

***БИПОЛЯРНЫЕ***

***ТРАНЗИСТОРЫ***

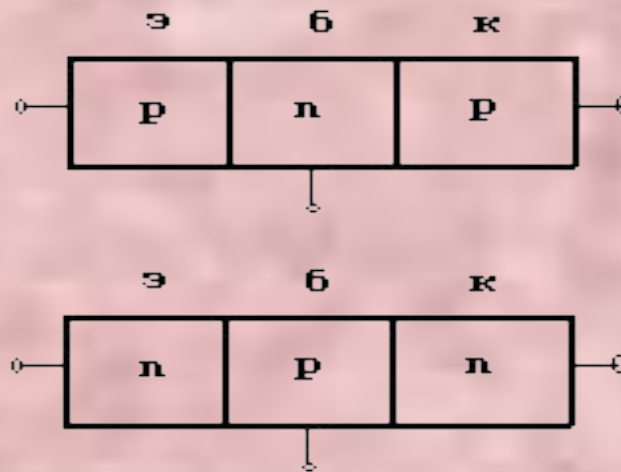
# Введение

В 1948г. американские ученые **Дж.Бардин** и **В.Браттейн** создали полупроводниковый триод, или транзистор. Это событие имело громадное значение для развития полупроводниковой электроники. Транзисторы могут работать при значительно меньших напряжениях, чем ламповые триоды, и не являются простыми заменителями последних: их можно использовать не только для усиления и генерации переменного тока, но и в качестве ключевых элементов. Определение «**биполярный**» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда двух сортов (электроны и дырки). Слово «**транзистор**» произошло от английского словосочетания «**transfer resistor**» - преобразователь сопротивления.

Появление первых образцов биполярных транзисторов стимулировало проведение исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию различных типов таких приборов во многих странах мира, в том числе и в Советском Союзе, ученые которого внесли существенный вклад в разработку этой проблемы. В настоящее время биполярный транзистор является одним из наиболее важных полупроводниковых приборов. Он используется в радиоэлектронике в качестве дискретного активного элемента, а в планарном исполнении является основой для создания интегральных твердотельных схем. В свою очередь, твердотельные схемы являются главными элементами современного поколения ЭВМ и других сложных радиоэлектронных устройств.

# Общие сведения

**Биполярный транзистор** представляет собой полупроводниковый прибор, состоящий из трёх областей с чередующимися типами электропроводности, пригодный для усиления мощности.



Эти области разделяются электронно-дырочными переходами(э-д переходами). Особенность транзистора состоит в том, что между его э-д переходами существует взаимодействие - ток одного из электродов может управлять током другого. Такое управление возможно, потому что носители заряда, инжектированные через один из э-д переходов могут до другого перехода, находящегося под обратным напряжением, и изменить его ток.

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

**1.Режим отсечки** - оба э-д перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идёт сравнительно небольшой ток;

**2.Режим насыщения** - оба э-д перехода открыты;

**3.Активный режим** - один из э-д переходов открыт, а другой закрыт.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором почти отсутствует. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причём транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы.

Область транзистора, расположенная между переходами называется **базой(Б)**. Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из них изготавливают так, чтобы из неё наиболее эффективно происходила инжекция в базу, а другую - так, чтобы соответствующий переход наилучшим образом осуществлял экстракцию инжектированных носителей из базы.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют **эмиттером(Э)**, а соответствующий переход эмиттерным.

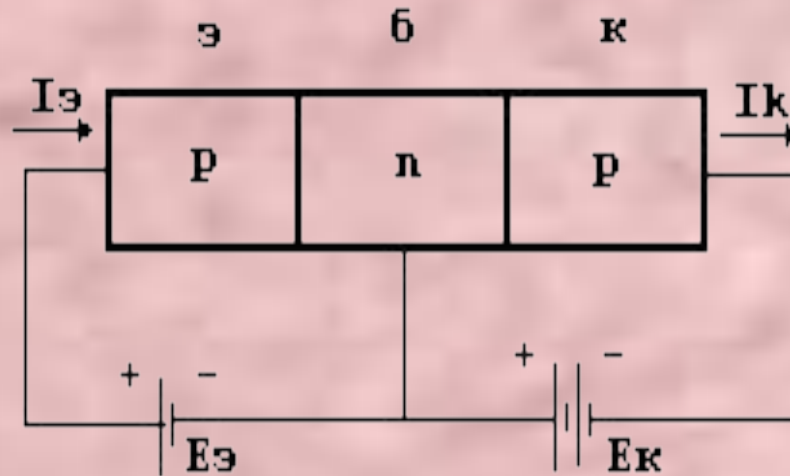
Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы - **коллектор(К)**, а переход коллекторным.

Если на Э переходе напряжение прямое, а на К переходе обратное, то включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности - инверсным.

Основные характеристики транзистора определяются в первую очередь процессами, происходящими в базе. В зависимости от распределения примесей в базе может присутствовать или отсутствовать электрическое поле. Если при отсутствии токов в базе существует электрическое поле, которое способствует движению неосновных носителей заряда от Э к К, то транзистор называют дрейфовым, если же поле в базе отсутствует - бездрейфовый (диффузионный).

# Принцип работы транзистора

Когда ключ разомкнут, ток в цепи эмиттера (далее Э) отсутствует. При этом в цепи коллектора (К) имеется небольшой ток, называемый обратным током К и обозначаемый ***Ikbo***. Этот ток очень мал, так как при обратном смещении К перехода потенциальный барьер велик и непреодолим для основных носителей — дырок коллектора и свободных электронов базы. К легирован примесью значительно сильнее, чем база. Вследствие этого неосновных носителей в коллекторе значительно меньше, чем в базе, и обратный ток К создаётся главным образом неосновными носителями: дырками, генерируемыми в базе в результате тепловых колебаний, и электронами, генерируемыми в К.

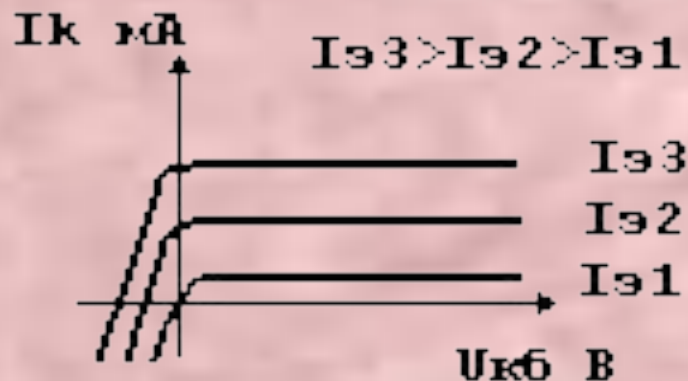


Замыкание ключа в цепи Э приводит к появлению тока в этой цепи, так как смещение эмиттерного  $p-n$  перехода в прямом направлении понижает потенциальный барьер для дырок, переходящих из Э в Б, и для электронов переходящих из Б в Э. Мы рассматриваем только дырки так как только они создают приращение коллекторного тока. Говорят что дырки инжектируются в базу.

В базе обыкновенного транзистора электрическое поле отсутствует, поэтому дальнейшее движение инжектированных дырок определяется процессом диффузии. Так как толщина базы транзистора много меньше длины свободного пробега дырки до рекомбинации, то большая часть инжектированных дырок достигает коллекторного перехода, благодаря чему коллекторный ток усиливается. Лишь очень небольшая часть дырок рекомбинирует с электронами базы. Таким образом величина тока через правый  $p-n$  переход практически полностью определяется величиной тока через левый переход.

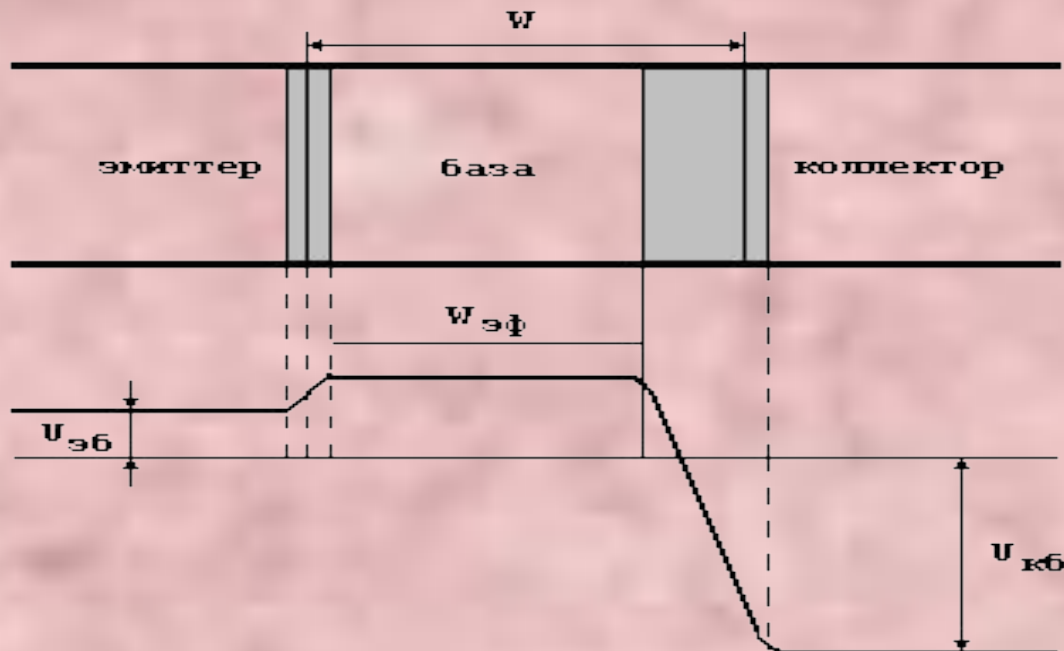
Характерной особенностью рассматриваемых транзисторов является существование двух типов носителей заряда(электронов и дырок), участвующих в работе прибора. В связи с этим полупроводниковые приборы этого получили название биполярных транзисторов.

Семейство выходных характеристик транзистора показано при некоторых постоянных значениях Э тока:



Для рассматриваемого  $p-n-p$  транзистора принято отрицательное напряжение  $K-B$  откладывать вправо по оси абсцисс.

Выходные характеристики, соответствующие отрицательным значениям напряжения  $K-B$ , в правом верхнем квадранте идут почти горизонтально, но с небольшим подъёмом. Чтобы объяснить это рассмотрим потенциальную диаграмму транзистора (цветом выделены обеднённые слои):



Так как Э и К сильнее легированы примесью, чем база то обеднённые слои сосредоточены в основном в базе.

Эффективная толщина базы  $W_{эф}$ , т.е. расстояние между границами обеднённых слоёв, меньше толщины базы  $W$ . Увеличение отрицательного напряжения на коллекторе расширяет обеднённый слой коллекторного перехода и, следовательно, вызывает уменьшение эффективной толщины базы.

Это явление носит название *эффекта Эрли*. Модуляция толщины базы объясняет некоторый подъём выходных характеристик при увеличении отрицательного напряжения  $K-B$ . Коллекторный ток при этом увеличивается так как меньшая часть дырок теряется в базе вследствие рекомбинации с электронами.

# Принцип действия транзистора в качестве усилителя

**Транзистор** - это полупроводниковый прибор, имеющий два  $p$ - $n$ -перехода, расположенных в одном полупроводниковом монокристалле на расстоянии, значительно меньшем диффузионной длины неосновных носителей заряда. На *рис. 1* показано включение транзистора типа  $p$ - $n$ - $p$  по схеме с общей базой.

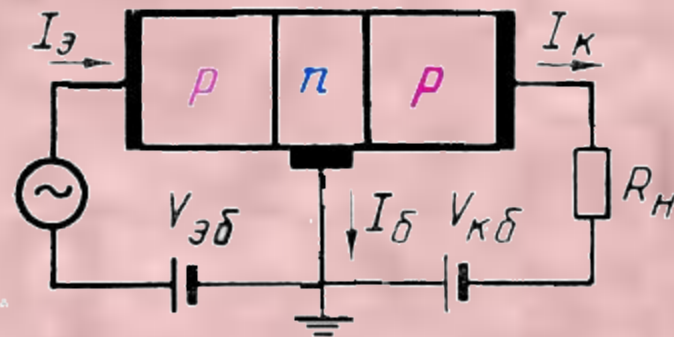


Рис. 1. Биполярный  $p$ - $n$ - $p$  транзистор, включенный по схеме с общей базой

Левый  $p$ - $n$ -переход называется эмиттерным переходом, а его  $p$ -область - эмиттером. Правый  $p$ - $n$ -переход называется коллекторным переходом, а его  $p$ -область - коллектором. Заключенная между эмиттером и коллектором  $n$ -область называется базой транзистора. Транзистор, у которого эмиттер и коллектор  $n$ -типа, а база  $p$ -типа, называется транзистором  $n$ - $p$ - $n$ -типа. При работе транзистора  $p$ - $n$ - $p$ -типа в режиме усиления эмиттерный переход включен в пропускном направлении и инжектирует дырки в базу, откуда они попадают в цепь обратносмещенного коллекторного перехода. Поскольку толщина базы транзистора  $W$  значительно меньше диффузионной длины дырок  $L_p$ , то концентрация инжектированных эмиттером дырок при пролете через базу почти не изменяется. Таким образом, сила дырочного тока в коллекторной цепи  $I_{пк}$  приблизительно равна силе дырочного тока в эмиттерной цепи  $I_{пэ}$ . Ток насыщения коллекторного перехода мал, и им можно в первом приближении пренебречь по сравнению с  $I_{пк}$ . Поскольку коллекторный переход смещен в обратном направлении, то его сопротивление велико, что позволяет включать в коллекторную цепь большое сопротивление нагрузки  $R_H$  без заметного изменения коллекторного тока. При этом, конечно,  $R_H$  должно быть значительно меньше сопротивления коллектора. В связи с отмеченными выше обстоятельствами относительно малое изменение падения напряжения на эмиттерном переходе, сопротивление которого мало, вызовет большое изменение падения напряжения на сопротивлении нагрузки ( $V = I_{пк} * R_H$ ) при почти одинаковом изменении силы тока в эмиттерной и коллекторной цепях. В результате резкого различия входного и выходного сопротивлений транзистор осуществляет усиление по мощности.

При работе транзистора в описанном выше режиме через эмиттерный переход будет течь и электронный ток, вызванный инжекцией электронов из базы в эмиттер, но эта составляющая тока в коллекторный переход не попадает и не влияет на силу тока в его цепи, то есть она оказывается бесполезной для управления коллекторным переходом. Отсюда следует, что наилучшее управление коллекторного тока эмиттерным может быть достигнуто, в транзисторе, в котором эмиттерный ток в основном обусловлен инжекцией дырок в базу. Это условие выполняется за счет того, что обычно удельная проводимость эмиттера  **$sp_э$**  значительно больше удельной проводимости базы  **$sn_б$** . Технология изготовления транзисторов предусматривает выполнение этого условия и для коллекторного перехода, то есть

$$sp_k \gg sn_б$$

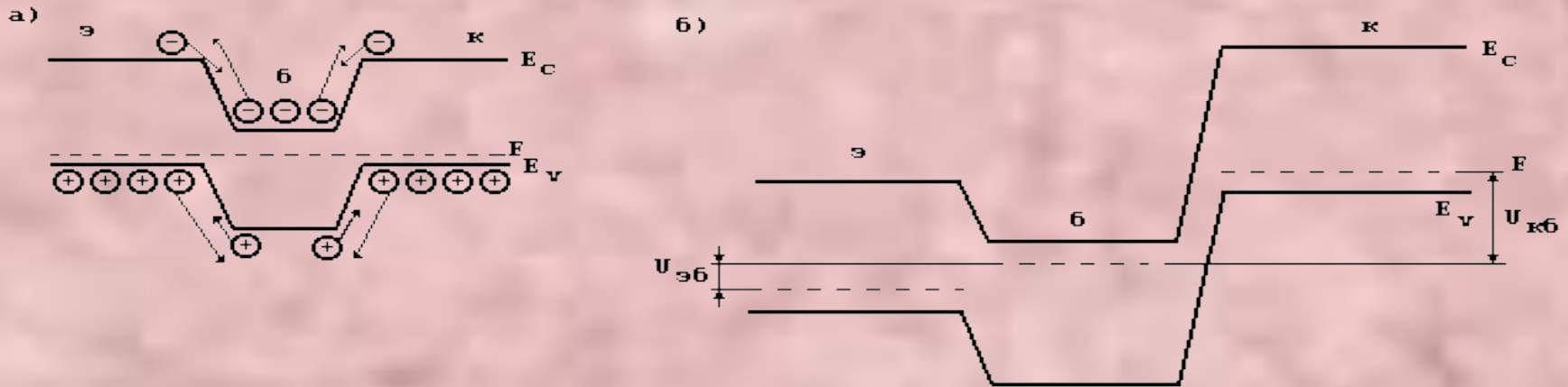
. Ток через базовый контакт  **$I_б$**  является чисто электронным. В стационарном случае он определяется потоком электронов, которые втягиваются в базу через базовый контакт для компенсации электронов, уходящих в эмиттер и создающих электронную составляющую тока эмиттера  **$I_{nэ}$** , электронов, гибнущих за счет рекомбинации с дырками, инжектируемыми из эмиттера, за вычетом электронов, поставляемых в базу обратным током коллектора. Усилительные свойства транзистора обычно характеризуются коэффициентом передачи тока или коэффициентом усиления, который равен отношению изменения выходного тока к изменению входного при неизменном чается через  **$a$**  или  **$h_{21}$** . В соответствии с определением

$$a = (dI_k / dI_э) V_{кб} = const = g * B * M_k (1)$$

Параметр  **$g = dI_{pэ} / d(I_{pэ} + I_{nэ})$**  называется **эффективностью эмиттера**, так как он показывает, какая часть приращения тока эмиттера управляет током коллектора;  **$B = dI_{pk} / dI_p$**  - **коэффициент переноса**; он показывает, во сколько раз уменьшается приращение дырочного тока в процессе переноса дырок от эмиттера до коллектора за счет их рекомбинации с электронами в базе. И наконец,  **$M_k = d(I_{pk} + I_{nk}) / dI_{pk}$**  называется **коэффициентом умножения коллектора**.

# Энергетическая диаграмма транзистора и распределение концентрации носителей

Энергетическую диаграмму транзистора можно построить на основе энергетической диаграммы  $p$ - $n$  структуры, причём каждый переход имеет свой потенциальный барьер, препятствующий переходу основных носителей в соседнюю область:



Состояние транзистора, при котором отсутствует напряжение на  $p$ - $n$  переходе между эмиттером и базой (Э - Б), называют равновесным (рис.а). В равновесном состоянии на обоих переходах устанавливается динамическое равновесие между потоками дырок и электронов, протекающих в обе стороны.

Каждый  $p$ - $n$  переход транзистора можно рассматривать отдельно при условии, что расстояние между переходами значительно больше диффузионной длины неосновных носителей в средней области. Из-за наличия потенциальных барьеров в равновесном состоянии на  $p$ - $n$  переходах образуется **"потенциальная яма"**, из которой могут выйти лишь те электроны, которые обладают достаточной тепловой энергией, и в равновесном состоянии в обоих переходах устанавливается динамическое равновесие между потоками электронов.

Аналогичное равновесие устанавливается между потоками дырок, которые находятся на **"потенциальных гребнях"** и свободно перемещаются в соседний слой. В равновесном состоянии результирующие токи через оба перехода равны нулю.

В сплавном транзисторе база однородна, поэтому механизм перемещения носителей имеет диффузионный характер и такие транзисторы называются диффузионными. В рабочем режиме на переходы транзистора подаются постоянные напряжения  $U_{эб}$  и  $U_{кб}$ , которые создаются источниками э.д.с.  $E_э$  и  $E_к$  в эмиттерной и коллекторных цепях:

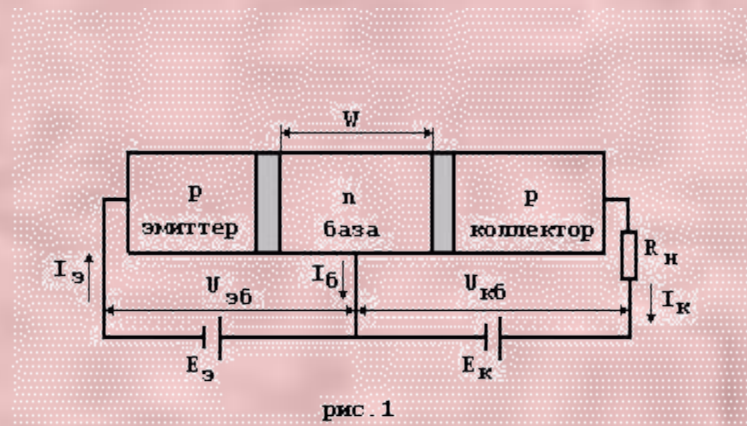


рис. 1

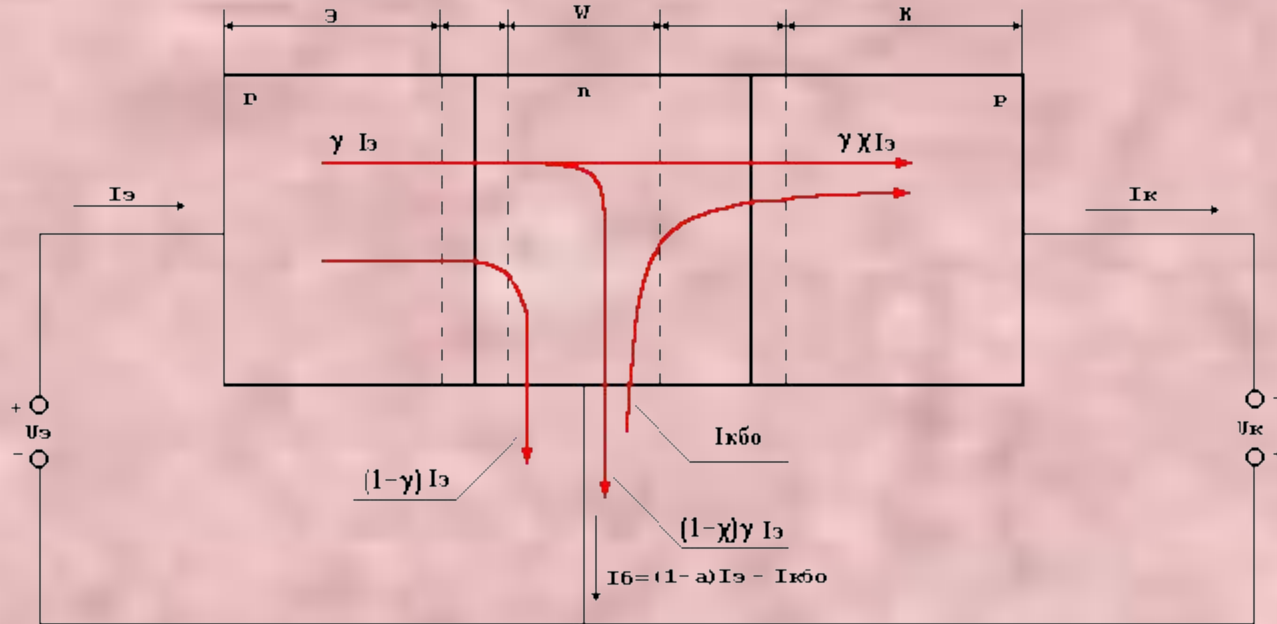
При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения смещения  $U_{эб}$  потенциальный барьер этого перехода уменьшается и нарушается равновесное состояние. В результате начнётся взаимная инжекция носителей в базу и эмиттер (рис.б). При этом в базу инжектируются дырки, которые преодолевают уменьшившийся потенциальный барьер. Эти дырки проходят через базу и далее через коллекторный переход в коллектор, образуя коллекторный ток  $I_к$ , протекающий через нагрузочное сопротивление  $R_н$ . Небольшая часть дырок рекомбинирует в базе, образуя ток базы  $I_б$ . Этот ток очень мал, так как база имеет незначительную длину (меньше длины свободного пробега) и рекомбинация в ней мала.

У транзистора концентрация дырок в р областях много больше концентрации электронов в n области, т.е.  $P_p \gg N_n$ , поэтому электронной составляющей эмиттерного тока можно пренебречь.

Если в коллекторную цепь включить  $R_н$ , то при отсутствии напряжения на коллекторном переходе полезная мощность на нагрузке не выделяется, т.е. усиления не происходит. Чтобы обеспечить усиление, на коллекторный переход необходимо подать запирающее отрицательное напряжение  $U_{кб}$ , что приведёт к возрастанию потенциального барьера коллекторного перехода.

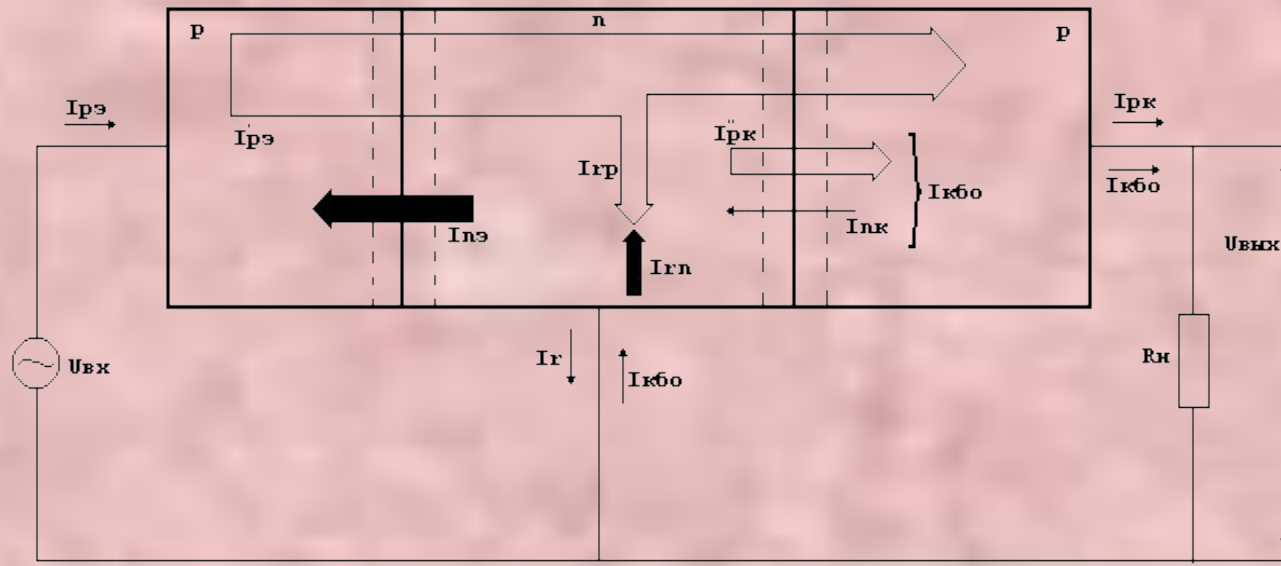
Принцип действия транзистора состоит в управлении током одного из переходов с помощью тока другого перехода. При снижении потенциального барьера  $U_{бэ}$  на эмиттерном переходе возрастает поток дырок, уходящих в базу и диффундирующих далее к коллекторному переходу. Попадая в коллектор эти дырки создают коллекторный ток  $I_к$ , протекающий через нагрузку. Следует подробнее остановиться на эффекте усиления мощности. Нагрузочное сопротивление  $R_н$  подключается последовательно с коллекторным переходом. На этом переходе имеется значительная разность потенциалов, которую приходится преодолевать току, обусловленному диффузией из эмиттера.

# Токи в транзисторе



В результате снижения потенциального барьера на эмиттерном переходе из эмиттера в базу начинается диффузионное движение основных носителей. Так как дырок (электронов) в эмиттере (базе) много больше, чем в базе (эмиттере), то коэффициент инжекции весьма высок. Концентрация дырок в базе увеличивается. Появившийся вблизи эмиттерного перехода объемный положительный заряд почти мгновенно компенсируется зарядом электронов входящих в базу от источника  $U_{\text{ЭБ}}$ . Цепь тока Эмиттер-База замкнута. Электроны устремившиеся в базу создают вблизи эмиттерного перехода объемный отрицательный заряд. Около перехода образуется область повышенной концентрации дырок и электронов. Они начинают диффундировать в сторону коллектора. Так как база узкая, то дырки (неосновные носители) не успевают прорекомбинировать и, попадая в ускоряющее поле коллекторного перехода, втягиваются в коллектор. Этот процесс называется экстракция. Электроны же, число которых равно числу ушедших в коллектор дырок, устремляются в базовый вывод. Цепь коллектор-база замкнута.

$I_{pэ}$  - дырочный эмиттерный ток       $I_{pк}$  - дырочный коллекторный ток  
 $I_{rp}$  и  $I_{rn}$  - рекомбинационные токи       $I_r = I_{rp} + I_{rn}$



$$I_э = I_к + I_б$$

$I_э$  - ток в цепи эмиттера,

$I_к$  - ток в цепи коллектора,

$I_б$  - ток на базовом выводе.

В активном режиме к эмиттеру приложено прямое напряжение и через переход течет ток

$$I_э = I_{эp} + I_{эн} + I_{эр},$$

где  $I_{эp}$  - ток инжекции дырок из эмиттера в базу,  $I_{эн}$  - ток инжекции электронов из базы в эмиттер,  $I_{эр}$  - ток рекомбинации в эмиттерном переходе.

$$I_{обp} = I_о + I_г + I_у,$$

где  $I_о$  - тепловой ток,  $I_г$  - ток генерации,  $I_у$  - ток утечки.

$$I_{кр} = I_{эp} - I_{бр}.$$

# Статические характеристики и коэффициент передачи тока в различных схемах включения.

## Схема с общей базой

При включении транзистора по схеме с общей базой (рис. 1) входным является ток эмиттера, а выходным - коллектора. Коэффициент передачи тока в этом случае определяется формулой (1) :

$$a = (dI_k / dI_{\varepsilon}) V_{кб} = \text{const} = g * b * M_k (1)$$

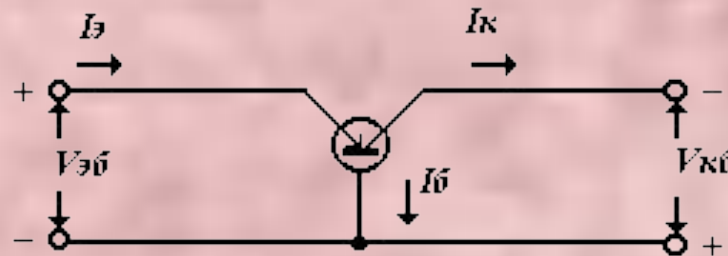


Рис. 1

Схема с общей базой

Семейство входных статических характеристик, то есть зависимость  $I_{\varepsilon}$  от  $V_{\varepsilon б}$  при фиксированных значениях  $V_{кб}$ , описывается выражением (2):

$$j_{\varepsilon} = j_{ps} / sh(W/Lp) * \{ [ \exp(q * V_{\varepsilon б} / k * T) - 1 ] * ch(W/Lp) - [ \exp(q * V_{кб} / k * T) - 1 ] \} + j_{ns} * [ \exp(qV_{\varepsilon б} / k * T) - 1 ]. (2)$$

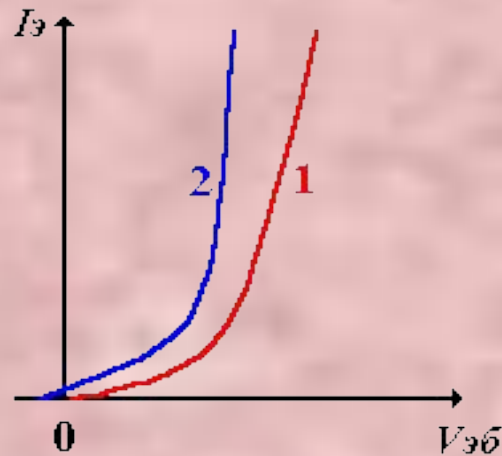


Рис. 2. Входные хар-ки р-п-р транзистора, включенного по схеме с общей базой: 1-  $V_{кб} = 0$ ; 2-  $V_{кб} < 0$

Если  $V_{кб} = 0$ , то  $Iэ \sim [ \exp( q * Vэб / k * T ) - 1 ]$  (рис.2, кривая 1). При  $V_{кб} < 0$  и  $Vэб = 0$  эмиттерный ток, как следует из (2) отличается от нуля. Обычно при работе транзистора в режиме усиления  $| V_{кб} | > 2,3k * T / q$ , но тогда  $p(W) = -pn$ , а  $p = pn$ . Таким образом, в рассматриваемой ситуации в базе транзистора существует градиент концентрации дырок и  $Iэ$  не равно 0. Для компенсации этого тока на эмиттерный переход необходимо подать смещение в запиорном направлении ( рис. 2, кривая 2). Семейство выходных характеристик ( зависимость  $Iк$  от  $V_{кб}$  при фиксированных значениях  $Iэ$  ) описывается формулой (3) :

$$jк = jps / sh(W/Lp) * \{ [ \exp(q * Vэб / k * T) - 1 ] - [ \exp(q * V_{кб} / k * T) - 1 ] * ch(W/Lp) \} - jns * [ \exp(q * V_{кб} / k * T) - 1 ] \quad (3)$$

В том случае, когда  $Iэ = 0$  и  $Vэб = 0$ , а  $V_{кб} < 0$ , выходная характеристика подобна вольт - амперной характеристике обратносмещенного р-п перехода, то есть

$$Iк0 = - [ Ipsk * cth(W / Lp) + Insk ] [ \exp( - q * |V_{кб}| / k * T ) - 1 ], \quad (4)$$

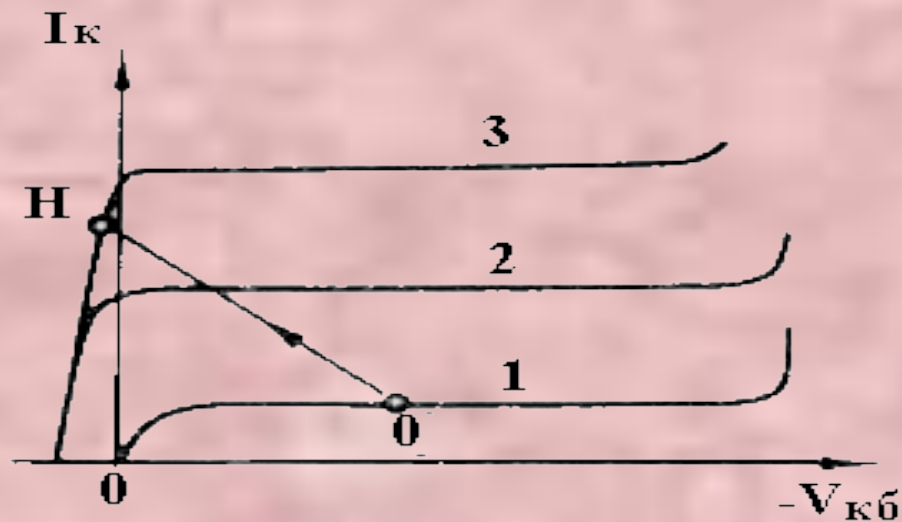


Рис. 3 Выходные хар-ки  
р-п-р транзистора, включенного  
по схеме общей базой:  
1 -  $I_3 = 0$ ; 2 -  $I_3 = I_1$ ;  
3 -  $I_3 = I_2 \approx I_1$

где  $I_{psk} = jps * S_k$ ,  $I_{nsk} = jns * S_k$ , а  $S_k$  - площадь коллекторного перехода. На рис. 3 этому выражению соответствует кривая 1. Поскольку  $sp_э \gg sn_б$ , то  $jps \gg jns$  и последним членом в (2) можно пренебречь. Кроме того, обычно  $\exp(q * V_{эб} / k * T) - 1 \gg \exp(-q * |V_{кб}| / k * T) - 1$ . С учетом этих обстоятельств из (2) следует, что  $I_э \approx I_{psэ} * \text{cth}(W / L_p) * [\exp(q * |V_{эб}| / k * T) - 1]$ , где  $I_{psэ} = jps * S_э$ , а  $S_э$  - площадь эмиттерного перехода. Тогда, полагая, что  $S_k = S_э$ , можно (3) переписать в виде:

$$I_k \sim a_0 * I_э + I_{k0}. \quad (5)$$

Здесь предполагается, что  $g_0 = 1$  и  $a_0 = \text{sch}(W / L_p)$ .

Полученное соотношение устанавливает связь выходного тока с током эмиттера, который выступает здесь в качестве параметра. Из (4) и (5) следует, что при  $V_{кб} = 0$   $I_{к0} = 0$ , а  $I_k \sim a_0 * I_э$ . Для компенсации потока дырок из эмиттерного в коллекторный переход на последний необходимо подать напряжение смещения в пропускном направлении. В связи с этим все выходные характеристики при  $I_э$  не равному 0 начинаются в области положительных значений  $V_{кб}$  (рис. 3, кривые 2 и 3). Поскольку  $a_0 \sim 1$ ,  $I_{к0} \ll I_э < i>$ , то из (5) видно, что  $I_k$   $I_э$  и фактически не зависит от  $V_{кб}$  в области его отрицательных значений. При достаточно больших обратных смещениях на коллекторном переходе в нем развивается обычно лавинный пробой и на выходной характеристике появляется участок резкой зависимости  $I_k$  от  $V_{кб}$  (рис. 3). Большой ток может протекать через транзистор и в случае прокола базы, когда эмиттерный и коллекторный переходы сомкнутся за счет расширения ООЗ последнего при увеличении  $V_{кб}$ .

## Схема с общим эмиттером

На практике довольно часто используются транзисторы, включенные по схеме с общим эмиттером (рис. 4).

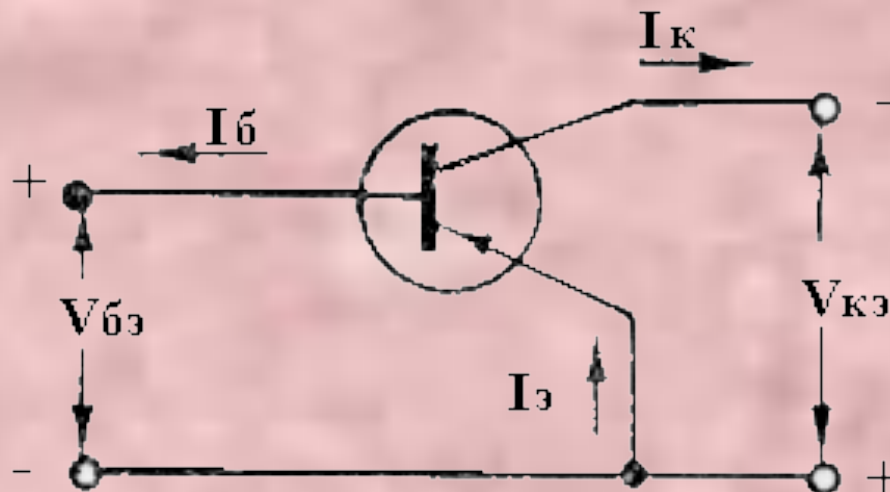


Рис. 4 Схема с  
общим эмиттером

В этой схеме входным является ток базы, а выходным, как и в предыдущем случае, ток коллектора. В соответствии с определением коэффициента передачи тока для схемы с общим эмиттером будем иметь  $h_{21э} * B_0 = dI_к / dI_б$ , но  $I_б = I_э * I_к$ , и, следовательно,  
$$B_0 = dI_к / (dI_э - dI_к) = a_0 / (1 - a_0) . (6)$$

Отсюда видно, что  $B_0$  должен быть значительно больше  $a_0$ . Действительно, при  $a_0=0,95$   $B_0=19$ . Поскольку рассматриваемая схема включения транзистора отличается от схемы с общей базой только тем, что вместо базы заземляется эмиттер, то для описания входных и выходных характеристик можно воспользоваться соотношениями, полученными в предыдущем разделе.

Исходя из этого, для тока базы с учетом (5) можно записать

$$I_B = I_E - I_K = (1 - a_0) * I_E - I_{K0}. \quad (7)$$

Поскольку при выводе (5) мы полагали, что  $a_0 = b_0 = dI_{PK} / dI_{PE}$ , то первая составляющая тока в (7) обусловлена электронами, входящими в базу транзистора для компенсации их потерь на рекомбинацию с инжектированными из эмиттера дырками. Вторая составляющая тока связана с электронами, которые выбрасываются в базу обратносмещенным коллектором, частично компенсируя потери на рекомбинацию. Электронный ток через эмиттер при записи выражений (5) и (7) не учитывался. Анализ общего вида входных характеристик, представляющих собой зависимость  $I_B$  от  $V_{BE}$  при фиксированных значениях  $V_{KE}$ , проведем на основе выражения (7), учитывая, что  $V_{KE} = V_{KB} - V_{BE}$ .

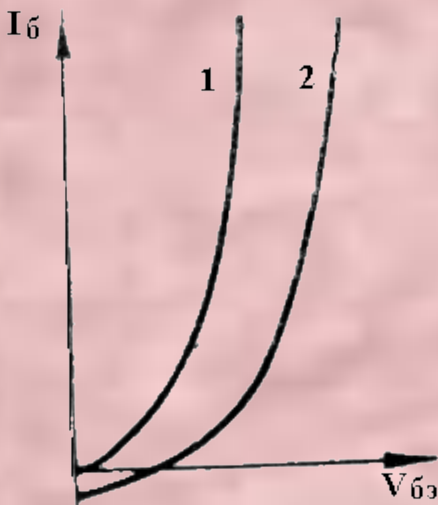
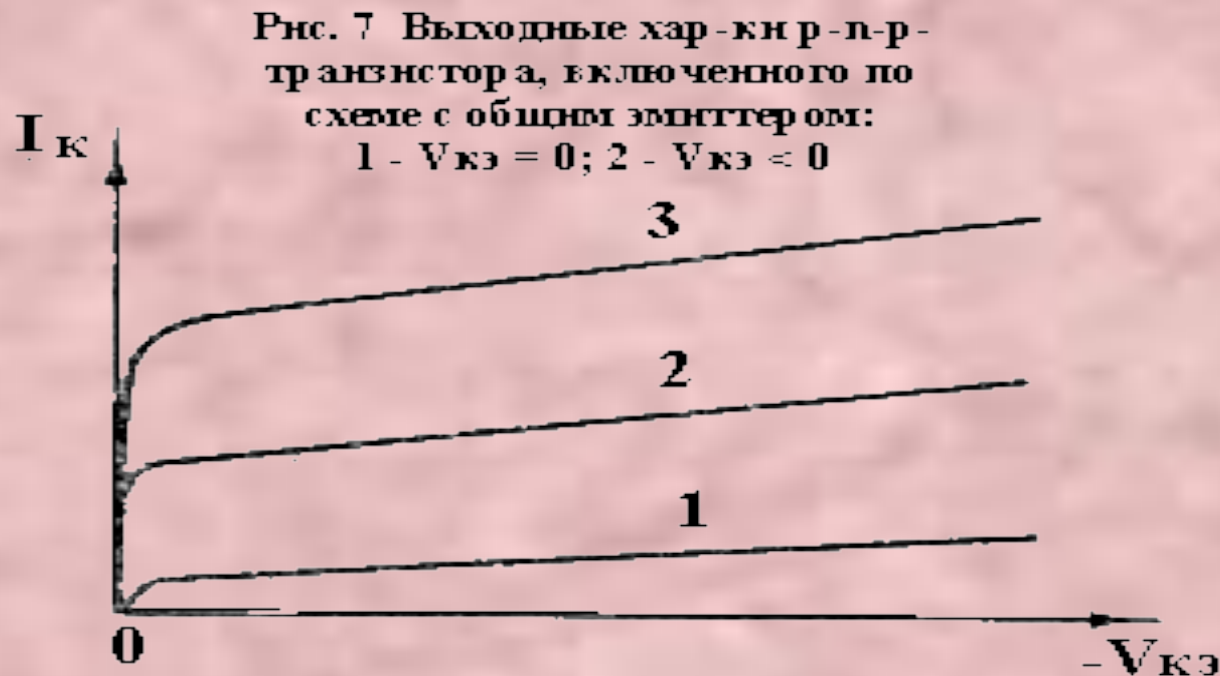


Рис. 5 Входные хар-ки р-п-р транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:  
1 -  $V_{KE} = 0$ ; 2 -  $V_{KE} < 0$

Если  $V_{кэ}=0$ , то входная характеристика должна изображаться кривой, выходящей из начала координат (рис. 5, кривая 1), так как при  $V_{бэ} = 0$   $V_{бк}$  и  $I_{к0}$  также равны нулю. При  $V_{кэ} < 0$  и  $V_{бэ} = 0$  коллектор должен быть смещен в запиорном направлении. Тогда при  $V_{бэ} = 0$   $I_{б} = -I_{к0}$ , то есть начало входной характеристики располагается в области отрицательных значений тока (рис. 5, кривая 2). В целом ход зависимости  $I_{б}$  от  $V_{бэ}$  определяется эмиттерным током  $(I_{э} \exp(q * V_{бэ} / k * T) - 1)$ , и по своей форме входные характеристики подобны вольтамперной характеристике  $p-n$ -перехода, смещенного в пропускном направлении. Подставляя в (5) вместо  $I_{э}$  сумму  $I_{к} + I_{б}$ , после несложных преобразований получим

$$I_{к} = B0 + I^{*}k0, (8)$$

где  $I^{*}k0 = I_{к0} / (1 - a0)$ . На основе этого выражения можно провести качественный анализ выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 6).



Прежде всего из (8) следует, что при разомкнутом входе ( $I_B = 0$ ) ток через коллекторный переход значительно больше, чем в схеме с общей базой, то есть  $I_{C0} \gg I_{B0}$ . Для поддержания базового тока постоянным при любом  $V_{КЭ}$  необходимо зафиксировать значение  $V_{БЭ}$ . Но тогда  $V_{КЭ} \sim V_{КБ} - V_{БЭ}$  может обратиться в нуль только в том случае, если коллекторный переход сместится в пропускном направлении. В этой ситуации и эмиттерный, и коллекторный переходы инжектируют дырки а базу транзистора навстречу друг другу и при  $V_{КЭ} = 0$  ток коллектора при любом фиксированном значении  $I_B$  принимает нулевое значение (рис. 6). При перемещении вдоль выходной характеристики в сторону увеличения тока падение напряжения на коллекторном переходе  $V_{КБ}$  в области малых значений  $V_{КЭ}$  положительно, затем переходит через нуль, меняет знак на противоположный и непрерывно увеличивается. По мере увеличения  $V_{КБ}$ , за счет расширения ООЗ коллекторного перехода уменьшается ширина базы транзистора и, следовательно, увеличивается  $\alpha_0$ . Это приводит к существенному росту  $V_0$  [см. (6)] и  $I_k$  [см. (8)] при увеличении  $V_{КЭ}$  (рис. 6).

# Схема с общим коллектором

В этой схеме включения так же, как и в предыдущем случае, управляющим (или входным) является ток базы, но роль выходного играет ток эмиттера (рис. 7). Коэффициент передачи тока

$$\beta_0^* = dI_3 / dI_6 = 1 / (1 - \alpha_0). \quad (9)$$

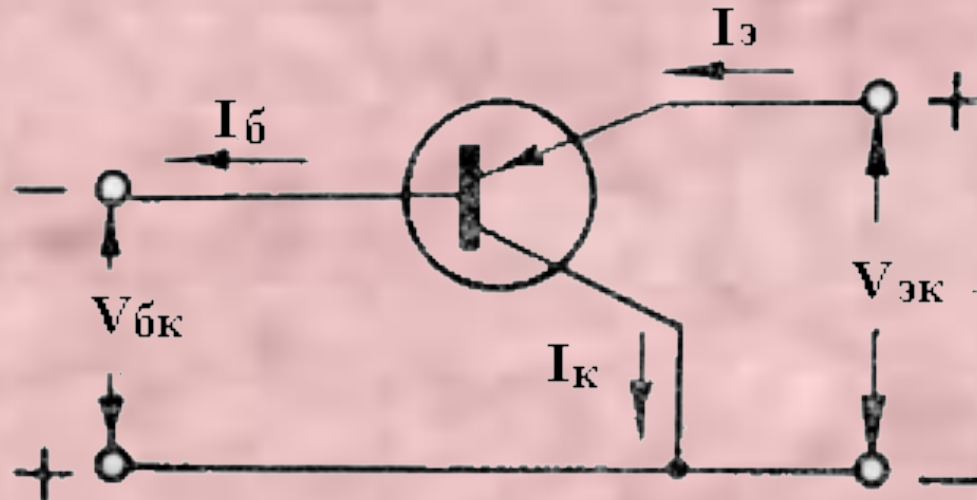


Рис. 7 Схема с  
общим коллектор ом

Поскольку  $\alpha_0 \sim 1$ , то  $\beta_0 \gg 1$ . Входной ток в данном случае практически не зависит от входного напряжения. Выходной ток  $I_3 = I_6 + I_k$  или с учетом (8)

$$I_3 = \beta_0 I_6 + I_{k0} \quad (10)$$

то есть выходные характеристики подобны характеристикам транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Из (10) видно, что выходной ток ( $I_3$ ) значительно больше входного ( $I_6$ ), а падения напряжения на входе и выходе примерно одинаковы ( $V_{бк} \approx V_{эк}$ ). Отсюда следует, что транзистор, включенный по схеме с общим коллектором, обладает высоким сопротивлением на входе и малым на выходе. Это свойство транзистора используется для согласования схем с различными сопротивлениями.

# Влияние температуры на характеристики транзисторов

Существенным недостатком транзисторов является зависимость их характеристик от изменения температуры, или температурная нестабильность.

При повышении температуры увеличивается электропроводность полупроводников и токи в них возрастают. В наибольшей степени возрастает обратный ток  $p$ - $n$  перехода (начальный ток коллектора). Это приводит к изменению характеристик  $p$ - $n$  перехода.

Схемы с общей базой и общим эмиттером имеют различные значения обратного тока  $I_{кбо}$ . С увеличением температуры  $T$  обратные токи возрастают, но соотношение между ними остается постоянным (рис. 1 а).

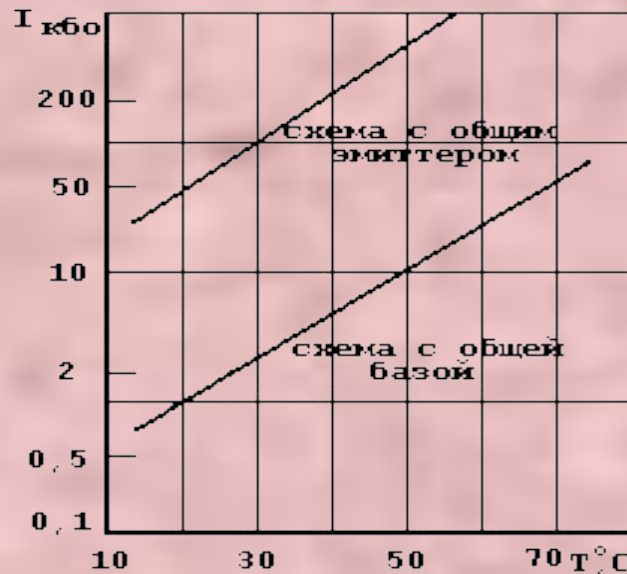


рис. 1 а

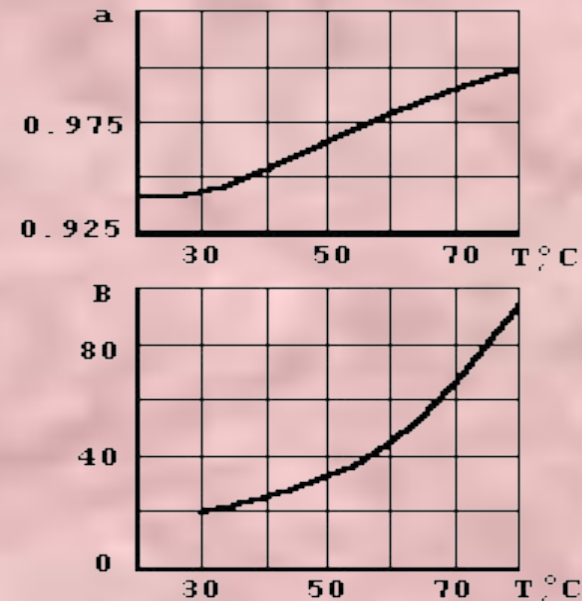


рис. 2 б

Одновременно температурные изменения оказывают влияние на величину коэффициентов передачи тока ***a*** и ***B*** (рис. 1 б). С физической точки зрения изменения этих параметров определяется комплексом факторов, среди которых в первую очередь необходимо отметить изменение концентрации носителей и диффузионной длины, влияние центров захвата.

Изменение обратных токов и коэффициентов усиления приводит к смещению входных и выходных характеристик транзисторов, что может привести к нарушению его нормальной работы или схемы на его основе.

Сравним влияние изменения температуры на выходные и входные характеристики для схем с общей базой и общим эмиттером. Используем выражение:

$$I_k = aI_э + I_{кбо} \quad (1)$$

Относительное изменение ***I<sub>k</sub>*** можно найти, продифференцировав (1):

$$dI_k/I_k = (I_э/I_k)da + dI_{кбо}/I_k = da/a + (I_{кбо}/I_k)*(dI_{кбо}/I_k)$$

Соотношение между относительными изменениями тока ***I<sub>k</sub>*** в схеме с общим эмиттером и общей базой следующее:

$$(dI_k/I_k)_{оэ} = (1 + B)*(dI_k/I_k)_{об}$$

Это означает, что характеристики в схеме с общей базой более стабильны к изменению температуры, чем в схеме с общим эмиттером.

На (рис.2) приведена выходная и входная характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером при различных температурах:

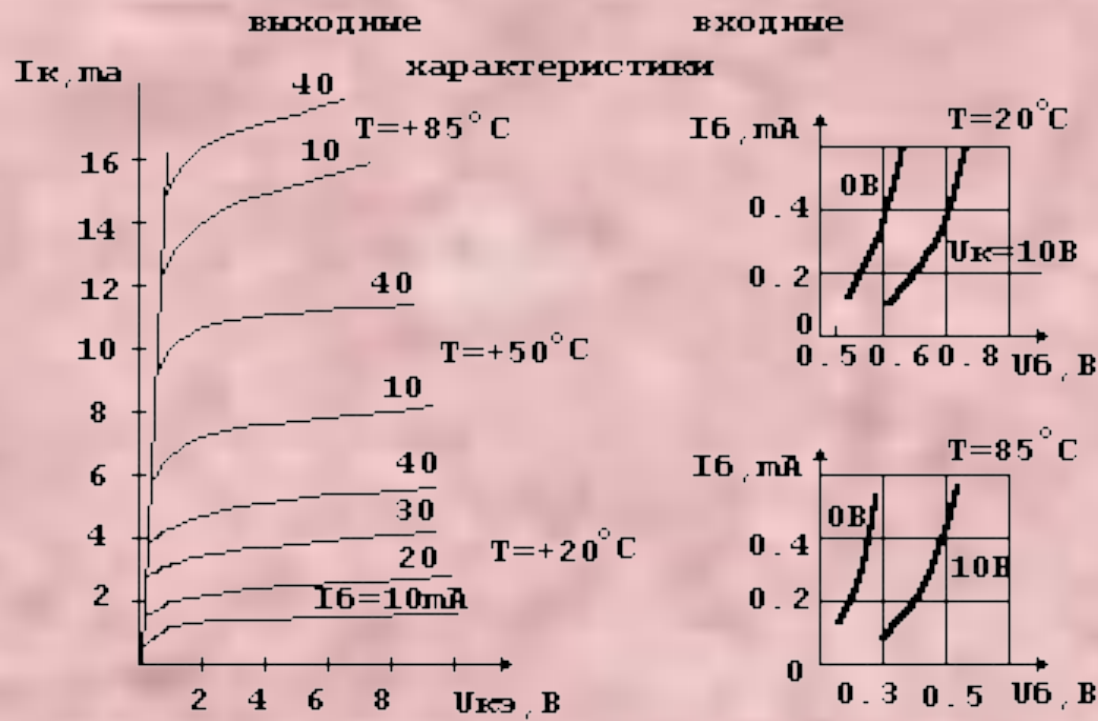


рис . 2

При работе транзисторов необходимо знать допустимые пределы или диапазоны изменения температуры окружающей среды и самих приборов, при которых гарантируется их надёжная работа. Для характеристики этих режимов вводятся тепловые параметры транзисторов, которые указываются в их паспортных данных.

При увеличении температуры транзистора возрастает максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе. Для определения зависимости между рассеиваемой мощностью и температурой кристалла используют зависимость:

$$T_n = T_{корп} + P * R_t,$$

где  $T_n$ ,  $T_{корп}$  - температуры  $p-n$  перехода и корпуса;  $P$  - мощность, рассеиваемая на переходе;  $R_t$  - тепловое сопротивление переход - окружающая среда, которое показывает на сколько градусов повысится температура перехода относительно окружающей среды при рассеивании на переходе заданной мощности; его величина приводится в справочниках по транзисторам.

Для транзисторов большой мощности, в которых применяются теплоотводы, вместо величины  $R_t$  используется тепловое сопротивление переход - корпус. Эти формулы применимы для определения средней температуры транзисторов. При работе в импульсных режимах могут возникать мгновенные значения температуры, значительно превышающие средние значения, поэтому для транзисторов устанавливается величина допустимого мгновенного значения температуры.

# Емкости транзистора

При рассмотрении схемы замещения транзистора было установлено, что его  $p-n$  переходы имеют емкости, которые в схеме замещения учтены конденсаторами  **$C_{э}$**  (емкость эмиттерного перехода) и  **$C_{к}$**  (емкость коллекторного перехода), причем эти емкости шунтируют сопротивление эмиттера  **$R_{э}$**  и коллектора  **$R_{к}$** . С увеличением рабочей частоты емкостные сопротивления эмиттера и коллектора уменьшаются и их шунтирующее действие возрастает.

Исследование этих емкостей необходимо для изучения свойств транзисторов, работающих на высоких и сверхвысоких частотах. При рассмотрении емкости  $p-n$  перехода было установлено, что она складывается из барьерной емкости  **$C_{б}$** , зависящей от объемного заряда в области  $p-n$  перехода, и из диффузионной  **$C_{д}$** , зависящей от тока диффузии и времени жизни носителей. Выражения, выведенные для расчета емкости  $p-n$  перехода диодов, могут быть использованы при рассмотрении транзисторов. Для суммарных емкостей  **$C_{к}$**  и  **$C_{э}$**  имеем

$$C_{к} = C_{кб} + C_{кд}, \quad C_{э} = C_{эб} + C_{эд},$$

где  **$C_{кб}$** ,  **$C_{эб}$**  - барьерные емкости коллекторного и эмиттерного переходов;  **$C_{кд}$** ,  **$C_{эд}$**  - диффузионные емкости коллекторного и эмиттерного переходов.

Диффузионная емкость коллекторного перехода обусловлена приращением заряда неравновесных носителей в базе, вызываемым модуляцией толщины базы. Для большинства транзисторов выполняется соотношение  $C_{кб} \gg C_{кд}$ , поэтому емкость коллектора принимаем равной барьерной  $C_{кб} = C_{кб}$ . Для ее определения имеем формулу

$$C_{кб} = S_{кб} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 q N_d}{2(\Delta Y - U_{кб})}}$$

Аналогично для эмиттерного перехода получаем значение

$$C_{эб} = S_{эб} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 q N_d}{2(\Delta Y - U_{эб})}}$$

Наряду с барьерной емкостью в транзисторе имеет место диффузионная емкость, обусловленная изменением заряда неравновесных носителей при приращении напряжения на эмиттерном переходе (при постоянном коллекторном напряжении):

$$C_{эд} = \frac{dQ}{dU_{эб}}$$

Величина заряда **Q** определяется соотношением

$$Q = \frac{I_{\text{э}} w^2}{2 D_{\text{pn}}}$$

Тогда

$$C_{\text{эА}} = \frac{w^2}{2 \tau_{\text{э}} D_{\text{pn}}} = \frac{t_{\text{D}}}{\tau_{\text{э}}}$$

где  **$t_{\text{D}}$**  - среднее время диффузии.

Емкость  **$C_{\text{эА}}$**  значительно превышает  **$C_{\text{кД}}$** , так как приращение  **$U_{\text{эБ}}$**  влияет непосредственно на величину заряда, а приращение  **$U_{\text{кБ}}$**  влияет на заряд косвенно благодаря модуляции толщины базы.

# Работа транзистора на высокой частоте.

Свойства транзистора на высоких частотах удобно анализировать по рассмотренной схеме замещения. На работу Б.Т. вредное влияние оказывает емкостное сопротивление коллекторного перехода **Ск**. На низких частотах емкостное сопротивление этого перехода ( $1 / W C_k$ ) велико. Велико и сопротивление **rk**; поэтому весь ток эквивалентного генератора  $I_g = a I_b$  идет через нагрузку, роль которой выполняет резистор **Rн**.

С повышением частоты сопротивление  $1 / W C_k$  начинает уменьшаться и при некоторой частоте часть тока, создаваемого генератором, начинает отделяться в емкость **Ск** и ток через **rn** начинает падать. Это явление равносильно уменьшению коэффициента усиления транзистора, т.к. полезная выходная мощность уменьшается с уменьшением тока нагрузки. Следовательно с увеличением частоты уменьшается коэффициенты усиления  $\alpha$  и  $\beta$ .

С увеличением частоты сопротивление  $1 / W C_{\epsilon}$  также уменьшается, но влияние **Сэ** не проявляется так сильно, как влияние **Ск**. Это объясняется тем, что емкость **Сэ** зашунтирована **re** (сопротивление эмитторного перехода), имеющим очень малую величину. Сопротивление  $1 / W C_{\epsilon}$  начинает оказывать влияние на очень высоких частотах, где оно становится соизмеримым с **re**. На этих частотах транзистор обычно не работает, т.к. емкость **Ск** почти полностью шунтирует генератор тока **Ig**. Следовательно влиянием **Сэ** можно пренебречь.

Вторая причина, вызывающая уменьшение коэффициента усиления, является инерционность процесса перемещения носителей через базу от эмиттерного перехода к коллекторному в результате чего появляется запаздывание по фазе между изменением величин  $I_{\text{э}}$  и  $I_{\text{к}}$ . Это запаздывание определяется временем переноса неосновных носителей через базу и зависит от её толщины.

Частота на которой модуль коэффициента передачи, а уменьшается в корень из двух раз по сравнению с его значением на низкой частоте, называется граничной частотой  $f_{\text{гп}}$ . Величина  $f_{\text{гп}}$  для схемы с О.Б. определяется из соотношения  $f_{\text{гп}} = \pi / t_D$ , где  $t_D = W * W / 2D_p$  - среднее время диффузии носителей.

Коэффициент передачи тока эмитера а зависит от частоты следующим образом

$$a(iW) = a_0 / (1 + iW / Wa),$$

где  $Wa = 2\pi * f_{\text{гп}}$  - угловая граничная частота,  $i$ - мнимая единица.

Комплексное число, стоящее в знаменателе указывает, что изменение коэффициента передачи определяется физическими процессами, эквивалентными изменению комплексного (емкостного) сопротивления.

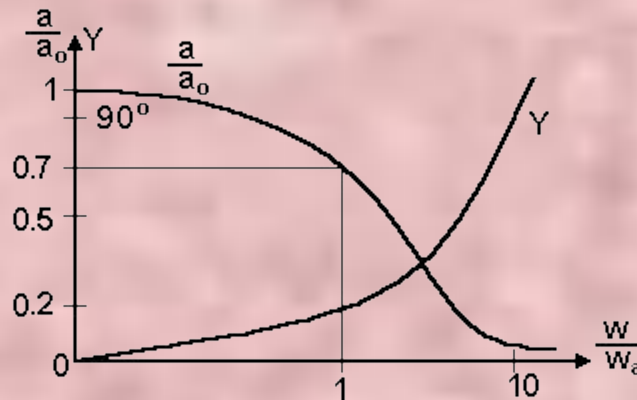
Модуль коэффициента передачи зависит от угловой частоты  $W = 2\pi f$  следующим образом:

$$a(w) = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{W}{W_a}\right)^2}}$$

Угол запаздывания по фазе между эмиттерным и коллекторным токами можно определить как

$$Y(a) = - W / Wa$$

Чтобы охарактеризовать частотные свойства транзистора широко используются частотные характеристики; представляющие собой зависимость модуля коэффициента передачи  $a$  от частоты ( $AЧХ$ ) и фазы  $Y(a)$  ( $ФЧХ$ ) (рис.1). С увеличением частоты  $W$  увеличивается сдвиг по фазе  $Y$ , обусловленный влиянием инерционных процессов при прохождении неосновных носителей через базу; и в конечном счете уменьшается коэффициент  $a$ . В схеме с общим эмитером величина коэффициента передачи тока базы в более сильной степени зависит частоты, что приводит к уменьшению граничной частоты в схеме с ОЭ.



Уменьшение коэффициента  $a$  происходит в результате того, что с повышением частоты ток коллектора отстает от тока эмиттера. Граничные частоты для схемы с ОБ и ОЭ связаны формулой:

$$WБ = W * (1 - a_0) = W_a / (1 + B_0),$$

где  $B$  - модуль коэффициента передачи тока базы при  $W = 0$ . Граничная частота в схеме с ОЭ в  $1 + B_0$  раз меньше чем в схеме с ОБ.

# Динамический режим работы транзистора

При работе транзистора с нагрузкой имеет место взаимное влияние друг на друга токов  $I_э$ ,  $I_к$ ,  $I_б$ .

Этот режим носит название **динамического**, а его характеристики - **динамических**.

Рассмотрим динамический режим транзистора, работающего по схеме с ОЭ (рис. 1). При работе транзистора совместно с нагрузкой  $R_н$ , включенной в цепь коллектора, напряжение источника питания  $E_к$  распределяется между нагрузкой и переходом коллектор - эмиттер ( $U_{кэ}$ ):  $E_к = U_{кэ} + I_к * R_н$ , поэтому ток коллектора изменяется по линейному закону в соответствии с выражением  $I_к = (E_к - U_{кэ}) / R_н$ . Графическая зависимость  $I_к = f(U_{кэ})$  представляет собой прямую линию, которая называется нагрузочной прямой. Для исследования свойств транзистора нагрузочную кривую наносят на семейство выходных характеристик (рис. 1б). Точка пересечения нагрузочной прямой с осью токов совпадает с точкой, для которой удовлетворяется условие  $I_к * R_н = E_к$ .

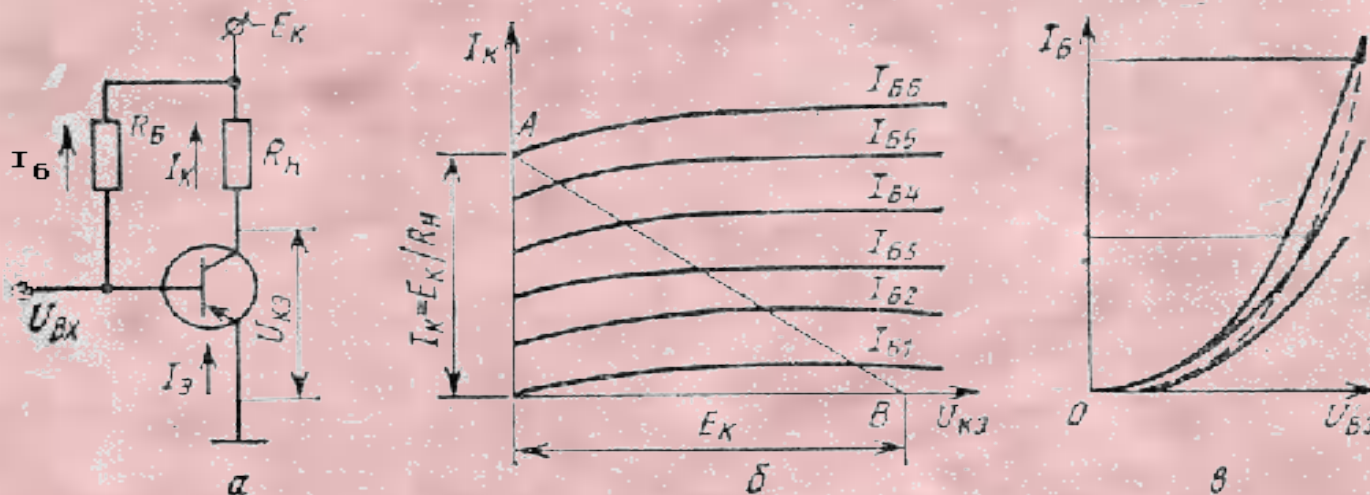


рис. 1

а-схема включения    б-динамическая характеристика в семействе статистических  
выходных характеристик    в-входная динамическая характеристика

Входная динамическая характеристика представляет собой зависимость входного тока от входного напряжения в динамическом режиме (*рис. 1в*). На этой характеристике штриховой линией нанесена входная динамическая линия нагрузки, которая строится по точкам пересечения выходных динамических характеристик с нагрузочной прямой.

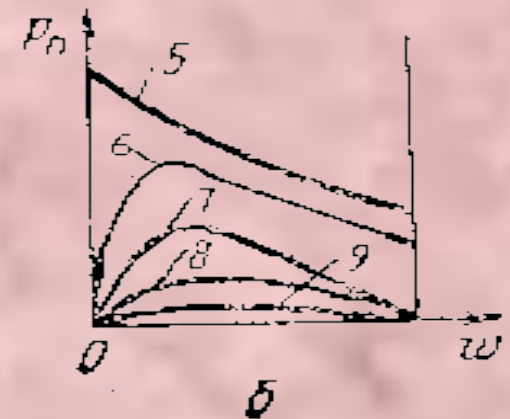
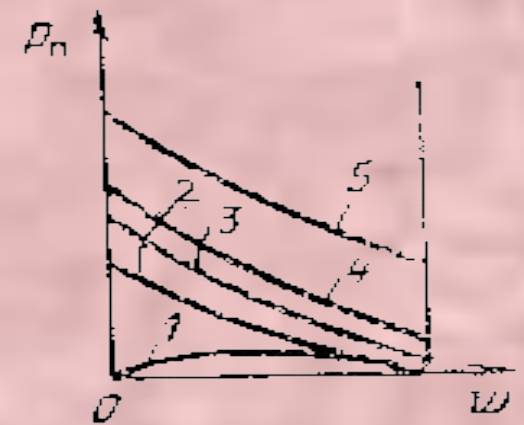
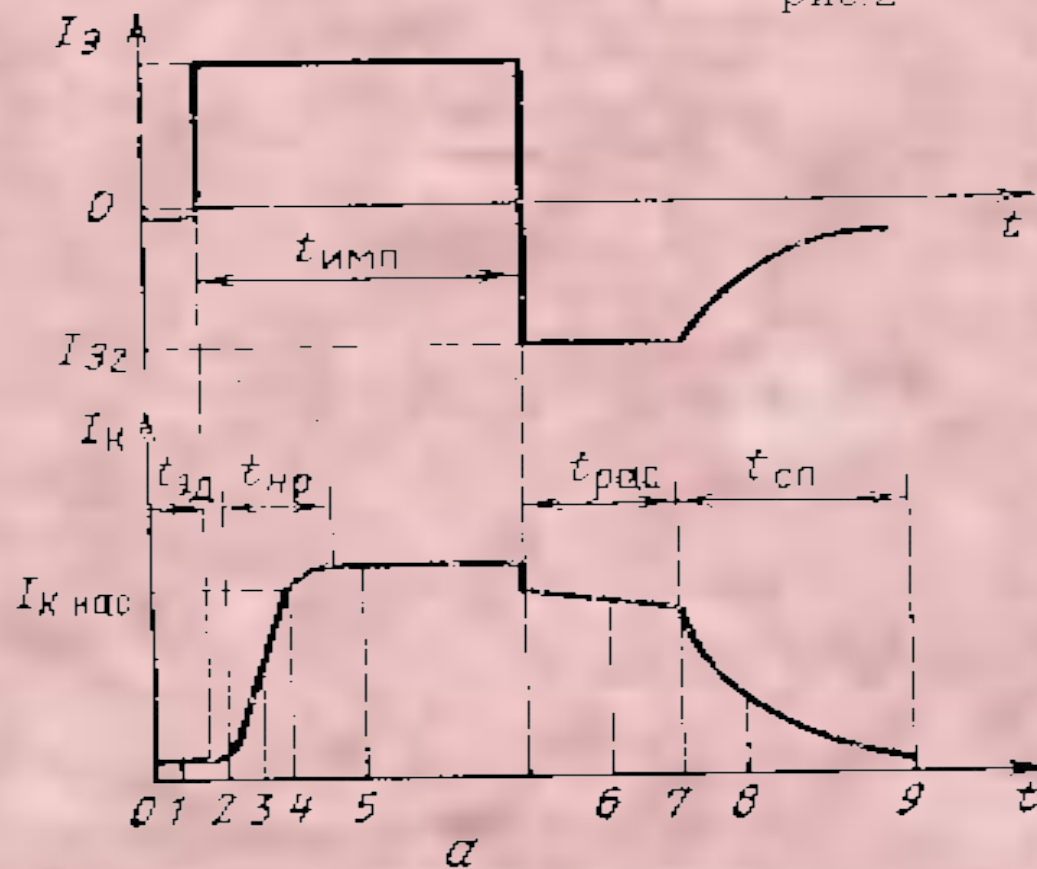
## Работа транзистора в импульсном режиме

Работа транзистора в качестве усилителя малых импульсных сигналов в принципе ничем не отличается от работы транзистора как усилителя малых синусоидальных сигналов. Импульс можно в виде суммы ряда гармонических составляющих и, зная частотные свойства транзистора, определить искажения формы импульса, которые могут происходить при усилении. Особый режим работы имеет место в том случае, когда рабочая точка перемещается в значительной области в значительной области выходных характеристик от одного края области к другому. Транзистор может при этом работать в трёх основных режимах (*рис. 1б*):

- 1.Режим насыщения** (точка А). В этом режиме транзистор полностью открыт и протекающий ток равен максимальному значению:  $I_k = E_k / R_n$ .
- 2.Режим отсечки** (точка В). В этом режиме транзистор заперт и ток его близок к нулю.
- 3.Активный режим** - режим работы транзистора, при котором транзистор обладает активными свойствами, т.е способен обеспечивать усиление по мощности. В этом режиме рабочая точка лежит между точками А и В.

Скорость перехода транзистора из открытого состояния в закрытое и обратно главным образом зависит от переходных процессов в базе, связанных с накоплением и рассасыванием неравновесных носителей зарядов. На вход транзистора подаётся управляющий сигнал в виде скачков напряжения, замыкающих и размыкающих транзисторный ключ. Рассмотрим процессы, происходящие в транзисторе, включённом по схеме с ОБ при подаче через эмиттер импульса длительностью ***t<sub>имп</sub>***, в прямом направлении с последующим изменением полярности (*рис. 2а*). В исходном состоянии транзисторный ключ заперт, т.е. эмиттерный и коллекторный переходы заперты, и транзистор работает в режиме отсечки. После подачи через эмиттер импульса в прямом направлении ток коллектора появляется не сразу из-за конечного времени пролета инжектированных носителей до коллекторного перехода и наличия барьерных емкостей (*рис. 1а*). Время, на которое появление коллекторного тока отстает от эмиттерного, называют временем задержки ***t<sub>зд</sub>***. Процесс установления тока коллектора характеризуется временем нарастания ***t<sub>нр</sub>***. Это время затрачивается на диффузионное перемещение через базу инжектированных в неё носителей. Следует заметить, что ***t<sub>зд</sub>*** относительно мало и во многих случаях при приближенных расчетах им пренебрегают.

рис. 2



Временные зависимости тока базы и тока коллектора при включении по схеме с ОБ (а) распределение носителей в базе транзистора (б)

При  $I_B > 0$  с увеличением эмиттерного тока быстро возрастает и коллекторный ток  $I_K$  - это активный режим работы транзистора. Наконец, когда рабочая точка на нагрузочной характеристике достигает точки перегиба статических выходных характеристик, дальнейшее увеличение тока  $I_B$  не вызывает роста коллекторного тока  $I_K$ , транзисторный ключ полностью открылся и транзистор работает в режиме насыщения.

Через интервал времени, равный  $t_{имп}$  меняется полярность напряжения, подаваемого на эмиттер. При этом транзистор в течение некоторого времени  $t_{рас}$  (время рассасывания) продолжает находиться в режиме насыщения.

Рассасывание заряда происходит вследствие ухода дырок из базы через коллекторный и эмиттерный переходы. До тех пор пока в процессе рассасывания концентрации неосновных носителей около  $p$ - $n$  переходов не достигнут нуля, обратные токи через соответствующие  $p$ - $n$  переходы будут оставаться постоянными, т.е токи эмиттера и коллектора будут неизменными, пока транзистор находится в режиме насыщения. В момент времени  **$t_{pac}$**  избыточная концентрация неосновных носителей в базе около коллекторного  $p$ - $n$  перехода достигает нуля. С этого момента ток коллектора и ток эмиттера будут уменьшаться. Время рассасывания  $t_{pac}$  определяется как интервал времени с момента выключения входного импульса и связанного с этим изменением направления тока базы до момента, когда концентрация дырок у коллекторного перехода уменьшится до нуля. Величина его зависит от конструкции эмиттера, величины его тока и длительности импульса  **$t_{umп}$** . Для уменьшения  **$t_{pac}$**  на входе цепи в момент окончания действия импульса создают ток обратного направления  **$I_{э2}$** , что ускоряет рассасывание дырок в базе. По истечении времени  **$t_{pac}$** , рабочая точка транзистора переходит на границу активной области и начинается спад выходного тока. Длительность спада  **$t_{сп}$**  определяется как время, в течение которого ток уменьшается от 0,9 до 0,1 тока насыщения.

За время  **$t_{np}$**  в базе транзистора накапливаются неосновные носители, а в процессе рассасывания за время  **$t_{pac}$**  происходит уменьшение неосновных носителей по ширине базы  **$W$**  в соответствии с диаграммами, представленными на (рис.2б).

Физические процессы, протекающие в транзисторе при нарастании и спаде напряжения, иллюстрируются диаграммами распределения неосновных носителей  **$Pn$** , построенными для различных моментов времени 1...9, соответствующих характерным точкам переходного процесса, изображённого на (рис.2б).

# Параметры транзистора как элемента цепи

Транзистор является управляемым элементом цепи. Если на входе транзистора нет управляющего сигнала, то является пассивным элементом. Если к входу транзистора приложено переменное напряжение, то транзистор приобретает свойства активного элемента и отдаёт мощность нагрузке. В усилительном режиме на входе транзистора действует переменное напряжение, поэтому он является активным четырёхполюсником.



Если переменные напряжения на переходах транзистора достаточно малы, токи в нём оказываются линейными функциями этих напряжений. Транзистор можно рассматривать как линейный четырёхполюсник.

Переменные величины  $i_1$ ,  $u_1$ ,  $i_2$ ,  $u_2$ , характеризующие электрические свойства транзистора, взаимно связаны. Если любые две из них заданы, то оставшиеся определяются однозначно по параметрам транзистора. За независимые переменные можно принять две любые из этих величин, а две другие - представить в виде функции независимых переменных.

# Параметры холостого хода (z-параметры)

$$du_1 = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial u_1}{\partial i_2} di_2$$
$$du_2 = \frac{\partial u_2}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial u_2}{\partial i_2} di_2$$

Вводя новые обозначения для частных производных, имеющих размерность сопротивлений, и заменяя дифференциалы токов и напряжений комплексными амплитудами малых переменных сигналов(  $U$  и  $I$  ), получаем:

$$U_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2; (1)$$

$$U_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2, (2)$$

где  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ ,  $Z_{21}$ ,  $Z_{22}$  - характеристические сопротивления транзистора.

*Характеристические сопротивления называют параметрами холостого хода, так как они определяются при условии холостого хода входа или выхода по переменному току т.е при равенстве нулю одного из токов в уравнениях (1) и (2).*

*Входное сопротивление транзистора при холостом ходе на выходе:*

$$Z_{11} = U_1/I_1, \text{ при } I_2 = 0$$

*Сопротивление обратной связи (обратной передачи) при холостом ходе на выходе:*

$$Z_{12} = U_1/I_2, \text{ при } I_1 = 0$$

*Сопротивление прямой передачи (сопротивление усиления) при холостом ходе на выходе:*

$$Z_{21} = U_2/I_1, \text{ при } I_2 = 0$$

*Выходное сопротивление транзистора при холостом ходе на входе:*

$$Z_{22} = U_2/I_2, \text{ при } I_1 = 0$$

*Зависимость z-параметров от режима работы легко выражается аналитически. Недостатком является трудность измерения параметра  $Z_{11}$ , т.е осуществления режима холостого хода по переменному току на выходе, вследствие большого выходного сопротивления*

# Параметры короткого замыкания (у-параметры)

Зависимость токов от напряжения можно записать так ( $I_1$ ,  $U_1$ ,  $I_2$ ,  $U_2$ -комплексные амплитуды малых переменных сигналов):

$$I_1 = Y_{11} U_1 + Y_{12} U_2;$$

$$I_2 = Y_{21} U_1 + Y_{22} U_2,$$

где  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{22}$  - характеристические проводимости четырёхполюсника, которые определяются при условии короткого замыкания входа или выхода транзистора по переменному току.

Входная проводимость при коротком замыкании выхода:

$$Y_{11} = I_1/U_1, \text{ при } U_2 = 0$$

Проводимость обратной связи (обратной передачи) при коротком замыкании входа:

$$Y_{12} = I_1/U_2, \text{ при } U_1 = 0$$

Проводимость прямой передачи (усиления) при коротком замыкании выхода:

$$Y_{21} = I_2/U_1, \text{ при } U_2 = 0$$

Выходная проводимость при коротком замыкании входа:

$$Y_{22} = I_2/U_2, \text{ при } U_1 = 0$$

# Смешанная система параметров (h-параметры)

Выражения для токов и напряжений можно записать так ( $I_1$ ,  $U_1$ ,  $I_2$ ,  $U_2$ -комплексные амплитуды малых переменных сигналов):

$$U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2;$$

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2,$$

где  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  - гибридные (смешанные) параметры четырёхполюсника. В отличие от  $y$ - и  $z$ -параметров  $h$ -параметры имеют различную размерность. Это объясняется тем, что в качестве независимых параметров взяты различные по размерностям величины - входной ток  $I_1$  и выходное напряжение  $U_2$ .

Входное сопротивление:

$$h_{11} = U_1/I_1, \text{ при } U_2 = 0$$

Коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12} = U_1/U_2, \text{ при } I_1 = 0$$

Коэффициент передачи по току (коэффициент усиления):

$$h_{21} = I_2/I_1, \text{ при } U_2 = 0$$

Выходная проводимость:

$$h_{22} = I_2/U_2, \text{ при } I_1 = 0$$

Достоинством системы  $h$ -параметров является лёгкость измерения её параметров.

# Технологические разновидности биполярных транзисторов

Среди многочисленных разновидностей транзисторов наибольшее распространение получили сплавные, сплавно-диффузионные, диффузионно-планарные, мезапланарные и эпитаксиально-планарные транзисторы (рис. 1). Сплавные транзисторы (преимущественно германиевые) изготавливают по сплавной технологии получения  $p$ - $n$ -переходов. Транзисторная структура с двумя близко расположенными  $p$ - $n$ -переходами показана на рис. 2, а одна из наиболее распространенных конструкций сплавного транзистора - на рис. 3 (где 1 - кристалл Ge; 2 - кристаллодержатель; 3 - электрод эмиттера; 4 - электрод коллектора; 5 - базовое кольцо; 6 - корпус; 7 - основание; 8 - выводы). В сплавных транзисторах трудно сделать очень тонкую базу, поэтому они предназначены только для низких и средних частот, их могут выпускать на большие мощности, до десятков ватт. В мощных транзисторах электронно-дырочные переходы выполняют большой площади, вывод коллектора соединяется с корпусом. Основание корпуса для лучшего охлаждения изготавливают в виде массивной медной пластины, которую монтируют на теплоотводе или на шасси электронной схемы. Недостатки сплавных транзисторов - сравнительно невысокая предельная частота **до 20 МГц**, значительный разброс параметров и некоторая нестабильность свойств транзистора во времени. Сплавно-диффузионные транзисторы изготавливают сочетанием сплавной технологии с диффузионной. В этом случае наплавляемая навеска содержит как донорные (сурьма), так и акцепторные (индий) примеси. Навески размещают на исходной полупроводниковой пластине и прогревают. При сплавлении образуется эмиттерный переход. Однако при высокой температуре одновременно с процессом плавления происходит диффузия примесей из расплава в глубь кристалла. Примеси доноров и акцепторов распределяются по толщине кристалла при этом неравномерно, так как разные примеси диффундируют на разную глубину (например, диффузия сурьмы идет скорее, чем индия). В кристаллов результате образуется диффузионный базовый слой  $n$ -типа с неравномерным распределением примесей (получается «встроенное» в базу электрическое поле). Коллектором служит исходная пластинка германия  $p$ -типа. Перенос неосновных носителей через базовую область осуществляется в основном дрейфом во «встроенном» электрическом поле транзисторы поэтому называют дрейфовыми. Толщина базы транзисторов может быть уменьшена до **0,5-1 мкм**. Рабочие частоты достигают **500-1000 МГц**. Широкий диапазон частот является основным достоинством этой разновидности транзисторов. К недостаткам относятся низкие обратные напряжения на эмиттере из-за сильного легирования эмиттерной области, а также трудности в разработке транзисторов на высокие напряжения и большие мощности. В последние годы при изготовлении дрейфовых транзисторов широко используется метод двойной диффузии. В этом случае базовая и эмиттерная области получаются при диффузии примесей  $p$ - и  $n$ -типа в исходную пластинку полупроводника. Такие транзисторы изготавливают в виде планарных структур и меза-структур.

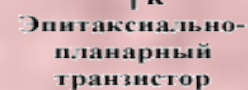
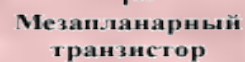
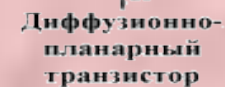
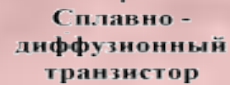
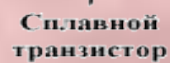
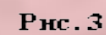
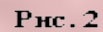


Рис. 1



# Классификация транзисторов

Транзисторы классифицируются по допустимой мощности рассеивания и по частоте. В соответствии с принятой классификацией транзисторы по величине мощности, рассеиваемой коллектором, делятся на транзисторы **малой (Рк 3000 мВт), средней (Рк 1,5 Вт) и большой (Рк 1,5 Вт)** мощности. По значению предельной частоты, на которой могут работать транзисторы, их делят на **низкочастотные (3 МГц), среднечастотные (30 МГц), высокочастотные (300 МГц) и сверхвысокочастотные (> 300 МГц)**. **Низкочастотные маломощные транзисторы** обычно изготавливают методом сплавления, поэтому их называют сплавными. Так как при изготовлении низкочастотных сплавных транзисторов обычно используют равномерно легированный исходный материал, то при малых токах электрическое поле в области базы таких транзисторов отсутствует и по механизму движения носителей они относятся к бездрейфовым. К **высокочастотным** относят транзисторы с рабочими частотами **свыше 30 МГц**. Для обеспечения работы транзистора на таких частотах требуется уменьшить время пролета носителей через базу и область объемного заряда коллектора, уменьшить барьерные емкости и объемные сопротивления базы и коллектора. Выполнить все это на основе сплавной технологии невозможно. Основным методом изготовления высокочастотных транзисторов является диффузия примесей, такие транзисторы поэтому часто называют диффузионными. При диффузии примеси в базе распределяются неравномерно, там создается электрическое поле. Следовательно, по механизму движения носителей диффузионные транзисторы могут относиться к дрейфовым.

Классификация транзисторов отражена в их обозначениях.

В соответствии с *ГОСТ 10862-72* транзисторам присваиваются обозначения, состоящие из четырех элементов:

**Первый элемент** - буква или цифра, обозначающая исходный материал: Р или 1 - германий; К, или 2 - кремний; А или 3 - арсенид галлия.

**Второй элемент** - буква Т для биполярных транзисторов, бук-ва П-для униполярных (полевых) транзисторов.

**Третий элемент** обозначения транзисторов определяет их классификацию подгруппам рассеиваемых мощностей (малая, средняя, большая) и граничной частоте **f<sub>гр</sub>** коэффициента передачи тока.

**Четвертый и пятый элементы** определяют порядковый номер разработки технологического типа прибора и обозначаются от 01 до 99.

**Примеры обозначений:**

2Т144А - транзистор кремниевый, малой мощности, **f<sub>гр</sub> не более 3 МГц**, номер разработки 44, группа А.

КТ605А - транзистор германиевый, средней мощности, **f<sub>гр</sub> не более 30 МГц**, номер разработки 05, группа А.