемой на практике схеме – схеме с общим эмиттером (рис. 8). При таком включении входным электродом является база, эмиттер заземляется (общий электрод), а выходным электродом по-прежнему является коллектор.

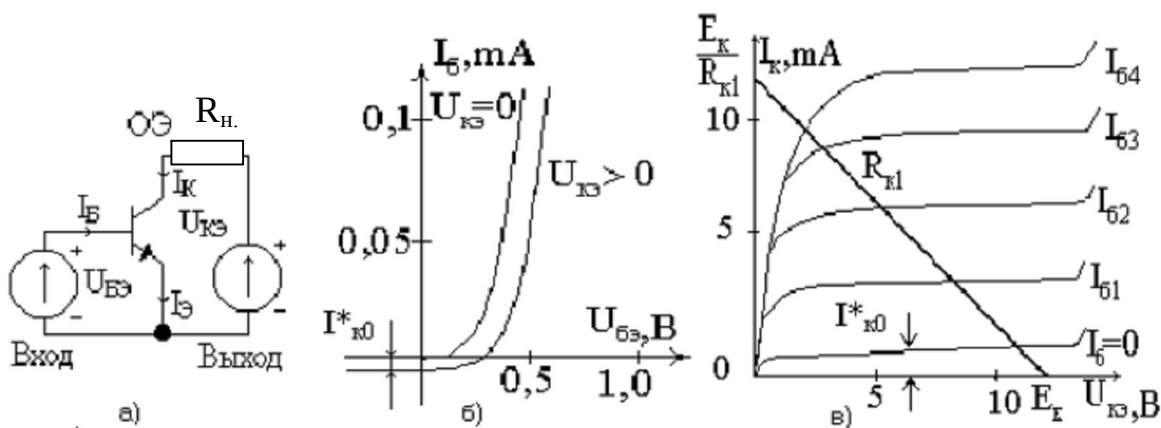


Рис. 8. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером и его входные и выходные характеристики.

Для схемы с общим эмиттером основным параметром биполярного транзистора является дифференциальный коэффициент передачи тока базы β , которым называется приращение тока коллектора dI_K к вызвавшему его приращению тока базы I_B при постоянном напряжении на коллекторе (при нагрузке в цепи коллектора).

$$h_{21э} = \beta = \left. \frac{dI_K}{dI_B} \right|_{U_K = \text{const}} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \quad (7)$$

Коэффициент β показывает также коэффициент приращения по току биполярного транзистора с схеме с общей базой. Величина β равна нескольким десяткам или сотням. Между коэффициентами передачи токов эмиттера β и базы α существует связь:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx \frac{1}{1 - \alpha} \quad (8)$$

Для значения $\alpha = 0,96$ коэффициент $\beta = 0,96/(1 - 0,96) = 24$, если $\alpha = 0,99$, то $\beta = 100$. Из остальных h-параметров важное значение имеют входное дифференциальное сопротивление транзистора:

$$h_{11э} = \Delta U_{BЭ} / \Delta I_B, U_{KЭ} = \text{const} \quad (9)$$

и выходная дифференциальная проводимость

$$h_{22э} = \Delta I_K / \Delta U_{KЭ}, I_B = \text{const} \quad (10)$$

Для схемы с ОЭ входное сопротивление единицы составляет единицы кОм, а выходная проводимость - 10^{-4} - 10^{-5}

Входная и выходная характеристики транзистора с ОЭ представлены на рис.8. Входной характеристикой транзистора, включенного по схеме с ОЭ, является зависимость напряжения $U_{BЭ}$ от входного тока I_B , $U_{BЭ} = f_1(I_B)$ при заданном напряжении $U_{KЭ}$. Совокупность таких зависимостей называется семейством входных характеристик транзистора (рис.8 б). При $U_{KЭ} = 0$ тепловой ток I_{K0} в цепи коллектора отсутствует и зависимость $U_{BЭ} = f_1(I_B)$ соответствует ВАХ эмиттерного p - n -перехода, включенного в прямом направлении. При $U_{KЭ} > 0$ в цепи коллектора появляется ток $-I_{K0}$, направленный навстречу току I_B . Для компенсации этого тока в цепи базы нужно создать ток $I_B = I_{K0}$, приложив соответствующее напряжение $U_{BЭ}$. Это приводит к смещению входной характеристики вправо вниз.

Выходной характеристикой транзистора по схеме с ОЭ считается зависимость $I_K = f_2(U_{KЭ})$ при заданном токе I_B (рис.8в). Если $U_{BЭ} = 0$, в цепи коллектора протекает только тепловой ток, так как в этом случае инжекция дырок из эмиттера в базу (для p - n - p -транзистора $I_{K0} = -I_B$) или инжекция электронов из эмиттера в базу (для n - p - n -транзистора) отсутствует. При $U_{KЭ} = 0$ ток в цепи коллектора не проходит, это объясняется тем, что напряжение $U_{BЭ}$ и $U_{KЭ}$ направлены встречно друг другу, т.е. потенциал

коллектора выше потенциала базы и коллекторный переход оказывается при этом закрыт. Поэтому выходные характеристики не пересекают ось ординат.

На рис.9 приведена принципиальная схема стенда для снятия вольт-амперных характеристик транзистора, включенного с ОЭ. Входная цепь (цепь базы) питается от регулируемого источника тока I положительной полярности, которой поддерживает заданный ток базы. Величина тока базы I_b измеряется миллиамперметром PA1. Напряжение между эмиттером и базой $U_{бэ}$ измеряется внешним вольтметром. Напряжение на коллекторе устанавливается от регулируемого источника напряжения E_k . Напряжение коллектора U_k измеряется с помощью внешнего вольтметра. Для измерения коллекторного тока I_k служит миллиамперметр PA2.

При работе транзистора с коллекторной нагрузкой R_k связь между коллекторным током I_k и напряжением на коллекторе U_k выражается уравнением нагрузочной характеристики:

$$I_k = (E_k - U_k) / R_k \quad (11)$$

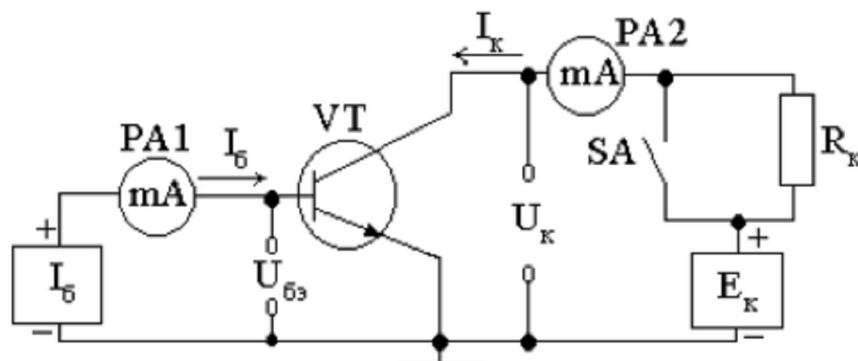


Рис. 9. Принципиальная схема стенда для снятия характеристик транзистора по точкам

Нагрузочная характеристика представляет прямую на семействе коллекторных характеристик транзистора (см. рис.8.в), пересекающуюся с осями координат E_k / R_k и E_k соответственно.

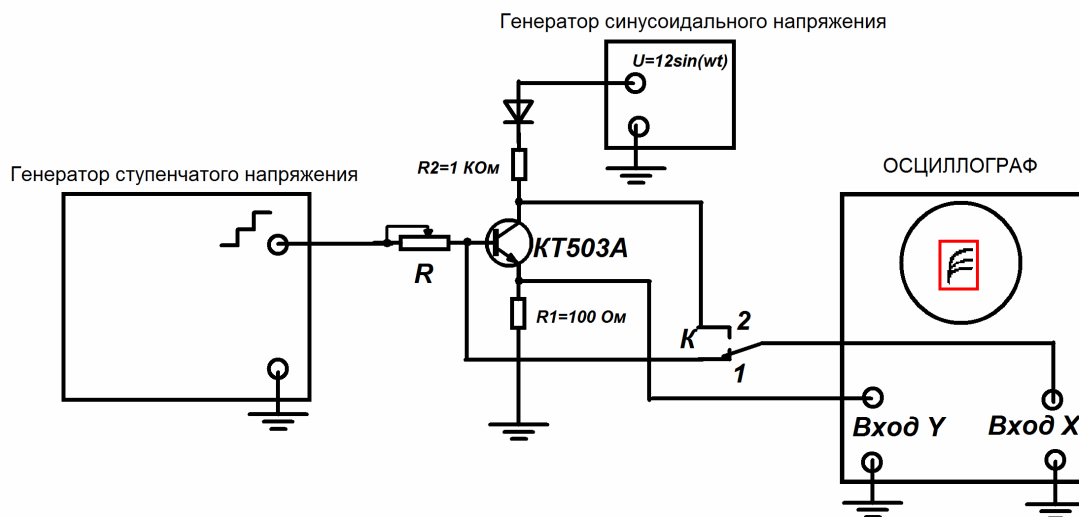


Рис. 10. Блок-схема установки для снятия характеристик транзистора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Принцип работы установки

Для наблюдения входной характеристики и семейства выходных характеристик транзистора на экране осциллографа в данной работе применяется специальная схема (см. рис. 10). Ключ **К** «РОД РАБОТЫ» служит для переключения режима работы установки на снятие входных (положение 1, нижнее) либо выходных (положение 2, верхнее) характеристик транзистора. Ручки **R** «АМПЛИТУДА» и «ЧАСТОТА» (ручка «ЧАСТОТА» на схеме рис. 10 не показана) служат для регулирования амплитуды и частоты опорного генератора. Для получения выходных характеристик транзистора генератор синусоидального напряжения подключается через однополупериодный выпрямитель (диод) между промежутком коллектор-эмиттер транзистора. В тоже время, на вход транзистора (эмиттер-база) подается некоторое постоянное в течение определенного промежутка времени напряжение от генератора ступенчато нарастающего напряжения. Таким образом, быстро (ступенчато) меняя ток базы транзистора (или, что тоже самое, напряжение база-эмиттер) и подавая напряжение развертки с генератора синусоидального напряжения между коллектором-эмиттером, получаем семейство выходных характеристик транзистора при заданных токах базы. Для воспроизведения этих характеристик на осциллографе необходимо на вход **Y** подать сигнал с резистора $R_1 = 100 \text{ Ом}$, находящего в цепи коллектор-эмиттер транзистора (этот сигнал будет пропорциональный коллекторному току I_k транзистора), а на вход **X** напряжение с промежутка коллектор-эмиттер транзистора. В результате получается зависимость $I_k = f(U_{к-э})$.

Для снятия входных характеристик переключатель **К** переводится в положение 1, тем самым вход **X** осциллографа подключается к промежутку база-коллектор транзистора, а так как эмиттер является общим электродом в данной схеме, то ток через резистор R_1 будет пропорционален также току базы транзистора. В результате на экране осциллографа получаем входную характеристику $I_b = f(U_{б-э})$. **Вследствие конечного времени послесвечения луча осциллографа, каждая выходная характеристика транзистора из семейства представлена в виде кусочно-разрывной кривой, поэтому при копировании выходных характеристик на сменный носитель (миллиметровую бумагу) необходимо соединить каждую кривую сплошной линией.**

Методика графического определения параметров транзистора.

Располагая вольт-амперными характеристиками транзистора, можно графическим путем определить низкочастотные значения h -параметров. Для определения h -параметров необходимо задать рабочую точку, например $A (I_{бA}, U_{кэA})$, в которой требуется найти параметры.

Параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$ находят по входной характеристики $U_{бэ} = f_1(I_б) |_{U_{кэ}=\text{const}}$.

Определим $h_{11э}$ для заданной рабочей точки А ($I_{бА}$, $U_{кэА}$). На входной характеристике находим точку А, соответствующую заданной рабочей точке (рис.9). Выбираем вблизи рабочей точки А две вспомогательные точки A_1 и A_2 (приблизительно на одинаковом расстоянии), определим по ним $\Delta U_{бэ}$ и $\Delta I_б$ и рассчитаем входное дифференциальное сопротивление, по формуле:

$$h_{11э} = (\Delta U_{бэ} / \Delta I_б) |_{U_{кэ}=\text{const}}. \quad (12)$$

Приращения $\Delta U_{бэ}$ и $\Delta I_б$ выбирают так, чтобы не выходить за пределы линейного участка, их можно примерно принять за (10-20)% от значений рабочей точки.

Графическое определение параметра $h_{12э} = \Delta U_{бэ} / \Delta U_{кэ}$ затруднено, так как семейство входных характеристик при различных $\Delta U_{кэ} > 0$ практически сливается в одну (рис.9.).

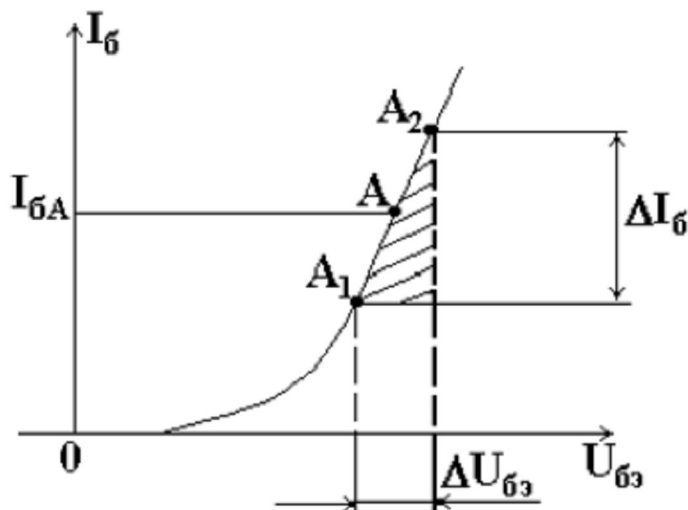


Рис. 9. К графическому определению параметров транзистора по входной характеристике.

Параметры $h_{22э}$ и $h_{21э}$ определяются из семейства выходных характеристик транзистора $I_к = f_1(U_{кэ})$ (рис.10).

Параметр $h_{21э} = (\Delta I_к / \Delta I_б) |_{U_{кэ}=\text{const}}$ находится в заданной рабочей точке А ($I_{бА}$, $U_{кэА}$). Для нахождения приращений выбирают две вспомогательные точки A_1 и A_2 вблизи рабочей точки А при постоянном $U_{кэ} = U_{кэ0}$. Приращение тока базы $\Delta I_б$ следует брать, как $\Delta I_б = I_{б2} - I_{б1}$, где $I_{б2}$ и $I_{б1}$ определены как токи базы в точках A_2 и A_1 . Этому приращению $\Delta I_б$ соответствует приращение коллекторного тока $\Delta I_к = I_{к2} - I_{к1}$, где $I_{к2}$ и $I_{к1}$ определены в точках A_2 и A_1 . Тогда дифференциальный коэффициент передачи тока базы рассчитаем по формуле:

$$h_{21э} = (\Delta I_K / \Delta I_6) |_{U_{кэ} = \text{const}} . \quad (13)$$

Параметр $h_{22э} = (\Delta I_K / \Delta U_{кэ}) |_{I_6 = \text{const}}$ определяется по наклону выходной характеристики (рис.1.9) в заданной рабочей точке А ($I_{6А}$, $U_{кэА}$), при постоянном токе базы I_6 . Для нахождения приращений выбирают две вспомогательные точки A_1^* и A_2^* . Для этих точек определяют $\Delta U_{кэ}^* |_{I_6 = I_{6А}} = U_{к2} - U_{к1}$ – приращение коллекторного напряжения, и приращение коллекторного тока $\Delta I_K^* = I_{к2}^* - I_{к1}^*$. При этом из семейства выходных характеристик следует выбирать ту характеристику, которая снята при выбранном значении тока базы $I_6 = I_{6А}$. Таким образом, получаем формулу для расчета $h_{22э}$:

$$h_{22э} = (\Delta I_K^* / \Delta U_{кэ}^*) |_{I_6 = \text{const}} \quad (14)$$

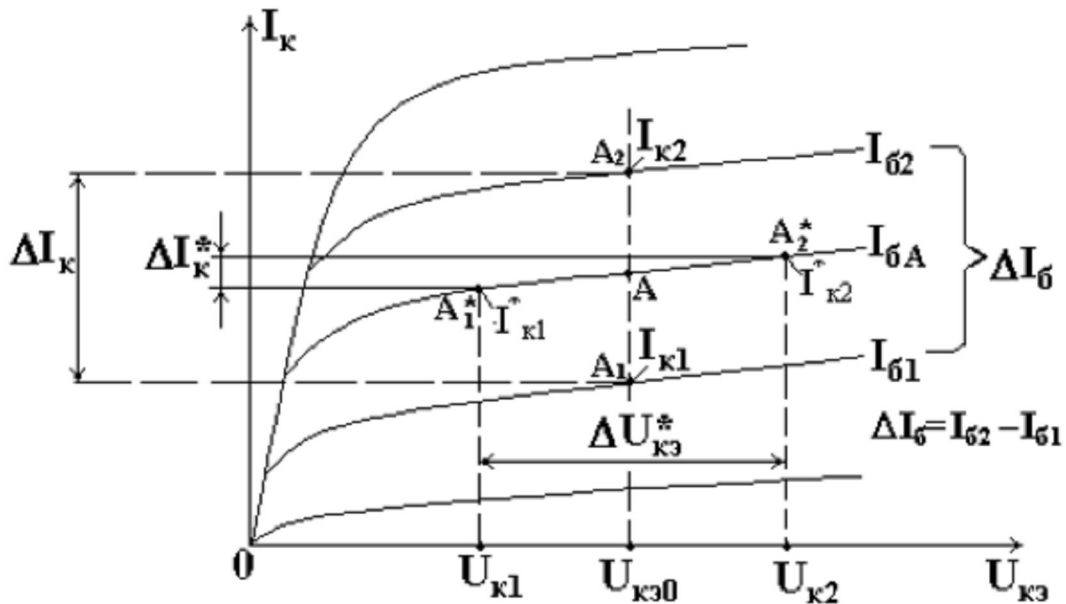


Рис. 10. К графическому определению параметров транзистора по выходной характеристике.

Порядок выполнения

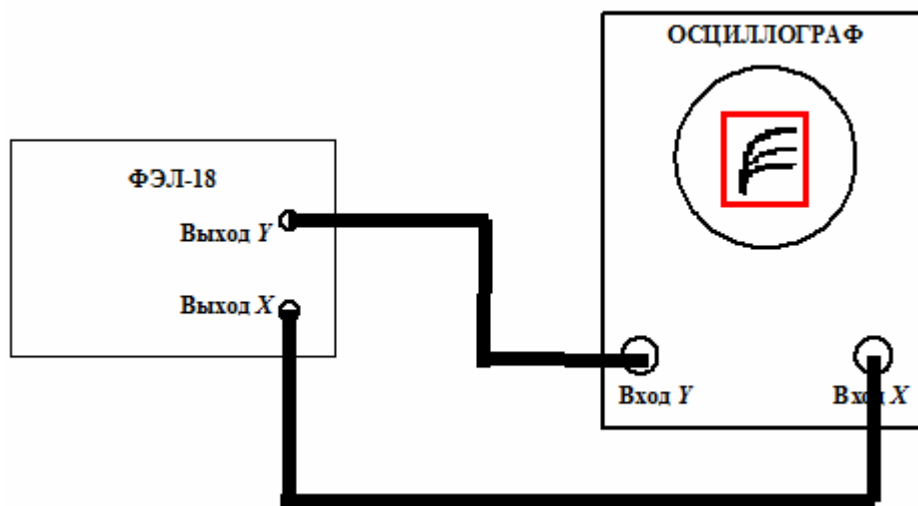


Рис. 11. Блок-схема подключения установки ФЭЛ-18

1. Подключить модуль ФЭЛ-18 и осциллограф согласно блок-схеме рис. 11.
2. Включить осциллограф и модуль ФЭЛ-18 в сеть ~ 220 В.
3. Поставить тумблеры «сеть» осциллографа и ФЭЛ-18 в положение «ВКЛ». При этом на панели модуля ФЭЛ-18 и осциллографа должны загореться сигнальные светодиоды «сеть». Дать приборам прогреться в течении 2-4 минут.
4. Для визуализации характеристик транзистора осциллограф необходимо перевести в режим «X-Y» (данный режим выключает внутренний генератор осциллографа, и прибор начинает развертывать сигнал Y в зависимости от поданного на горизонтально отклоняющие пластины X внешнего напряжения), нажав кнопку «X-Y» на панели осциллографа. Ручку ВОЛЬТ/ДЕЛ поставить в положение 0,2, ручку ПЛАВНО оси Y повернуть по часовой стрелке до упора (только в этом положении чувствительность оси Y осциллографа соответствует показаниям ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ).
5. Поставить переключатель «РОД РАБОТЫ» в нижнее положение, обеспечивающее снятие входной характеристики транзистора, ручки «АМПЛИТУДА» и «ЧАСТОТА» повернуть против часовой стрелки до упора.
6. Получить входную характеристику транзистора, аналогичную рис. 9. При необходимости вращением ручки «ЧАСТОТА» добиться стабилизации характеристики.
7. Скопировать входную характеристику на сменный носитель (миллиметровую бумагу) по клеткам с экрана осциллографа.

8. Перевести показания осциллографа в клетках по оси X в значения напряжения $U_{\delta-\varepsilon}$ (вольты), а по оси Y в значения тока базы I_{δ} (амперы). При этом следует помнить, что в режиме « X - Y » чувствительность оси X осциллографа составляет $K_{\text{чувств}} = 0.5 \frac{\text{Вольт}}{\text{клетка}}$, а чувствительность оси Y осциллографа определяется положением ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ (рекомендованное положение $0.2 \frac{\text{Вольт}}{\text{клетка}}$ (0.2 вольт/дел)). Для перевода сигнала напряжения оси Y в ток базы транзистора, следует для каждой точки показания в вольтах разделить на значение сопротивления, с которого снимается сигнал, в нашем случае сигнал пропорциональный току базы снимается с резистора $R_1=100$ Ом. Таким образом, чтобы получить входную характеристику транзистора в значениях $I_{\delta} = f(U_{\delta-\varepsilon})$ необходимо через равные интервалы для каждой точки входной характеристики воспользоваться переводом $U_{\delta-\varepsilon} = 0.5 [\text{вольт/клетка}] \cdot X [\text{кол} - \text{во клеток}]$,
- $$I_{\delta} = \frac{0.2 \left[\frac{\text{вольт}}{\text{клетка}} \right] \cdot Y [\text{кол} - \text{во клеток}]}{100 [\text{Ом}]} \quad (\text{количество клеток})$$
- следует при этом считать с начала вольт-амперной характеристики, при этом количество клеток, естественно, может быть дробным, например $1\frac{2}{5}$ клетки).
9. Выбрать некоторую рабочую точку входной характеристики (см. рис. 9). Рассчитать для этой точки значение входного дифференциального сопротивления транзистора $h_{11\varepsilon}$ по формуле (12).
10. Переключить установку в режим снятия выходных характеристик, поставив переключатель «РОД РАБОТЫ» в верхнее положение. Переключатель **вольт/дел** перевести в положение 0.1. Следует помнить, что из-за конечного времени послесвечения луча осциллографа серия выходных характеристик транзистора на осциллографической трубке представлена кусочно-непрерывными кривыми.
11. Получить семейство из четырех-пяти выходных характеристик. При необходимости для улучшения изображения плавно вращать ручку «ЧАСТОТА». Увеличение числа ветвей выходных характеристик, приходящихся на единицу длины оси Y достигается вращением ручки «АМПЛИТУДА».
12. Зарисовать семейство выходных характеристик транзистора с экрана осциллографа в натуральную величину по клеткам, соединяя каждую характеристику непрерывной линией аналогично рис. 10. При этом следует помнить, что генератор настроен таким образом, что обеспечивает развертку выходных характеристик при различных

токах базы с шагом $\Delta I_{\text{б}} \approx 40 \text{ мкА}$ (нижняя ветвь соответствует $I_{\text{б}1} = 0 \text{ мкА}$, следующая ветвь соответствует $I_{\text{б}2} = 40 \text{ мкА}$, следующая $I_{\text{б}3} = 80 \text{ мкА}$ и т. д.).

13. При переводе показаний в $U_{\text{к-э}}$ и $I_{\text{к}}$ поступить аналогично п. 8. При

этом
$$I_{\text{к}} = \frac{K \left[\frac{\text{вольт}}{\text{клетка}} \right] \cdot Y [\text{кол-во клеток}]}{100 [\text{Ом}]}$$
 (где K – положение

ручки вольт/дел, в нашем случае 0.1).

14. Выбрать рабочую точку на семействе выходных характеристик. По формуле (13) рассчитать параметр $\beta = h_{21\text{э}}$ – дифференциальный коэффициент передачи тока базы.

15. Для данной рабочей точки рассчитать $h_{22\text{э}}$ – выходную дифференциальную проводимость по формуле (14).

16. Зная коэффициент $\beta = h_{21\text{э}}$, рассчитать дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера α по формуле (8).

17. По окончании измерений выключить все приборы от сети соответствующими переключателями и вынуть вилки из розеток.

ДЛЯ СПРАВКИ

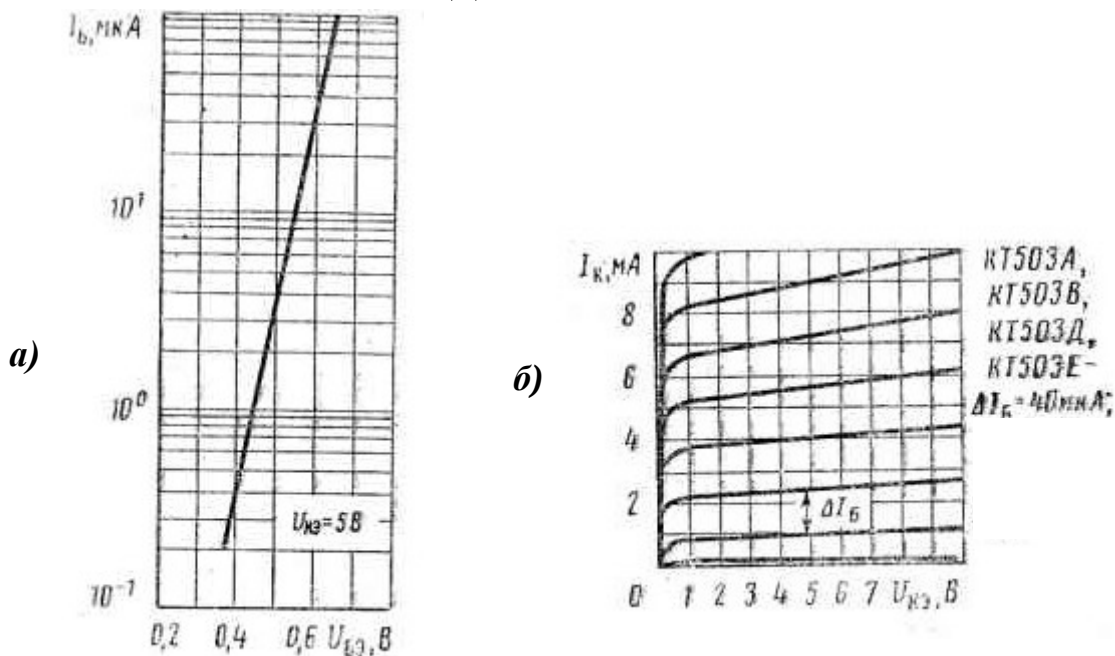


Рис. 12. Входная характеристика **а)** и семейство выходных характеристик **б)** исследуемого транзистора KT503

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое p - n переход? Какими свойствами он обладает?
2. Что такое база, эмиттер, коллектор?
3. Какие физические процессы лежат в основе работы транзистора?
4. Какие свойства транзистора позволяют использовать его для усиления электрических сигналов?
5. Что такое коэффициент усиления по току? Как он определяется?
6. Какие характеристики транзистора определяют его основные свойства?
7. Что такое инжекция носителей тока?
8. В какой области биполярного транзистора происходит инжекция носителей тока?
9. Что означает термин «биполярный транзистор»? Какие еще типы транзисторов вы знаете?
10. Какую роль играют электроны в работе p - n - p транзистора?
11. Какую роль играют дырки в работе p - n - p транзистора?
12. Что такое основные и неосновные носители тока в полупроводниках?
13. Какие носители тока инжектируются в базу в p - n - p транзисторе и n - p - n транзисторе?
14. Какие физические процессы происходят в базовой области транзистора после инжекции туда неосновных носителей тока?
15. Объясните принцип работы схемы для снятия характеристик транзистора с помощью электронного осциллографа.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. // М.: Мир. 1984, Т. 1 455 с. Т.2 455 с.
2. Маллер Р.А, Кейминс Т. Элементы интегральных схем. // М.: Мир, 1986, 630 с.
3. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. (Физические и технологические основы, надежность). // М.: Высшая школа. 1995, 464 с.
4. Справочник. Полупроводниковые приборы. Нефедов А.В., Гордеева В.И. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги. // М.: КУБК-а. 1998, 401 с.