

# Circuite și Dispozitive Electronice

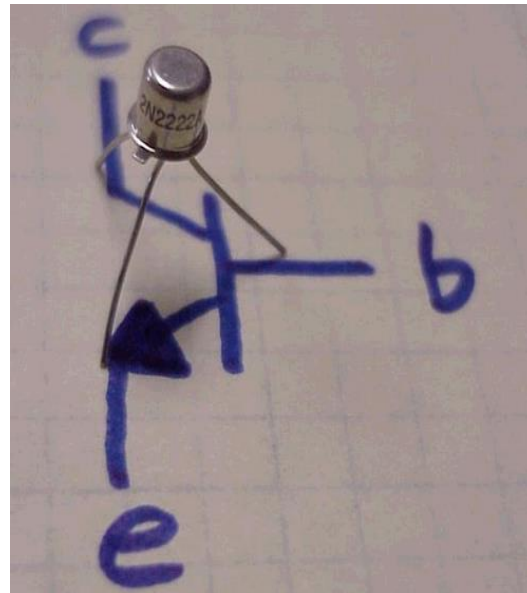
## Электронные Цепи и Устройства

Тема 4 – Биполярные транзисторы. Типы. Характеристики.  
Соединения. Использование.

**Цель:** познакомиться с видами и обозначениями биполярных транзисторов. Принцип действия. Эквивалентные схемы для анализа биполярных транзисторов постоянного тока. Монтаж на биполярных транзисторах. Статические характеристики биполярного транзистора. Цепи поляризации. Нелинейные методы стабилизации статической рабочей точки.

Биполярный транзистор - это активное электронное устройство с тремя выводами: эмиттер (E), база (B) и коллектор (C). Эти три вывода размещены на трех полупроводниковых областях с различной проводимостью (р или n) одного и того же полупроводникового кристалла (обычно германий-Ge или кремний-Si). Название биполярный транзистор происходит от следующей характеристики: проводимость обеспечивают два типа носителей заряда разной полярности (электроны и дырки).

Уильям Шокли - американский физик, лауреат Нобелевской премии 1956 г. вместе с Дж. Бардином и У. Х. Браттейном. Они разработали транзисторную технологию.

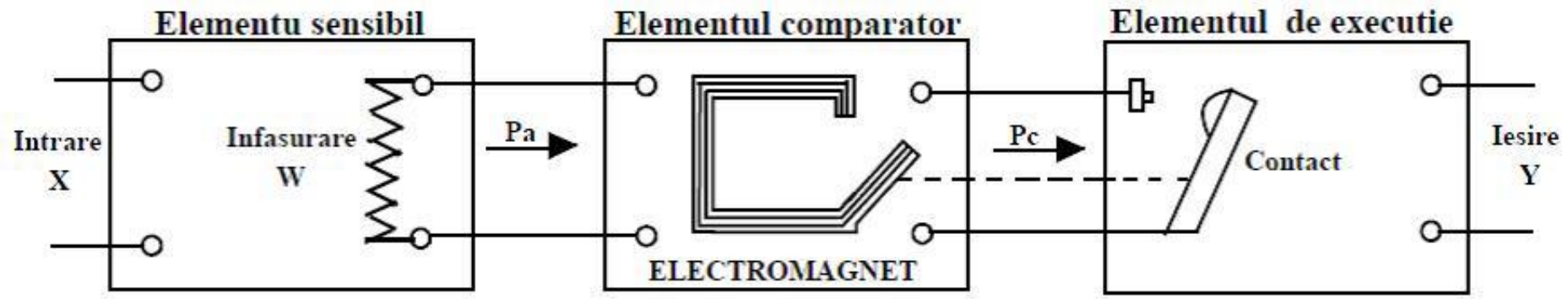
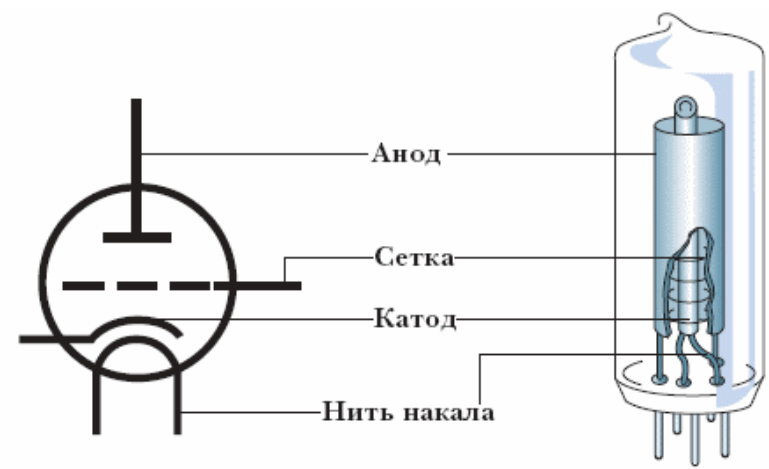
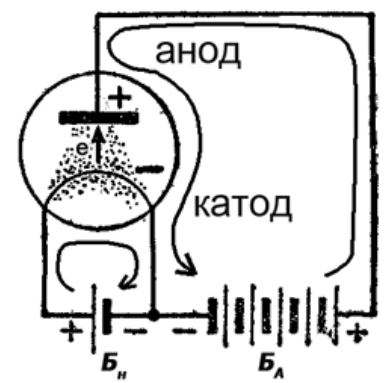




## Электрoвакуумный Диод

в прямом включении

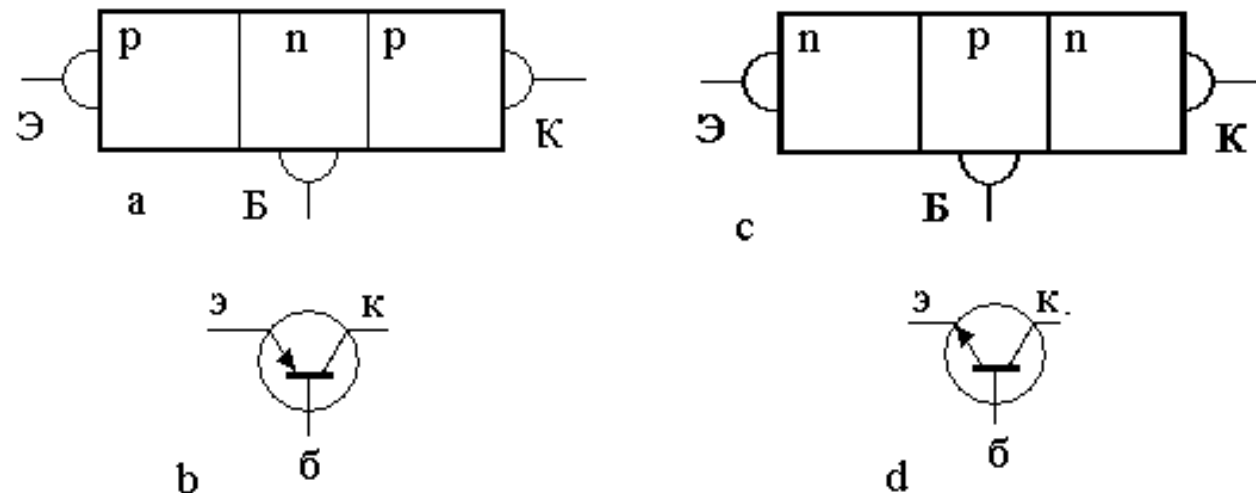
в обратном включении



# Общие сведения

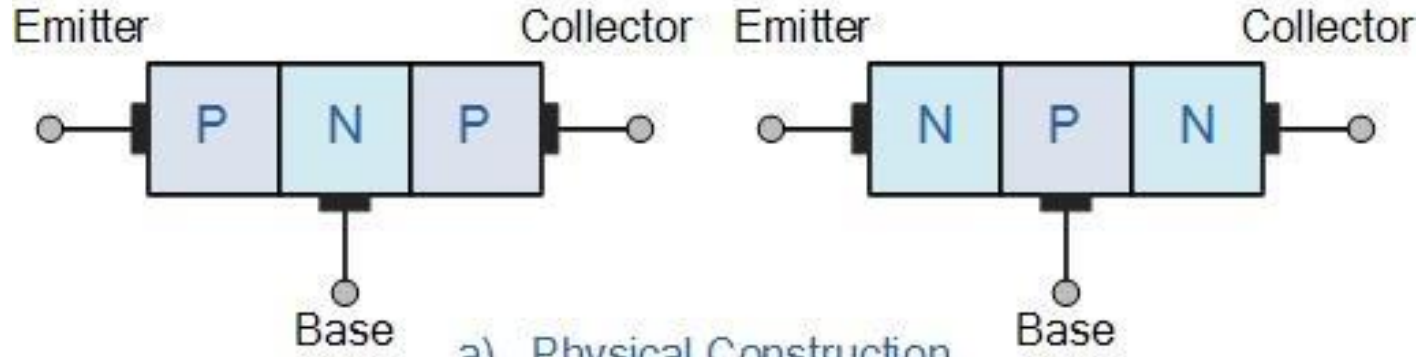
**Биполярный транзистор** – совокупность двух взаимосвязанных р-п-переходов, состоящий из трёх областей с чередующимися типами электропроводности, пригодный для усиления мощности.

Различают транзисторы **прямой проводимости (р-п-р)** и **обратной (п-р-п)**.

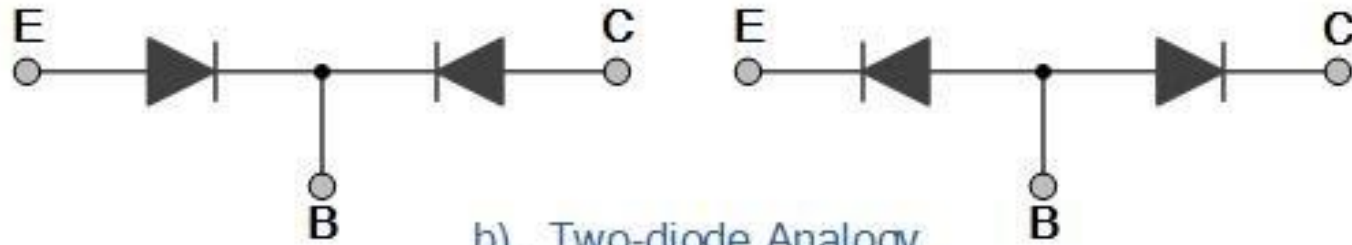


### PNP Transistor

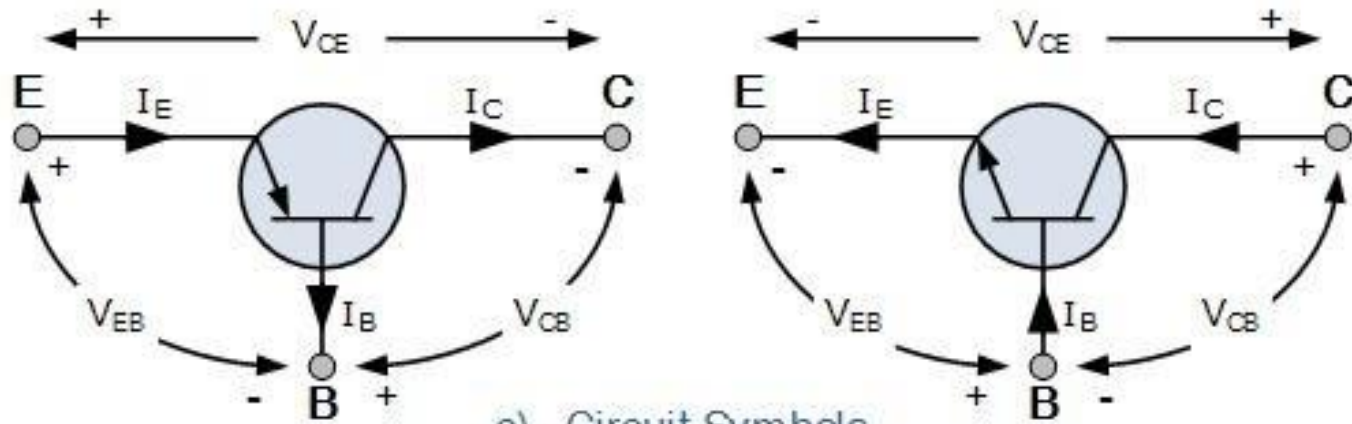
### NPN Transistor



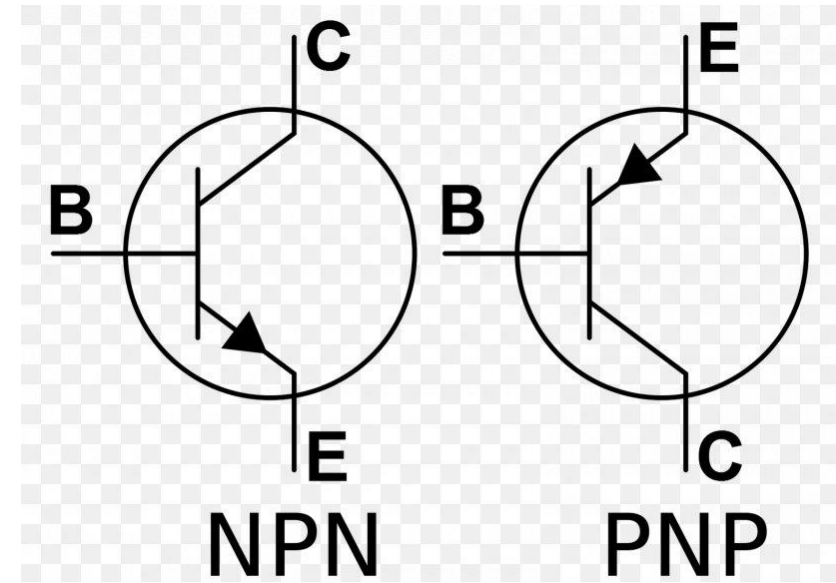
a). Physical Construction



b). Two-diode Analogy



c). Circuit Symbols

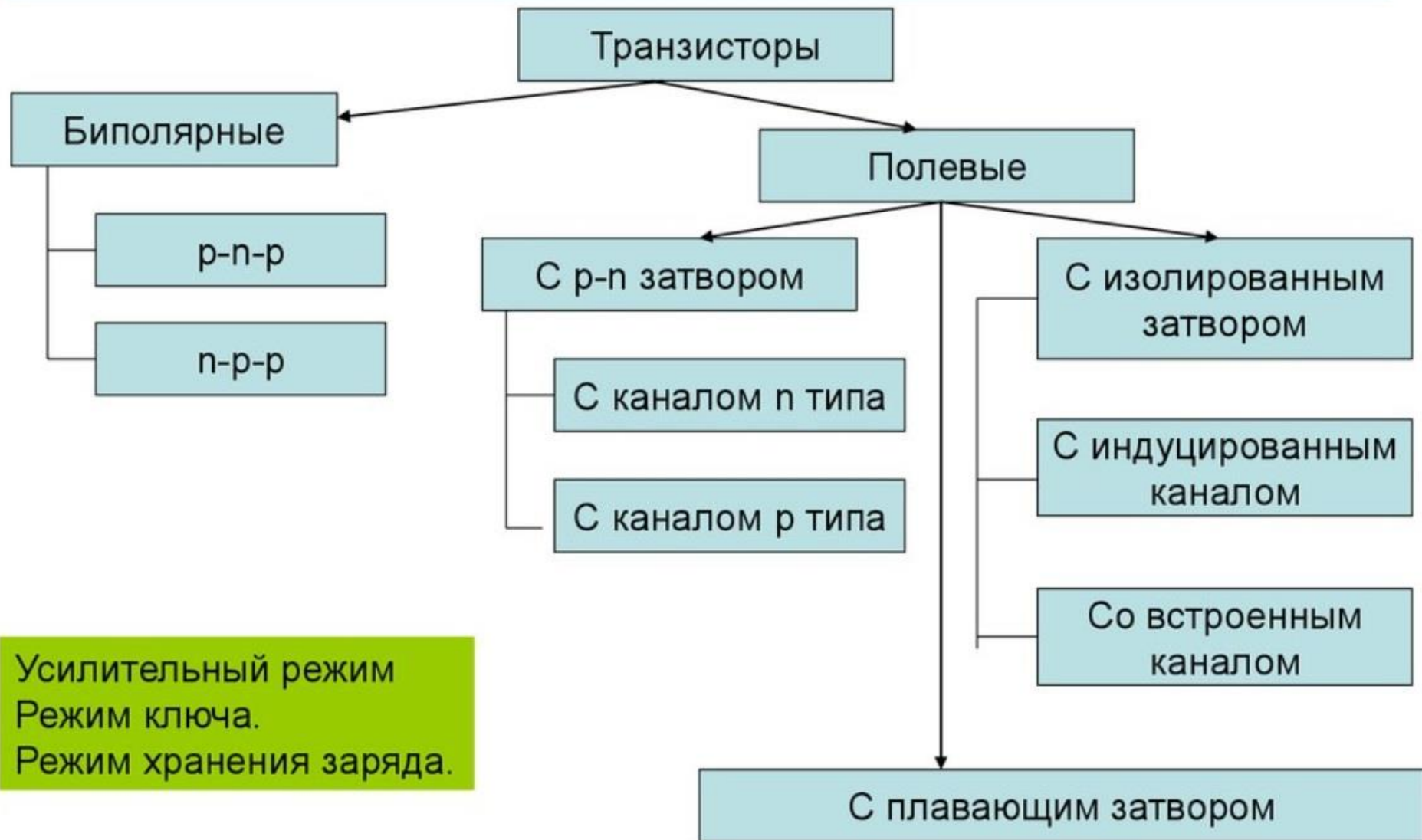


NPN

PNP



# Классификация транзисторов



Усилительный режим  
Режим ключа.  
Режим хранения заряда.

# Классификация транзисторов по мощности и частоте

- *Маломощные транзисторы* до 100 мВт
- *Транзисторы средней мощности* от 0,1 до 1 Вт
- *Мощные транзисторы* (больше 1 Вт).
- Низкочастотные – до 3 МГц,
- Среднечастотные – от 3 до 30 МГц,
- Высокочастотные – от 30 до 300 МГц,
- Сверхвысокочастотные – более 300 МГц.

# Классификация транзисторов по исполнению корпуса

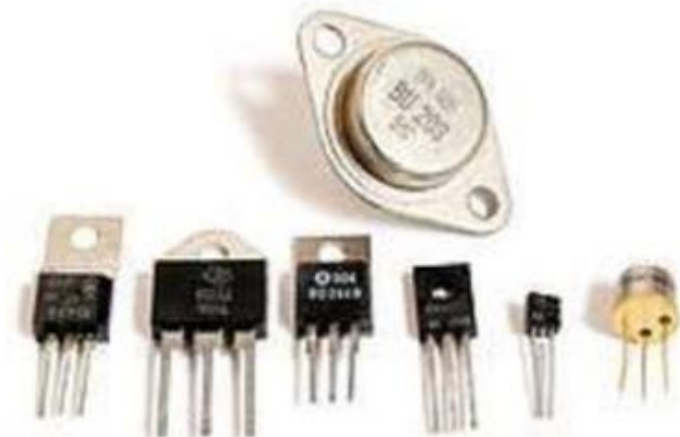
- *Дискретные* транзисторы

- *Корпусные;*

- Для свободного монтажа.
    - Для установки на радиатор.
    - Для автоматизированных систем пайки.

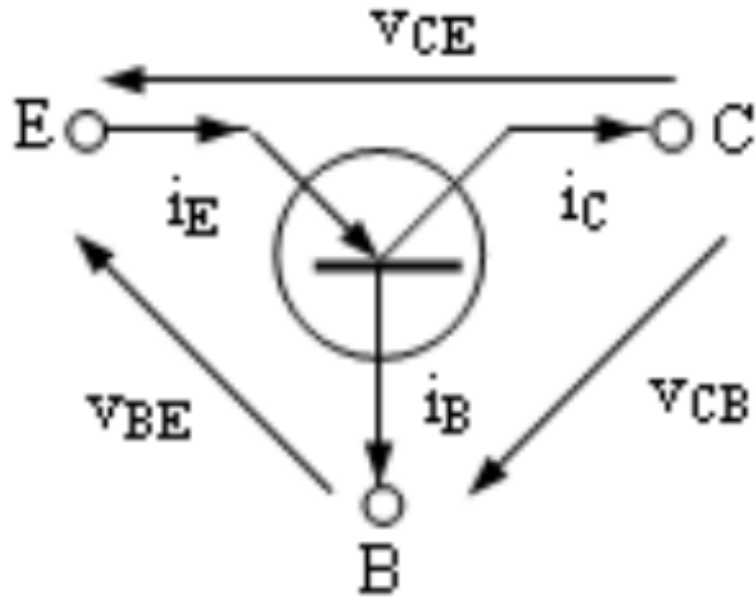
- *Бескорпусные;*

- Транзисторы в составе интегральных схем.

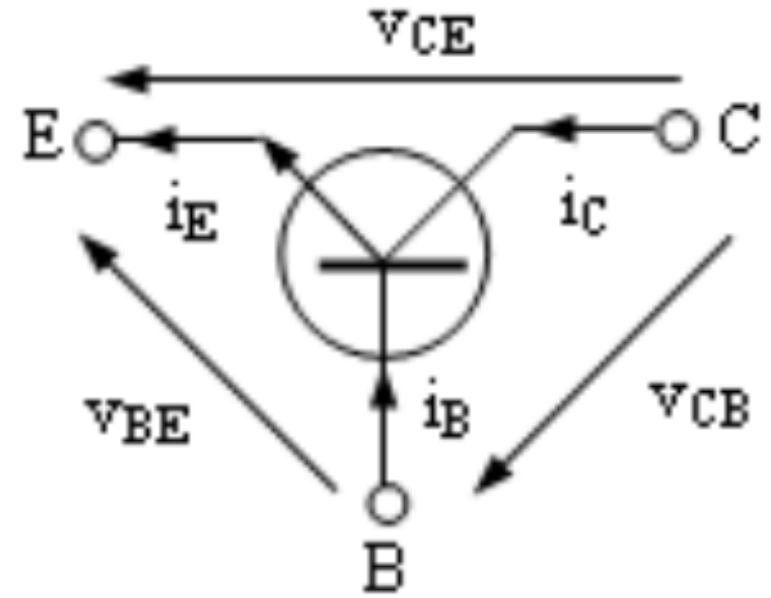




- Электрические величины, характеризующие БТ



Транзистор **рпр**



Транзистор **нрп**

Сопоставляя транзистор со схемным узлом, можно записать, что :  $i_E = i_C + i_B$  (1);  $U_{CE} = U_{BE} + U_{CB}$  (2)

Принимая во внимание вышеупомянутые отношения, шесть электрических величин, которые характеризуют БТ, приведут к тому, что только четыре из них будут независимыми (два тока и два напряжения). Чтобы выбрать четыре независимых размера, необходим критерий, который предлагается в зависимости от типа соединения, в котором БТ расположен как четырехполюсник.

## • Транзисторные соединения. Типы функций



Дипорт (четырёхполюсник) имеет четыре величин, два входа и два выхода..

Поскольку дипорт (который можно рассматривать как «черный ящик», в котором можно представить, что есть какое-либо устройство или электрическая цепь, схема которой не имеет значения, насколько сложна), он характеризуется четырьмя выводами, а транзистор имеет только три, один из них должен быть общими как для ввода, так и для вывода. Общая клемма определяет соединение БТ.

Описание работы квадруполья состоит в определении токов при известных значениях напряжения. Токи на входе и соответственно на выходе квадруполья будут выражены каждый в соответствии с двумя напряжениями, то есть:

$$\begin{cases} i_1 = i_1(v_1, v_2) \\ i_2 = i_2(v_1, v_2) \end{cases}$$

Выходные величины (токи  $i_1$  и  $i_2$ ) являются функциями двух переменных, т.е. графически квадруполь (следовательно, транзистор) описывается двумя семействами характеристик в виде поверхностей. На практике используются три из возможных характеристик (кривые уровня на соответствующих поверхностях), а именно:

**Входная характеристика  $i_1 = i_1(v_1)$  ;  $v_2 = \text{Постоянная}$**

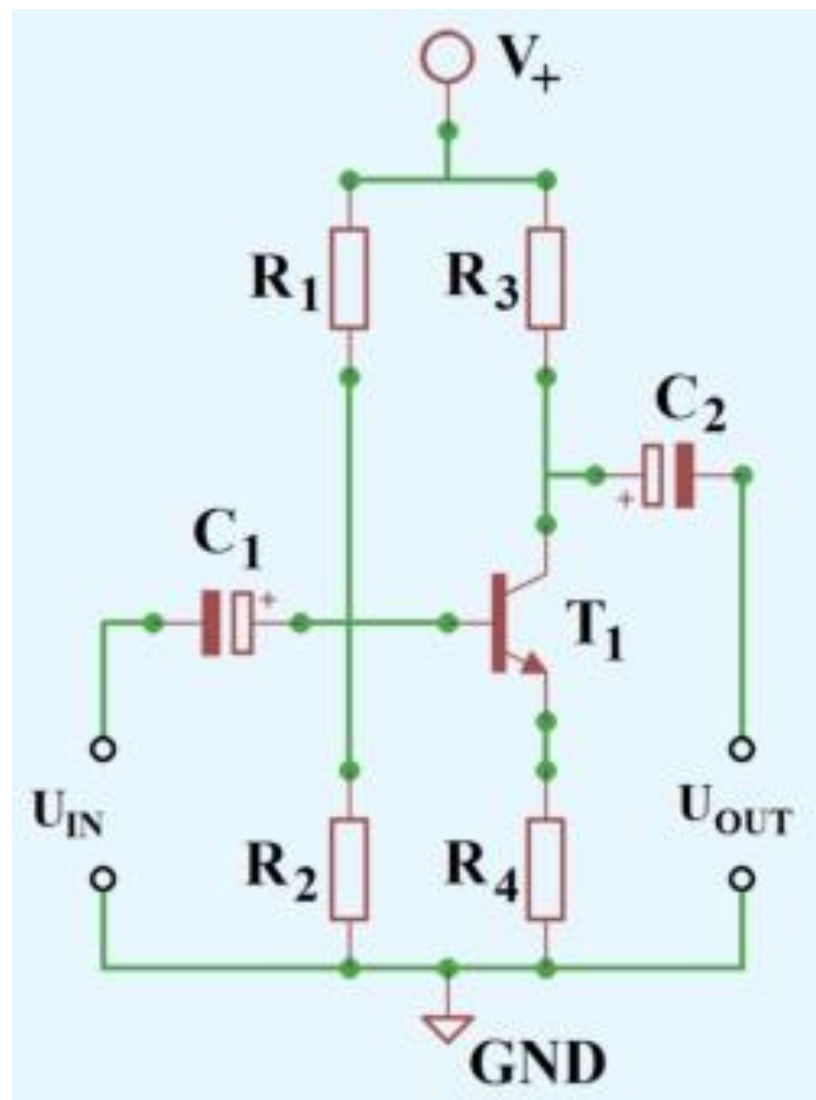
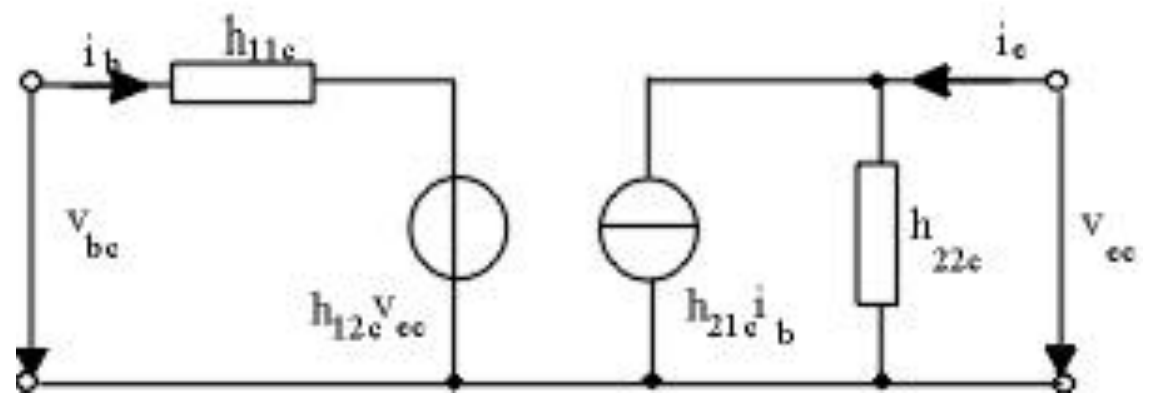
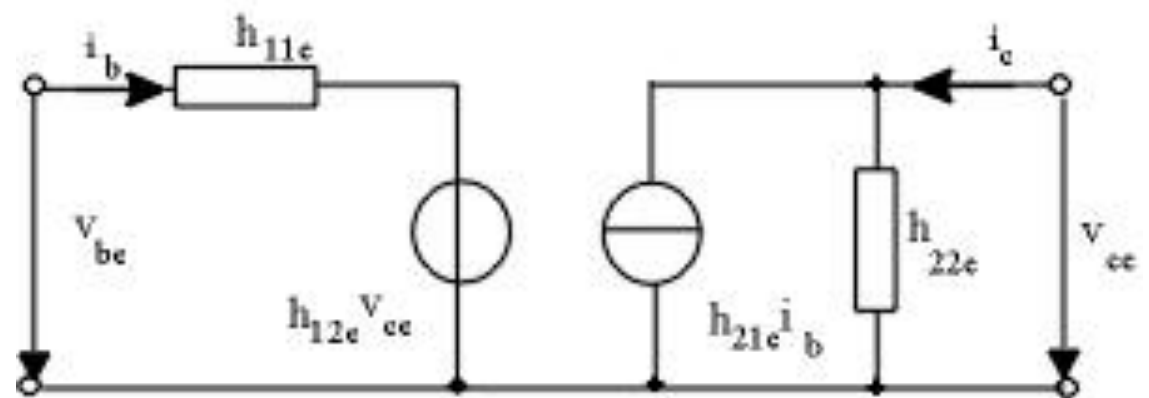
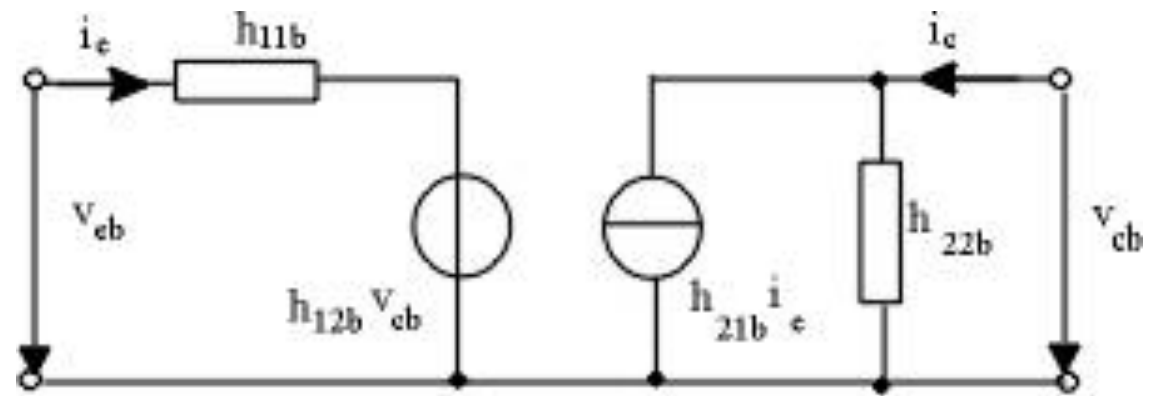
Представляет зависимость входного тока от входного напряжения для различных постоянных значений выходного напряжения..

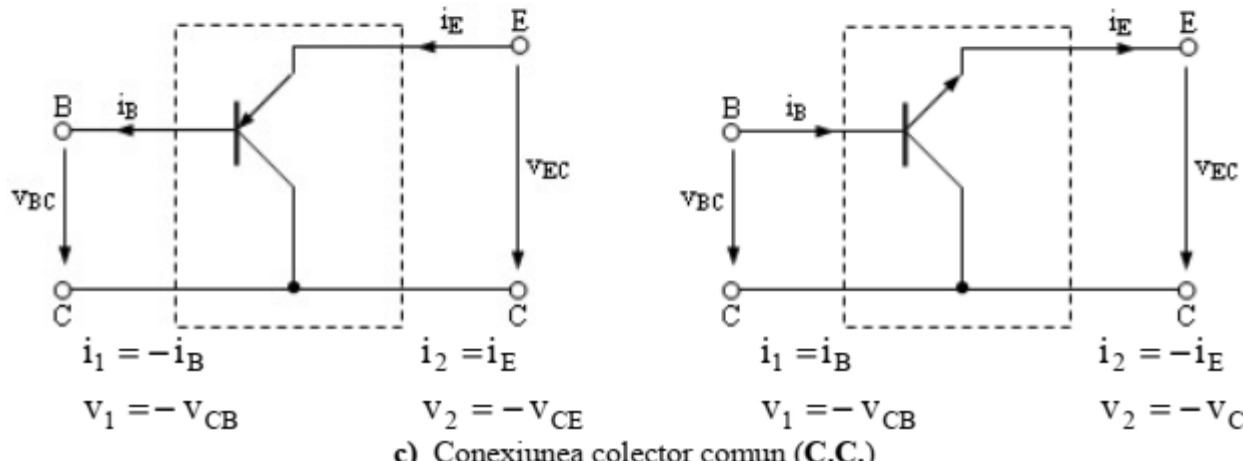
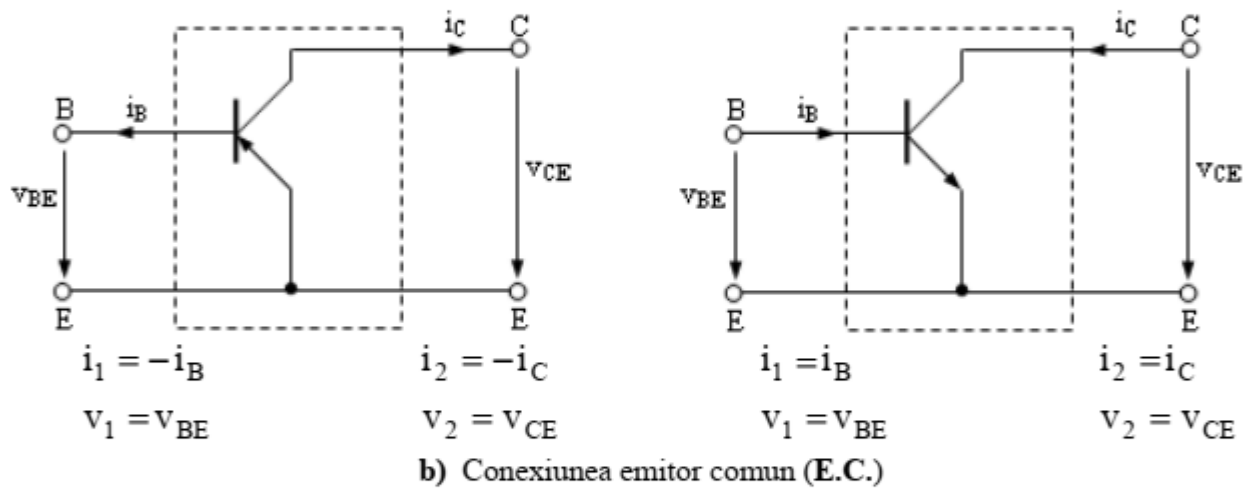
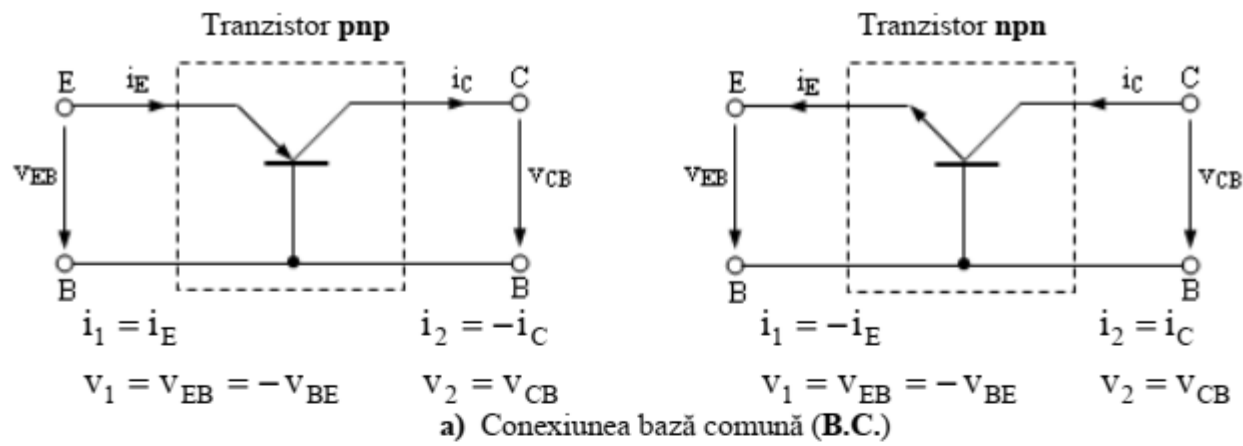
**Характеристика передачи  $i_2 = i_2(v_1)$  ;  $v_2 = \text{Постоянная}$**

Представляет зависимость выходного тока от входного напряжения для различных постоянных значений выходного напряжения.

**Выходная характеристика  $i_2 = i_2(v_2)$  ;  $v_1$  sau  $i_1 = \text{Постоянная}$**

Представляет зависимость выходного тока как функцию выходного напряжения для различных постоянных значений входного тока (напряжения).





➤ Включения с общей базой

- Входная характеристика:  $i_E = i_E(v_{BE})|_{V_{CB}=ct.}$
- Характеристика передачи:  $i_C = i_C(v_{BE})|_{V_{CB}=ct.}$
- Выходная характеристика:  $i_C = i_C(v_{CB})|_{i_E=ct.}$

➤ Включения с общим эмиттером

- Входная характеристика:  $i_B = i_B(v_{BE})|_{V_{CE}=ct.}$
- Характеристика передачи:  $i_C = i_C(v_{BE})|_{V_{CE}=ct.}$
- Выходная характеристика:  $i_C = i_C(v_{CE})|_{i_B=ct.}$

➤ Включения с общим коллектором

- Входная характеристика:  $i_B = i_B(v_{CB})|_{V_{CE}=ct.}$
- Характеристика передачи:  $i_E = i_E(v_{CB})|_{V_{CE}=ct.}$
- Выходная характеристика:  $i_E = i_E(v_{CE})|_{i_B=ct.}$

# • ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

## Обзор

Понять работу транзистора (в любой схеме) можно только в том случае, если его поведение предельно ясно:

- в статическом режиме (на выводы транзистора подается постоянное напряжение);
- в динамическом режиме (на входе транзистора, видимого как дипорт, появляется управляющий сигнал (синусоидальный или импульсный) в форме тока или напряжения, сигнал, который перекрывается с уже существующим напряжением постоянного тока).

Ток эмиттера и ток коллектора примерно равны :

$$I_E = I_C \text{ - în regim static}$$

$$i_E = i_C \text{ - în regim dinamic}$$

$$\text{unde } i_E = I_E + i_e \text{ și } i_C = I_C + i_c$$

В статическом режиме ток базы намного ниже, чем ток коллектора:

$$I_C = \beta_F I_B, \text{ cu } \beta_F \gg 1$$

Где  $\beta_F$  - это усиление тока при больших сигналах, величина, которая зависит от транзистора.

- Транзисторы малой мощности характеризуются высокими значениями  $\beta_F$  (порядка сотен), а транзисторы средней или большой мощности - меньшими (порядка десятков) значениями этого параметра.
- Следует подчеркнуть большой разброс параметра  $\beta_F$  даже для транзисторов одного семейства..

- В динамическом режиме изменение основного тока намного меньше, чем изменение тока коллектора. :

$$i_e = h_{21} i_b, \text{ cu } h_{21} \gg 1$$

- $h_{21}$  (или  $h_{fe}$ ) это усиление тока при малых сигналах с выходом короткого замыкания

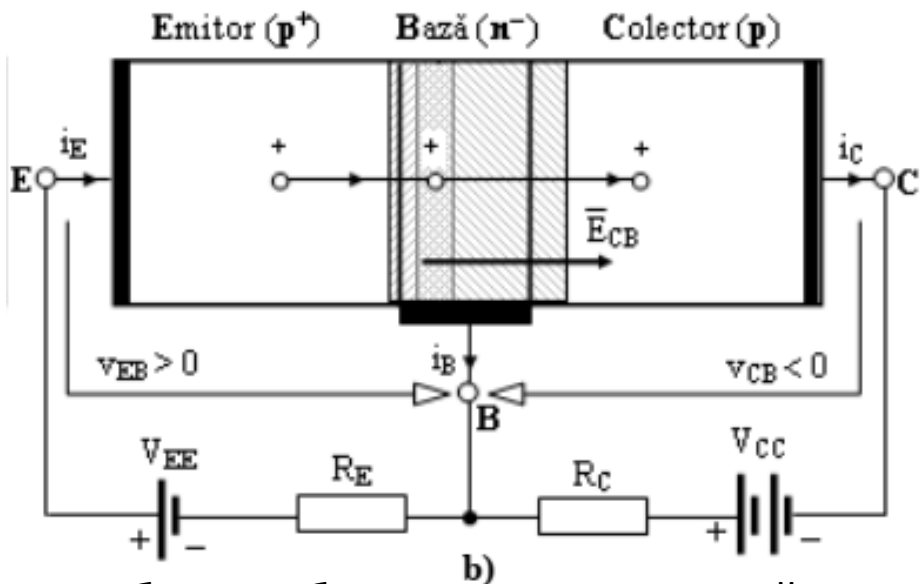
$$\beta_F \approx h_{21}$$

- При нормальной работе транзистора переход эмиттер-база прямо поляризован, а база-коллектор поляризован обратно. Особенностью транзистора является электрическая связь этих двух p-n переходов..

Конструктивно должны быть выполнены два условия. :

- Переход эмиттер-база должен быть сильно асимметричным:  $p^+ n$  в случае pnp-транзисторов и  $n^+ p$  в случае npn-транзисторов (т. е. Сильно легированная область является эмиттером).
- База должна быть тонкой (узкой) по сравнению с длиной диффузии  $L_p$  большинства носителей в эмиттере, которые достигают базы, чтобы большая их часть захватывалась коллектором..

## • Работа pnp-транзистора



Нормальный активный режим БТ находится в этом режиме работы, если переход ЕБ имеет прямую поляризацию, а переход КБ имеет обратную поляризацию. В случае результатов БТ типа pnp :  $U_{ЕБ} > 0$  ;  $U_{КБ} < 0$

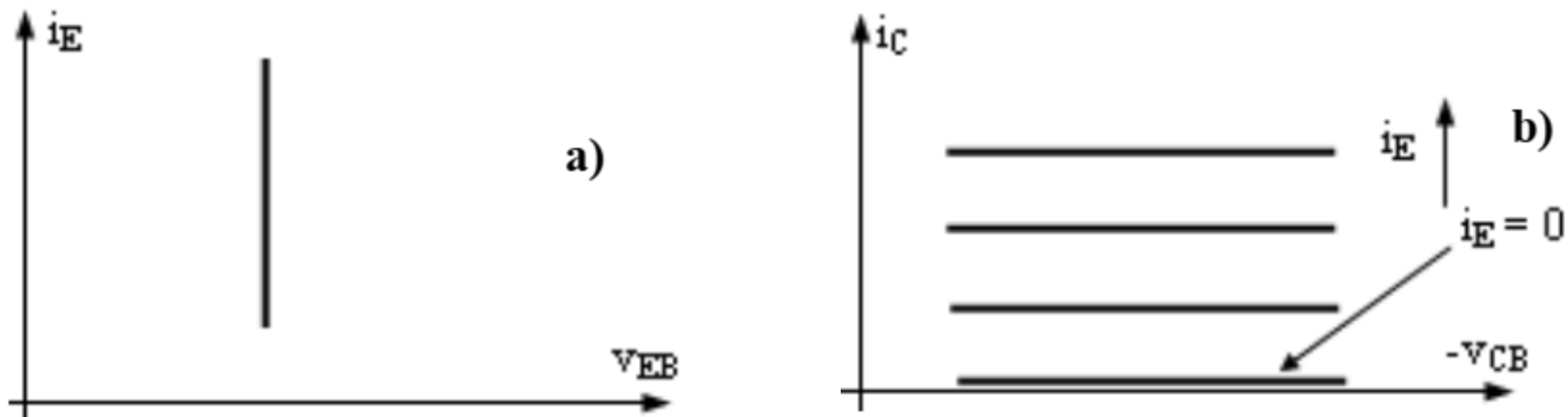
Из-за прямой поляризации ЕБ-перехода соответствующая длина диффузии будет уменьшаться. Кроме того, из-за обратной поляризации КБ-перехода соответствующая длина диффузии будет увеличиваться, что приведет к их перекрытию на определенной площади. В этом смысл понятия тонкой основы, упомянутого в предыдущем абзаце.

Таким образом, большинство носителей электрического заряда, инжектированных в основание эмиттера из-за прямой поляризации ЕБ-перехода (зазоры в случае БТ pnp-типа), попадают под влияние электрического поля  $E_{КБ}$ , создаваемого в КБ-переходе напряжением  $U_{КБ}$ . Это электрическое поле действует на несущие элементы с помощью электростатических сил  $F = qE_{КБ}$ , где  $q = e$  в случае дырок, соответственно  $q = -e$  в случае электронов. Эти силы ориентированы таким образом, чтобы грузовые носители перемещались к коллектору.

Пересечение базы (фактически, КБ переход, обратно поляризованный) носителями электрического заряда в БТ, работающем в нормальном активном режиме, называется эффектом транзистора.

Количественно эта передача контролируется величиной напряжения  $u_{ЕБ}$ . Как легко видеть, проявление этого эффекта является следствием конструкции транзистора, особенно того факта, что база «тонкая». Из-за того, что эмиттерная область более легирована (p+) по сравнению с основанием, в токе  $i_E$  преобладает большинство носителей, вводимых (диффузией) из эмиттера в базу (зазоры в случае БТ pnp-типа). Несущие меньшинства (в случае БТ типа pnp, оба дырок, существующие до поляризации, а также дырки, которые рассеиваются из эмиттера) будут перемещаться к коллектору, создавая ток  $i_K$  (ток коллектора), который примерно равен току эмиттера :  $i_K \approx i_E$

- Переход ЕБ (прямо поляризованный) можно сравнить с прямо поляризованным диодом. С другой стороны, переход КБ нельзя сравнивать с диодом с обратной поляризацией, потому что в такой ситуации через диод будет протекать очень малый (обратный) ток, ни в коем случае:  $i_K \approx i_E$ .
- БТ не эквивалентен двум подключенным диодам
- При определении БТ было упомянуто, что два типа носителей обеспечивают проводимость (промежутки и электроны). Приведенное выше объяснение только подчеркивает тот факт, что в случае транзистора типа ррр ток в основном формируется дырками. Из сравнения перехода база-эмиттер с диодом с прямой поляризацией следует, что:  $u_{EB} \approx \text{ст.}$  с типичными значениями порядка 0,6 – 0,7В для Si и 0,2 – 0,3В для Ge. Но, рассматривая транзистор как полупроводниковый прибор, можно сказать, что падение напряжения на переходах транзистора в режиме насыщения не превышает 0,4 В для Si.

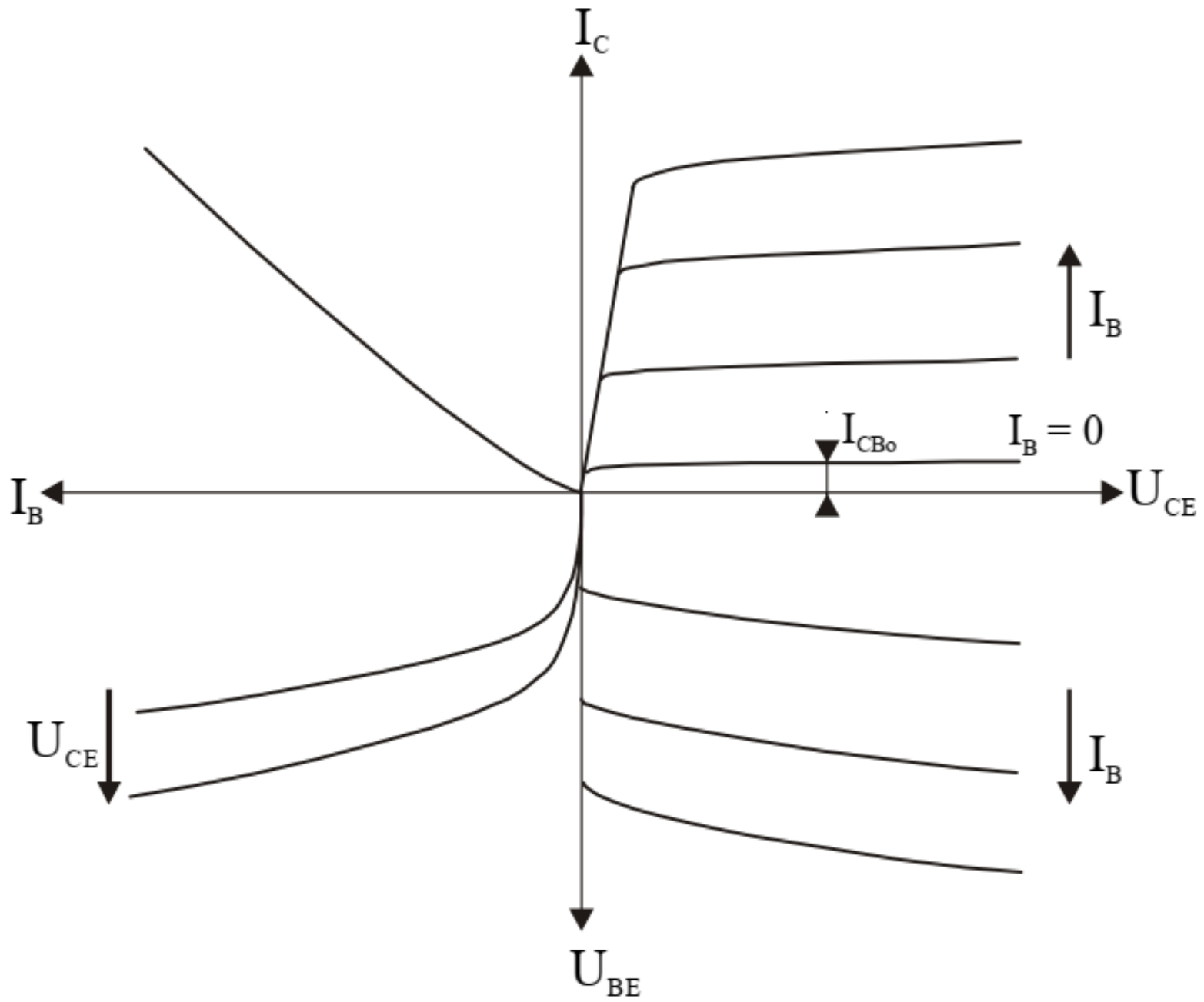


Идеальные характеристики ррр транзистора

а) Идеальная входная характеристика

б) Идеальная выходная характеристика





## Обратный активный режим

БТ находится в этом режиме работы, если КБ-переход имеет прямую поляризацию, а ЕБ-переход - обратно поляризованный. В случае рпр типа БТ результат:  $u_{ЕБ} < 0$  ;  $u_{КБ} > 0$

В этой ситуации, с качественной точки зрения, явления будут аналогичны описанным для функционирования БТ в нормальном активном режиме, соединения КБ и ЕБ меняют свои роли между ними. Это приводит к тому, что ток будет течь через БТ в направлении, противоположном работе в нормальном активном режиме, из-за того, что носители заряда вводятся в базу за счет диффузии от коллектора и переносятся к эмиттеру из-за электрического поля, которое поляризует ЕБ-переход обратно.

Однако с количественной точки зрения явления существенно различаются.

- Таким образом, из-за режима легирования, характерного для двух переходов (коллекторная область имеет легирование среды), ток будет намного ниже, чем при работе в нормальном активном режиме, при тех же условиях поляризации.
- Во-вторых, из-за режима легирования ЕБ-переход не поддерживает высокие обратные напряжения (большинство БТ имеют проникающее напряжение ЕБ-перехода порядковые 5-6В), поэтому этот режим работы возможен только в случае работы с питающими напряжениями малых ценностей.

Следовательно, обратный активный режим **в практических приложениях не используется.**

Транзистор - это устройство, которое было разработано и построено для обеспечения контролируемой односторонней проводимости. По этой причине не работать в обратном активном режиме было заботой конструкторов. Возможность существования этого рабочего режима является следствием конструктивного устройства БТ и имеет чисто теоретическое значение.

## Режим насыщения

БТ работает в режиме насыщения, если оба перехода имеют прямую поляризацию. В случае результатов БТ типа рnr :

$$u_{EB} < 0 ; u_{KB} \leq 0$$

Из-за прямой поляризации обоих переходов будет благоприятствовать диффузия. Таким образом, в основании будет происходить массовое введение основных носителей нагрузки (в данном случае дырок) как от эмиттера, так и от коллектора.

Эти носители груза находятся под воздействием электрического поля.

$$E_{EK} = E_{EB} + E_{BK}$$

возникает между коллектором и эмиттером в результате поляризации переходов падение напряжения между эмиттером и коллектором равно:

$$u_{EK} = u_{EB} - u_{BK}$$

электрические поля  $E_{EB}$  и  $E_{BK}$  будут иметь противоположные направления, так что в принципе поле  $E_{EK}$  может иметь любую ориентацию, воздействуя на несущие основные нагрузки соответствующими смещениями. Получается, что через работающий в этом режиме БТ ток ( $i_K \approx i_E$ ) он может иметь одно из двух возможных значений.

- **Однако необходимы следующие пояснения:**
  - Напряжение  $u_{ЕК}$  имеет низкое значение, поэтому значение тока через транзистор будет определяться сопротивлением нагрузки, подключенной в коллекторе (и / или в эмиттере). Не все несущие базовой нагрузки будут участвовать в этом токе (помните, что по сравнению с нормальном активном режиме в базе есть несколько несущих, и значение тока существенно не увеличивается), поэтому в базе будут размещены несущие нагрузки (так что так называемые сверхнормативные перевозчики или хранимый груз). Они создают проблемы, когда БТ заблокирован, потому что их нужно эвакуировать с базы, а это явление не происходит мгновенно. Это приводит к увеличению времени блокировки, что неприемлемо для большинства приложений.
  - Самый простой способ сократить время разряда, хранящегося в базе, - это уменьшить количество носителей заряда, застрявших в базе. Это достигается поляризацией КБ-перехода на пределе проводимости, обычно с  $u_{БК} = 0$  или даже слегка положительным, что существенно ограничивает диффузию носителей заряда от коллектора к базе.
  - В этих условиях очевидно, что носители нагрузки будут двигаться в сторону коллектора (как и при работе в нормальном активном режиме). Направление тока будет таким же, потому что носителями нагрузки являются дырки, т.е. положительные нагрузки.

## Режим блокировки (отсечки)

БТ "работает" в режиме блокировки (он заблокирован или отключен), если оба соединения имеют обратную поляризацию. В случае результатов БТ типа pnp :

$$u_{EB} > 0 ; u_{KB} > 0$$

Из-за обратной поляризации обоих переходов диффузии носителей заряда в базу не будет.

Явления аналогичны явлениям, характерным для pn-перехода в режиме обратной поляризации, так что через структуру будет протекать незначительный ток с (по крайней мере, на 3) порядка величины меньше, чем в режимах проводимости (нормальном активном режиме или насыщение).

Мы можем резюмировать режимы работы биполярного транзистора следующим образом :

- режим блокировки:  $j_E$  и  $j_K$  - заблокирован,

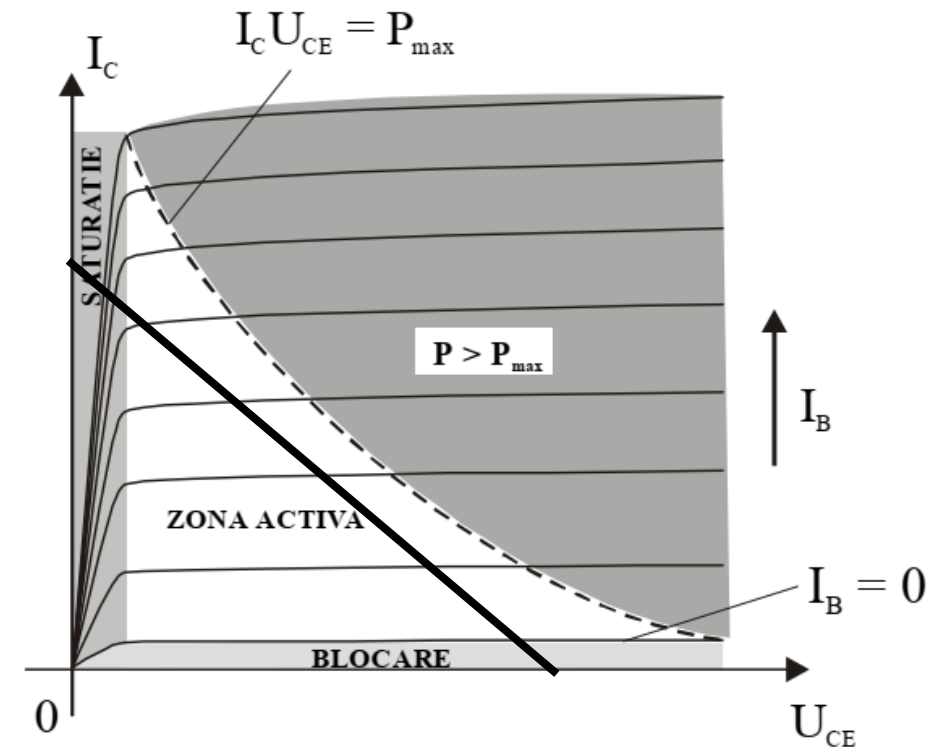
$$I_K = 0, U_{KE} = E_K$$

- режим в активной зоне:  $j_E$  – проводимость,  $j_K$  – заблокирован,

$$I_K \neq 0, U_{KE} = 5 \rightarrow 0,2 \text{ В}$$

- режим насыщения:  $j_E$  и  $j_K$  – проводимость,

$$I_K \neq 0, U_{KE} = 0,1 - 0,2 \text{ В} = U_{KE_{\text{нас}}}$$



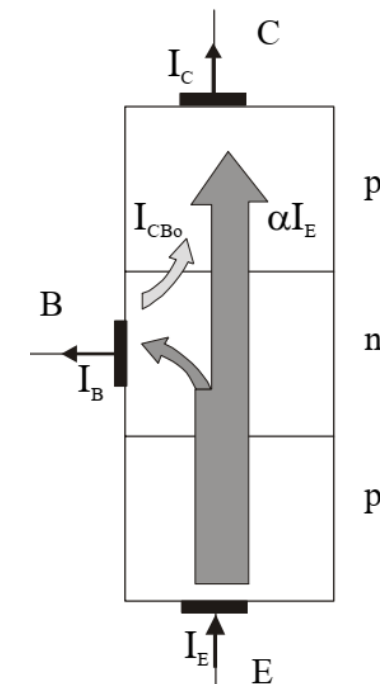
<i>Regimul de funcționare</i>	<i>Tipul TB</i>	<i>Polarizarea</i>	
		<i>joncțiunii bază-emitor</i>	<i>joncțiunii bază-colector</i>
Regimul activ normal (RAN)		<b>Direct</b>	<b>Invers</b>
	NPN	$U_{BE} > 0$	$U_{BC} < 0$
	PNP	$U_{EB} > 0$	$U_{CB} < 0$
Regimul activ invers (RAI)		<b>Invers</b>	<b>Direct</b>
	NPN	$U_{BE} < 0$	$U_{BC} > 0$
	PNP	$U_{EB} < 0$	$U_{CB} > 0$
Regimul de saturație (RS)		<b>Direct</b>	<b>Direct</b>
	NPN	$U_{BE} > 0$	$U_{BC} > 0$
	PNP	$U_{EB} > 0$	$U_{CB} > 0$
Regimul de blocare (RB)		<b>Invers</b>	<b>Invers</b>
	NPN	$U_{BE} < 0$	$U_{BC} < 0$
	PNP	$U_{EB} < 0$	$U_{CB} < 0$

# Polarizarea tranzistorului bipolar

## Polarizarea cu divizor de tensiune în bază

Pentru a funcționa în zona activă și a fi folosit într-o schemă de amplificare de exemplu, joncțiunile tranzistorului bipolar trebuie polarizate în curent continuu astfel încât joncțiunea emitoare să fie polarizată direct iar joncțiunea colectoare să fie polarizată invers. Polarizarea se face de la o singură sursă de alimentare, existând mai multe scheme folosite în acest scop. Una dintre cele mai utilizate scheme de polarizare în curent continuu este cea cu divizor de tensiune în baza tranzistorului. Practic, problema se pune în felul următor: cunoaștem tipul de tranzistor folosit și dorim polarizarea joncțiunilor sale astfel încât el să lucreze într-un anumit punct static de funcționare. Evident, se cunoaște și tensiunea de alimentare folosită. Pentru calcularea valorilor rezistențelor din circuitul de polarizare se folosesc pe de o parte ecuațiile de legătură dintre curenții care intră și ies din tranzistor, în care se poate neglija influența curentului  $I_{CB0}$  mult mai mic decât ceilalți curenți:

Fracțiunea din curentul de emitor care contribuie la formarea curentului de colector este notată cu  $\alpha$ .  $\alpha$  se numește **factor de curent** și valorile lui sunt foarte apropiate de 1:  $\alpha \cong 0,97 - 0,99$ . Curentul  $\alpha I_E$  împreună cu **curentul de purtători minoritari**,  $I_{CB0}$ , care traversează joncțiunea colectoare polarizată invers, vor forma curentul de colector,  $I_C$ . Astfel, pot fi scrise următoarele relații între curenții măsurabili:  $I_E = I_C + I_B$   $I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$  Coeficientul de multiplicare a curentului de bază se notează cu  $\beta$  și se numește **factor de amplificare statică** (sau factor de amplificare a curentului continuu) și este supraunitar:  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$   $I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0}$  De aici se poate vedea că **tranzistorul bipolar este un element activ comandat în curent**. Deoarece curentul de purtători minoritari  $I_{CB0}$  este foarte mic (sub  $1\mu A$ ), în practică se poate folosi cu bună aproximație relația  $I_C \cong \beta I_B$



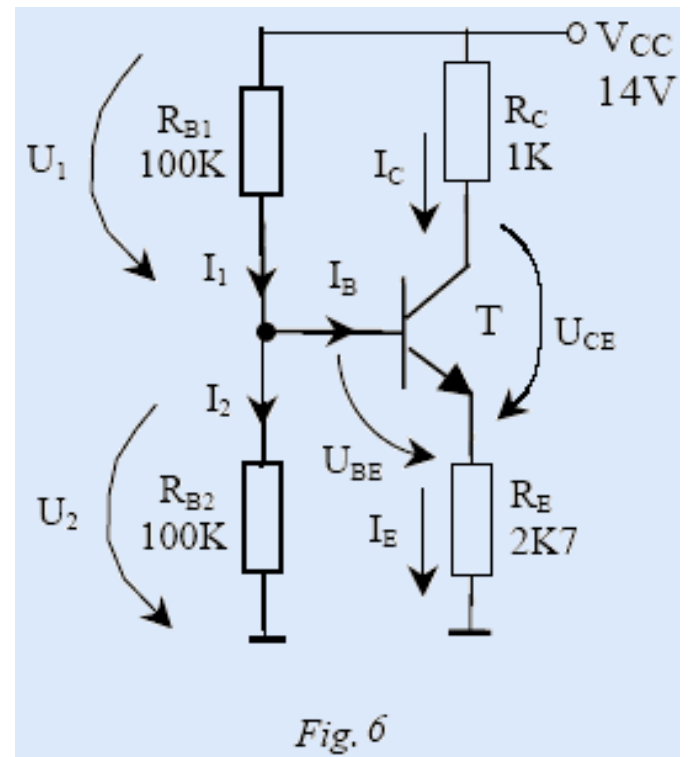
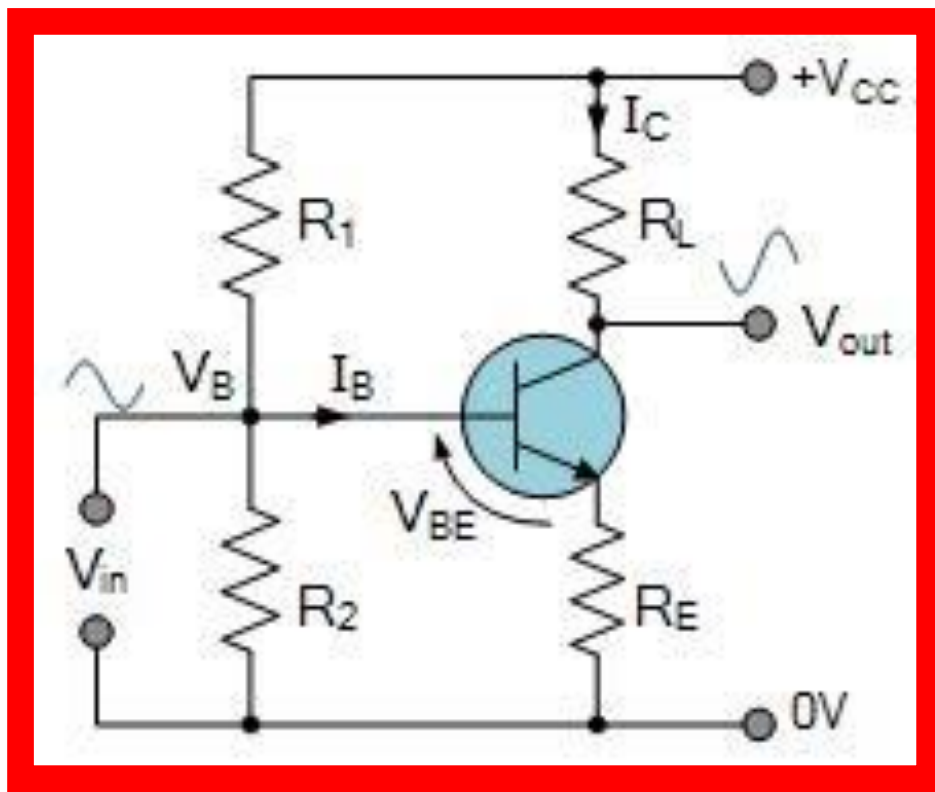
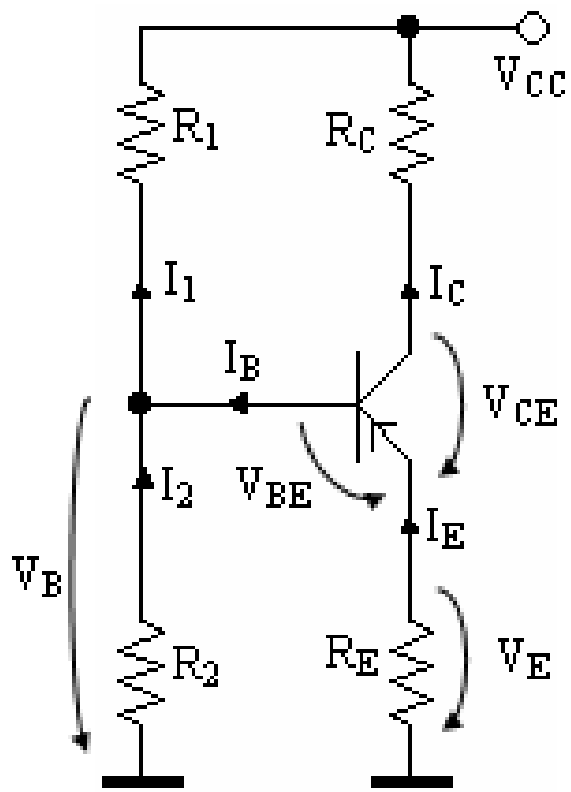
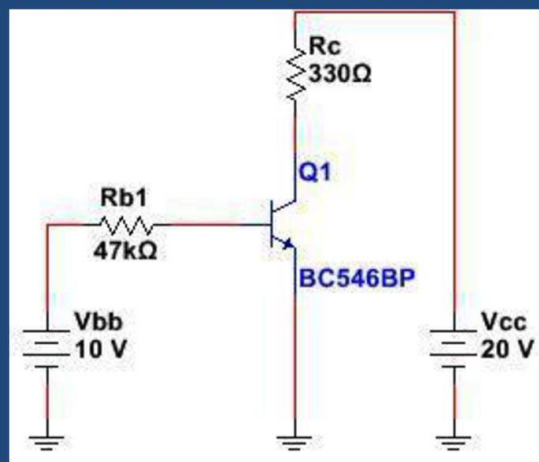
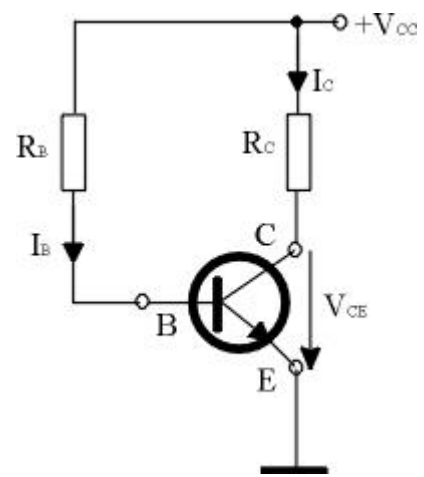


Fig. 6

**POLARIZAREA TB CU DOUĂ SURSE DE TENSIUNE**  
 Prin această metodă, tranzistorul se polarizează cu două surse de tensiune diferite.

**POLARIZAREA BAZEI DIN SURSĂ DE TENSIUNE SEPARATĂ**





$$I_C \cong \beta I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C \cong I_E$$

уравнения, которые мы пишем на основе применения законов Кирхгофа в цепи

$$E_c = I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E$$

$$E_c = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

$$I_1 = I_2 + I_B$$

$$I_2 R_2 = U_{BE} + I_E R_E$$

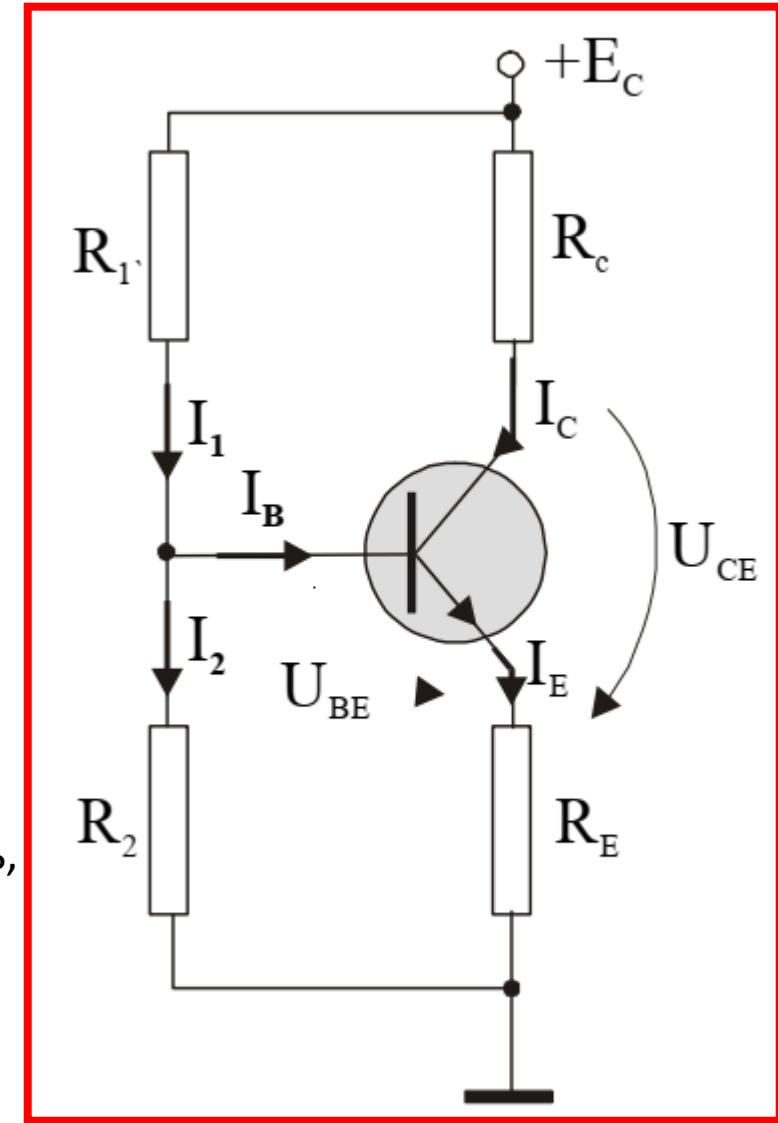
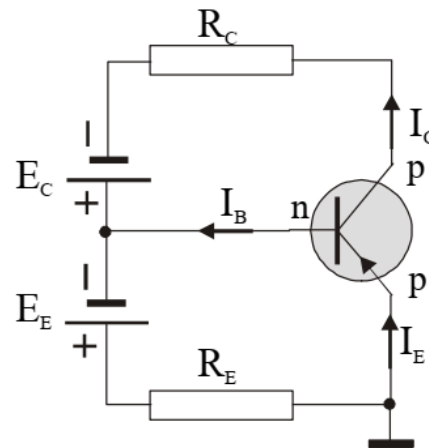
Конечно, решение системы из семи уравнений, в которых может быть более семи неизвестных, кажется довольно сложным. На практике, однако, все можно упростить, если мы знаем, в какие диапазоны значений должны попадать значения сопротивлений в цепи поляризации:

$R_1$ , десятки - сотни  $k\Omega$

$R_2$ ,  $k\Omega$  – десятки  $k\Omega$

$R_C < 10k\Omega$

$R_E \cong 1/10 * E_K / I_K$ , сотни  $\Omega$  -  $k\Omega$



- Значения резисторов  $R_1$  и  $R_2$  выше, чем у остальных, чтобы потреблять как можно меньший ток от источника питания, но в то же время они должны обеспечивать поляризацию базы, чтобы эмиттерный переход находился в состоянии проводимости (обычно 0,65 В для Si).
- Значение сопротивления  $R_E$  должно быть как можно меньше, чтобы потреблять как можно меньше. Теоретически он может отсутствовать и эмиттер можно подключить непосредственно к земле. Однако в основном это необходимо для термостабилизации статической рабочей точки.
- Значение сопротивления коллектора транзистора  $R_C$  также представляет нагрузку транзистора, когда он работает как активный элемент в схемах усиления или обработки сигналов. Его максимальное значение ограничено состоянием проводимости транзистора. При слишком большом значении падение напряжения на нем может быть настолько большим при малом токе коллектора, что не позволяет транзистору перейти в проводимость.
- В большинстве случаев, чтобы иметь возможность решить систему уравнений цепи поляризации, нам нужно будет выбрать номинал одного из резисторов, основываясь на вышеупомянутых наблюдениях.
- *Мы предполагаем, что у нас есть транзистор с  $\beta = 100$ , который мы хотим поляризовать в постоянном токе, чтобы он работал в активной области с  $I_K = 2$  мА,  $U_{KE} = 5$  В и  $U_{EK} = 0,65$  В. Напряжение питания  $E_K = 10$  В. Пренебрежение остаточным током через переход база-коллектор из уравнения  $I_C \cong \beta I_B$  мы можем рассчитать базовый ток*

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{100} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ A} = 20 \mu\text{A}$$

Зная ток базы, рассчитываем ток эмиттера:

$$I_E = I_C + I_B = (2 \cdot 10^{-3} + 0,02 \cdot 10^{-3}) \text{ A} = 2,02 \text{ mA}$$

Мы можем рассчитать сопротивление эмиттера из ранее рекомендованного соотношения :

$$R_E \cong \frac{1}{10} \frac{E_c}{I_C} = \frac{1}{10} \frac{10}{2,02 \cdot 10^{-3}} = 495 \Omega$$

рассчитываем значение сопротивления в коллекторе транзистора:

$$R_C = \frac{E_C - U_{CE} - I_E R_E}{I_C} = \frac{10 - 5 - 2,02 \cdot 10^{-3} \cdot 495}{2 \cdot 10^{-3}} = 2000 \Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

Потенциал базы к земле,  $V_B = I_2 R_2$ , мы можем вычислить его из уравнения

$$V_B = U_{BE} + I_E R_E = 0,65 + 2,02 \cdot 10^{-3} \cdot 495 = 1,65 \text{ V}$$

Выбор значения сопротивления  $R_2$  :

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

можно рассчитать значение тока  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{V_B}{R_2} = \frac{1,65}{10 \cdot 10^3} \text{ A} = 0,165 \text{ mA}$$

Наконец, можно рассчитать значение сопротивления  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{E_C - I_2 R_2}{I_1} = \frac{E_C - V_B}{I_2 + I_B} =$$

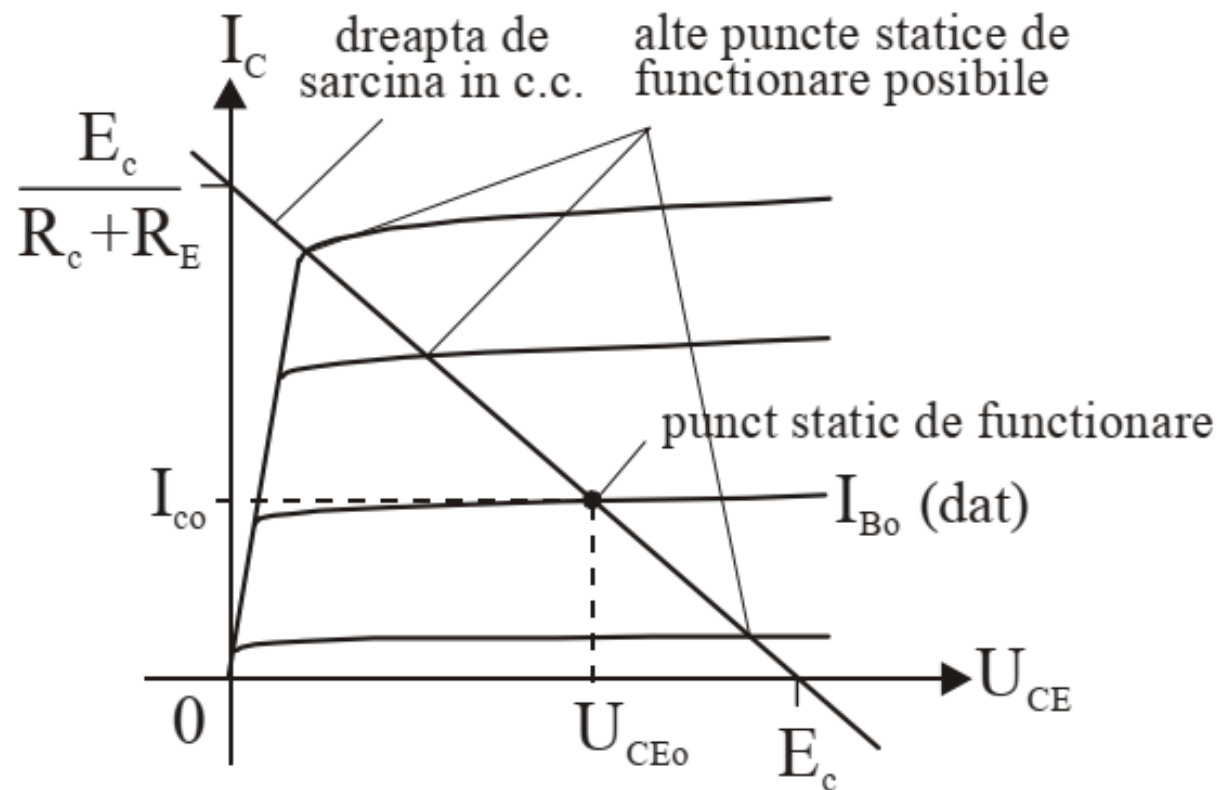
$$= \frac{10 - 1,65}{(165 + 20) \cdot 10^{-6}} = 0,0457 \cdot 10^6 \Omega = 45,7 \text{ k}\Omega$$

Учитывая стандартизованные значения резисторов общего назначения, мы выберем следующие значения для четырех резисторов смещения транзистора:  **$R_K = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 500 \Omega$ ,  $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$  și  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ .**

уравнение  $E_c = I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E$  можно переписать следующим образом :

$$I_C = -\frac{U_{CE}}{R_c + R_E} + \frac{E_c}{R_c + R_E}$$

где переменными размерами являются  $I_C$  и  $U_{CE}$ , а остальные постоянны. Он представляет собой уравнение линии нагрузки в постоянном токе и определяет положение статической рабочей точки. Из рисунка ниже видно, что если напряжение питания и значения резисторов смещения постоянны, положение статической рабочей точки можно изменить, изменив величину базового тока. Следовательно, статическая рабочая точка транзистора также может быть определена как пересечение между линией нагрузки постоянного тока и выходной характеристикой, соответствующей заданному базовому току.



# Термостабилизация статической рабочей точки

Электропроводность полупроводниковых материалов сильно зависит от температуры окружающей среды, в которой они работают. Изменение температуры вызывает гораздо большее относительное изменение плотности неосновных носителей, чем относительное изменение плотности основных носителей. Следовательно, в случае биполярного транзистора повышение температуры вызовет значительное относительное увеличение **остаточного тока (тока неосновной несущей)** через коллекторно-базовый переход  $I_{CB0}$ . Это вызовет увеличение тока коллектора, что, в свою очередь, вызовет дальнейшее повышение температуры перехода, после чего явление повторяется как цепная реакция, приводя к явлению термической упаковки. Процесс можно кратко описать на следующей диаграмме. :



Для термостабилизации статической рабочей точки обязательно наличие резисторов  $R_E$  и  $R_2$  в цепи смещения транзистора. Наличие делителя напряжения на базе транзистора обеспечивает относительно постоянный потенциал его базы по отношению к земле, причем сопротивления намного менее чувствительны к колебаниям температуры, чем полупроводники. Пренебрегая вкладом тока базы, получим  $I_K = I_E$ . Это означает, что увеличение тока коллектора из-за повышения температуры вызовет аналогичное увеличение тока эмиттера и, таким образом, увеличение падения напряжения на резисторе  $R_E$ . Поскольку потенциал базы относительно земли постоянный, напряжение на эмиттерном переходе необходимо будет уменьшить. Уменьшение  $U_{BE}$  будет определять уменьшение тока эмиттера, а следовательно, и тока коллектора, и это явление ослабляется. Процесс можно кратко описать на следующей диаграмме.



## • Представление линейных цепей параметрами квадруполья

метод используется в теории линейных цепей для упрощения расчетов сложной цепи, когда известны модели ее частей, а внутренние количества этих частей не представляют интереса в последующих расчетах. Схема представляет собой черный ящик, в модели которого используются только измеримые размеры на клеммах. У этого подхода есть два преимущества. :

- модель проста, что сокращает объем вычислений при ее использовании при моделировании более комплексной схемы (например, когда несколько схем каскадированы);
- модель может быть выведена экспериментально просто на основе величин, измеренных на терминалах.

Схема с четырьмя внешними выводами называется квадрупольной. Обычно это рассматривается как дипорт, то есть схема с двумя парами выводов (в каждой паре входной ток через один вывод равен выходному току через другой вывод). Переменные величины - два напряжения и два тока. Эти величины могут быть представлены мгновенными значениями, фактическими значениями или пиковыми значениями.



Работу схемы можно описать двумя уравнениями, связывающими четыре величины. Две из них считаются независимыми переменными, а две другие - зависимыми переменными. Есть шесть способов выбора переменных, из которых только четыре являются предпочтительными. :

Modelul parametrilor Z (parametri impedanță):

$$\begin{aligned}U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2\end{aligned}$$

Modelul parametrilor Y (parametri admitanță):

$$\begin{aligned}I_1 &= Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\I_2 &= Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2\end{aligned}$$

Modelul parametrilor H (parametri hibridi):

$$\begin{aligned}U_1 &= H_{11}I_1 + H_{12}U_2 \\I_2 &= H_{21}I_1 + H_{22}U_2\end{aligned}$$

Modelul parametrilor G (sînt tot parametri hibridi):

$$\begin{aligned}I_1 &= G_{11}U_1 + G_{12}I_2 \\U_2 &= G_{21}U_1 + G_{22}I_2\end{aligned}$$

Если четыре представленные модели описывают одну и ту же схему, они эквивалентны в том смысле, что существуют отношения переключения от одного набора параметров к другому, которые выражают одни и те же функциональные отношения. Использование той или иной модели - это просто вопрос удобства при написании уравнений схемы, потому что ни одна модель не превосходит или не уступает другим..

Например, импеданс  $Z_{11}$  рассчитывается как отношение между  $U_1$  и  $I_1$ , измеренное при пустом порте 2.

Значения параметров могут быть выведены из измерений на клеммах в соответствии с уравнениями :

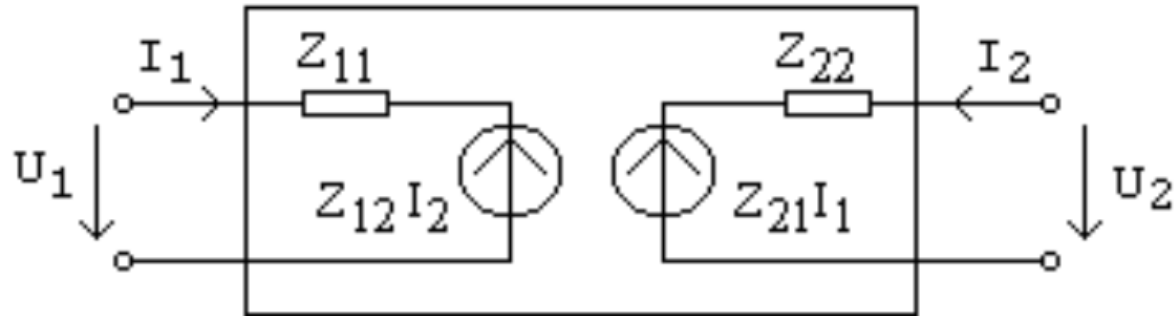
$$Z_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

$$Z_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

$$Z_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

$$Z_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

Модели используются для описания любых линейных цепей. Однако, если смоделированная схема активна, позволяя распространять сигнал в предпочтительном направлении, то один из портов имеет значение входа (либо порт 1), а другой порт считается выходным. В этом случае параметры схемы именуются соответственно: входное сопротивление, сопротивление обратной передачи (от выходного тока к входному напряжению), полное сопротивление прямой передачи (от входного тока к выходному напряжению) и выходное сопротивление. . Схема, эквивалентная схеме, моделируемой уравнениями (0.1), изображена на рисунке 0.2. Наблюдается наличие двух упорядоченных генераторов..



Подобно модели Z, уравнения для определения параметров могут быть введены в других случаях, а также эквивалентные схемы.

$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

$$Y_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

$$Y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

$$Y_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

$$H_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0}$$

$$H_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0}$$

$$H_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0}$$

$$H_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0}$$

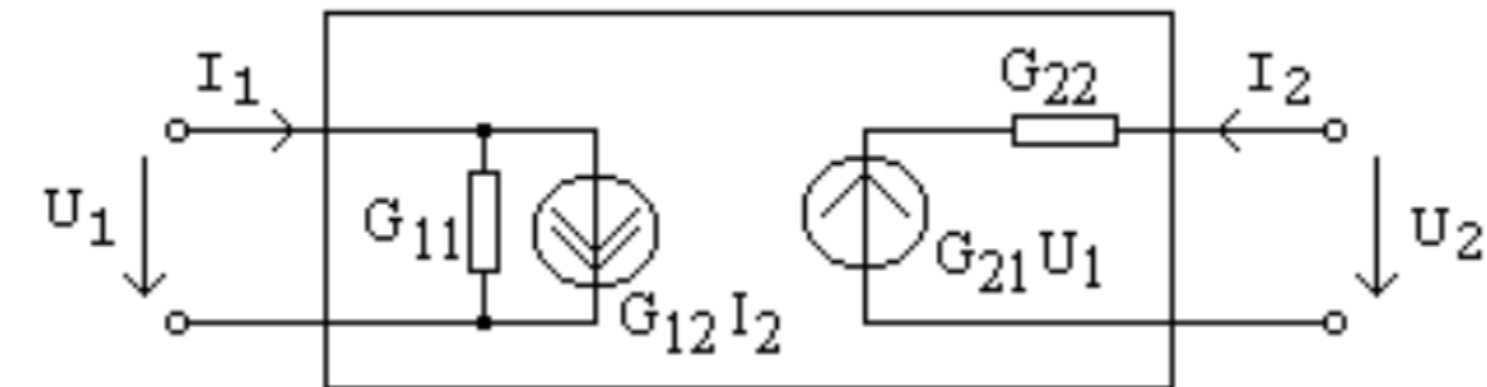
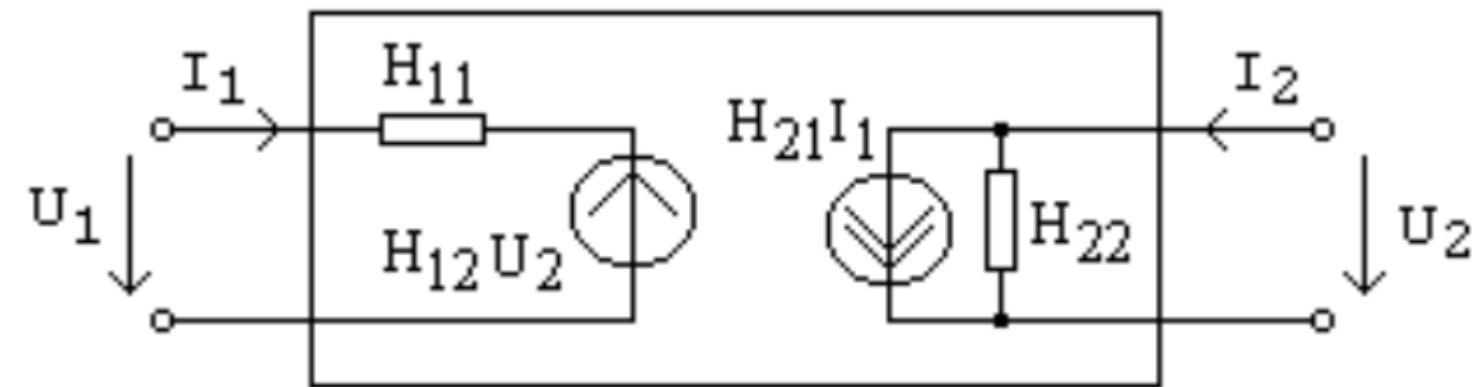
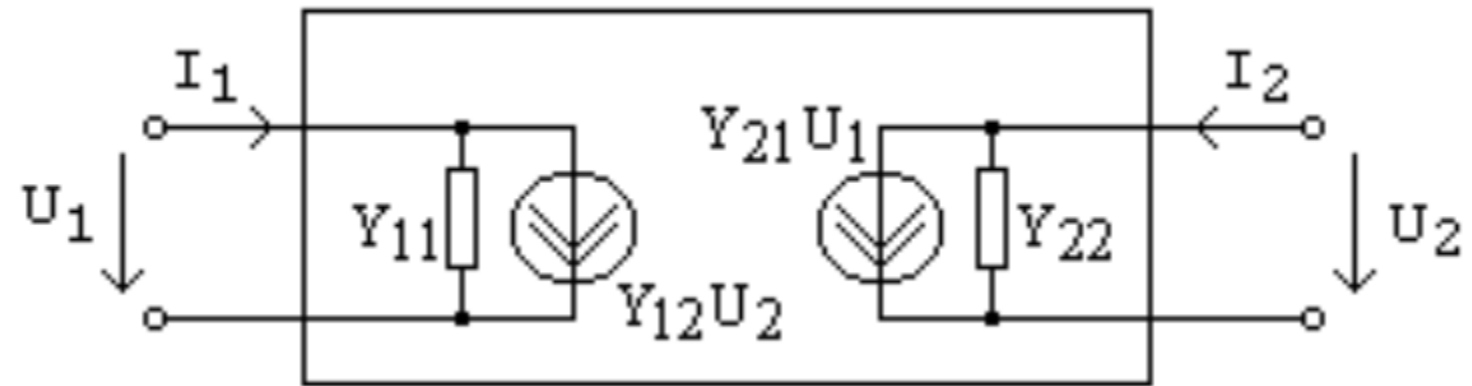
$$G_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{I_2=0}$$

$$G_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{U_1=0}$$

$$G_{21} = \left. \frac{U_2}{U_1} \right|_{I_2=0}$$

$$G_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{U_1=0}$$





Символы, используемые для введения понятий, относящихся к четырехполюсникам, отмеченные заглавными буквами, соответствуют постоянным значениям величин напряжения и тока. Однако этот тип модели применим к любой линейной цепи. В частности, интересны следующие частные случаи:

- постоянный синусоидальный режим, в котором рассматриваемые величины являются либо действующими значениями, либо амплитудами сигналов с клемм. Обозначения сохранены;

- режим малых периодических отклонений по сравнению со значениями из статического режима, в котором рассматриваемые величины являются амплитудами отклонений. В этом случае символы параметров четырехполюсника и индексы переменных размеров обычно выделяются строчными буквами.

## Динамический режим биполярного транзистора

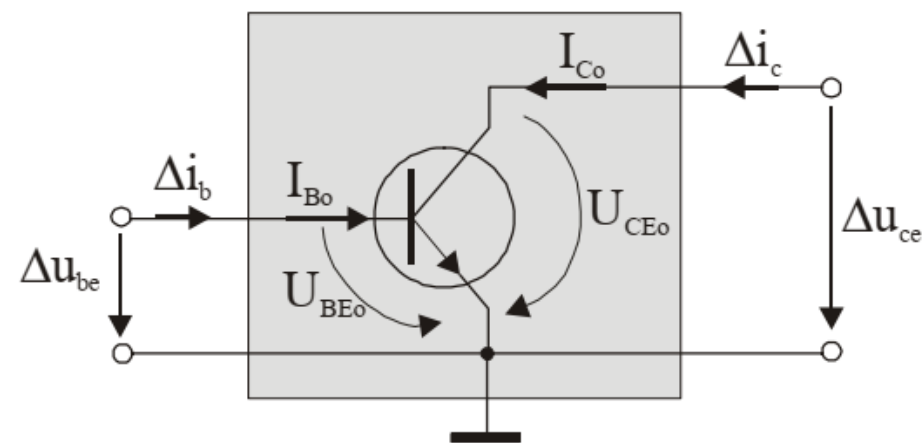
Мы видели, что биполярный транзистор можно рассматривать как квадруполь для соединения с общим эмиттером. -статическая рабочая точка. Таким образом, потенциалы из-за переменного поля, определяемого входным сигналом, также будут перекрывать статические (фиксированные) потенциалы. Транзистор будет одновременно работать в двух режимах: статическом, который мы проанализировали ранее, и динамическом. Анализ динамических режимов - сложная задача. Однако его можно упростить, если мы сделаем следующие предположения :

- на протяжении всего приложения переменного сигнала на входе рабочая точка не покидает участок передаточной характеристики, соответствующий активной рабочей области.
- на этом участке передаточная характеристика линейна.

Итак, модель, которую мы представим дальше, является линейной.

Транзистор типа pnp в соединении с общим эмиттером, рассматриваемый как квадруполь.

Мы предполагаем, что он был смещен по постоянному току в статической рабочей точке в активной зоне, характеризуемой значениями:  $U_{BE0}$ ,  $I_{B0}$ ,  $U_{CE0}$  и  $I_{C0}$ . Мы также предполагаем, что на входе квадруполя в какой-то момент возникает изменение напряжения между базой и эмиттером транзистора,  $\Delta u_{be}$ , из-за приложенного сигнала. Направление стрелки указывает на то, что в рассматриваемый момент переменный потенциал базы выше, чем у эмиттера. Увеличение потенциала добавляется к статическому потенциалу базы, что вызывает увеличение тока базы на величину  $\Delta i_b$ . Увеличение базового тока увеличит ток коллектора на величину  $\Delta i_c$  и соответствующая вариация,  $\Delta u_{ce}$ , напряжения коллектор-эмиттер.



Будем рассматривать, как и в случае определения статических параметров, как независимые переменные ток базы и напряжение коллектор-эмиттер, так что у нас будут функции:

$$u_{be} = u_{be}(i_b, u_{ce})$$

$$i_c = i_c(i_b, u_{ce})$$

Дифференцируя две функции, получаем :

$$\Delta u_{be} = \frac{\partial u_{be}}{\partial i_b} \Delta i_b + \frac{\partial u_{be}}{\partial u_{ce}} \Delta u_{ce}$$

$$\Delta i_c = \frac{\partial i_c}{\partial i_b} \Delta i_b + \frac{\partial i_c}{\partial u_{ce}} \Delta u_{ce}$$

На основе приведенных выше уравнений параметры  $h$  или гибридные параметры определяются для динамического режима биполярного транзистора. :

$$h_{11} = \left. \frac{\partial u_{be}}{\partial i_b} \right|_{\Delta u_{ce}=0}$$

$$h_{12} = \left. \frac{\partial u_{be}}{\partial u_{ce}} \right|_{\Delta i_b=0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{\partial i_c}{\partial i_b} \right|_{\Delta u_{ce}=0}$$

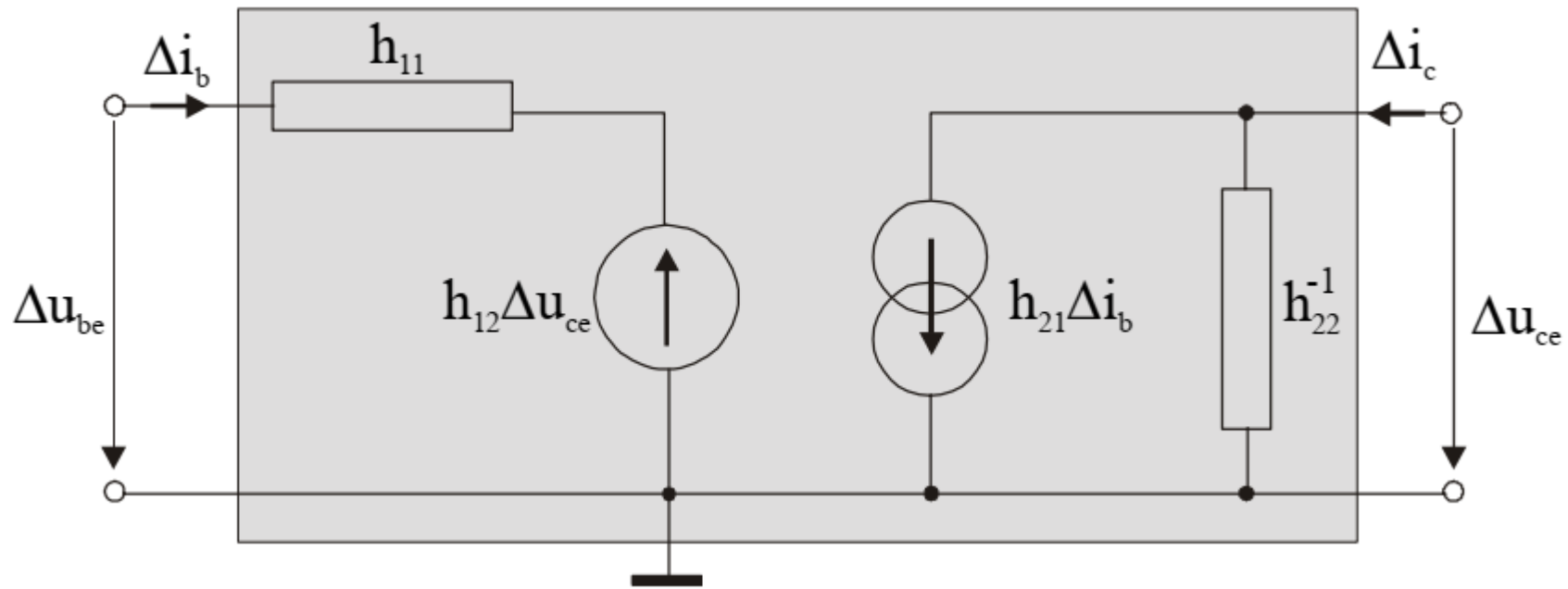
$$h_{22} = \left. \frac{\partial i_c}{\partial u_{ce}} \right|_{\Delta i_b=0}$$

Используя эти параметры, предыдущие уравнения становятся :

$$\Delta u_{be} = h_{11} \Delta i_b + h_{12} \Delta u_{ce}$$

$$\Delta i_c = h_{21} \Delta i_b + h_{22} \Delta u_{ce}$$

Два уравнения представляют собой применение законов Кирхгофа на входе, соответственно, на выходе квадрупольного транзистора. Исходя из них, можно построить эквивалентную электрическую схему



Анализируя эту схему и зная отношения определения гибридных параметров, можно установить их физическое значение.

Мы упоминаем их ниже вместе с их порядками величины. :

$h_{11}$  – **входной импеданс** при закороченном выходе, *сотни*  $\Omega$  -  $k\Omega$

$h_{12}$  – **Коэффициент передачи обратного напряжения** при входе без нагрузки,  $10^{-3} - 10^{-4}$

$h_{21}$  – **коэффициент динамического усиления по току** при закороченном выходе,  $10^1 - 10^2$

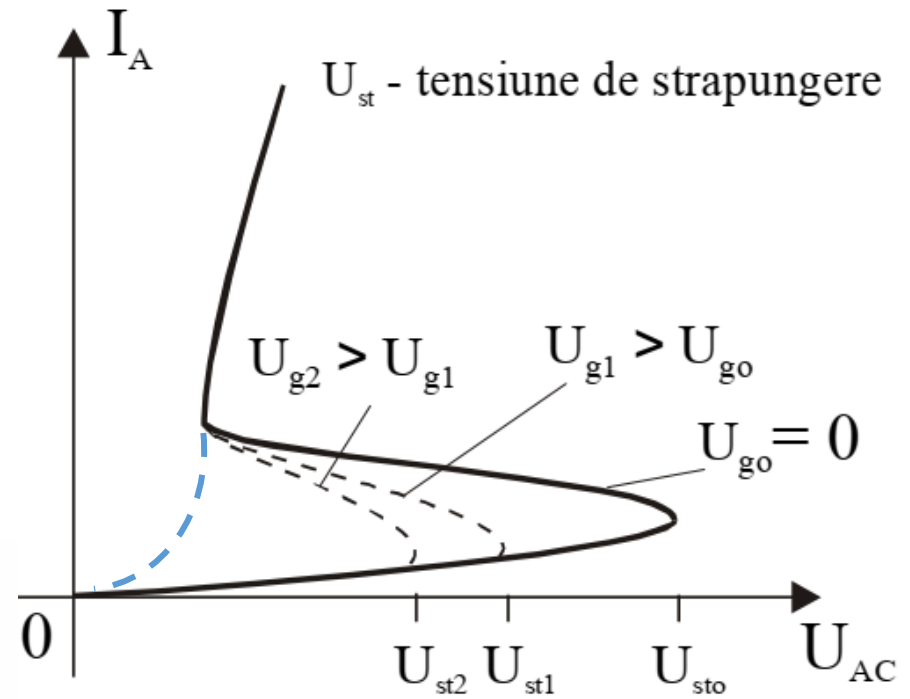
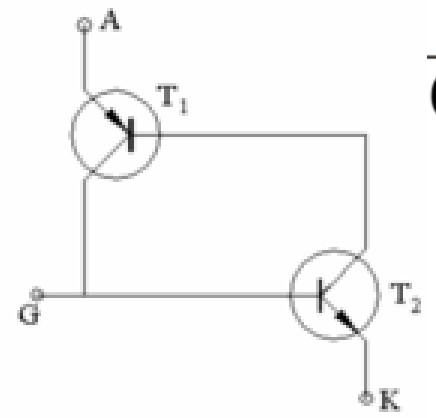
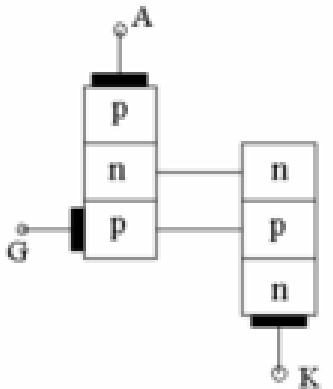
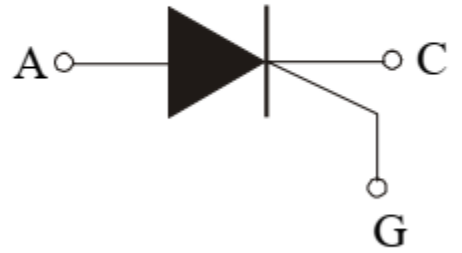
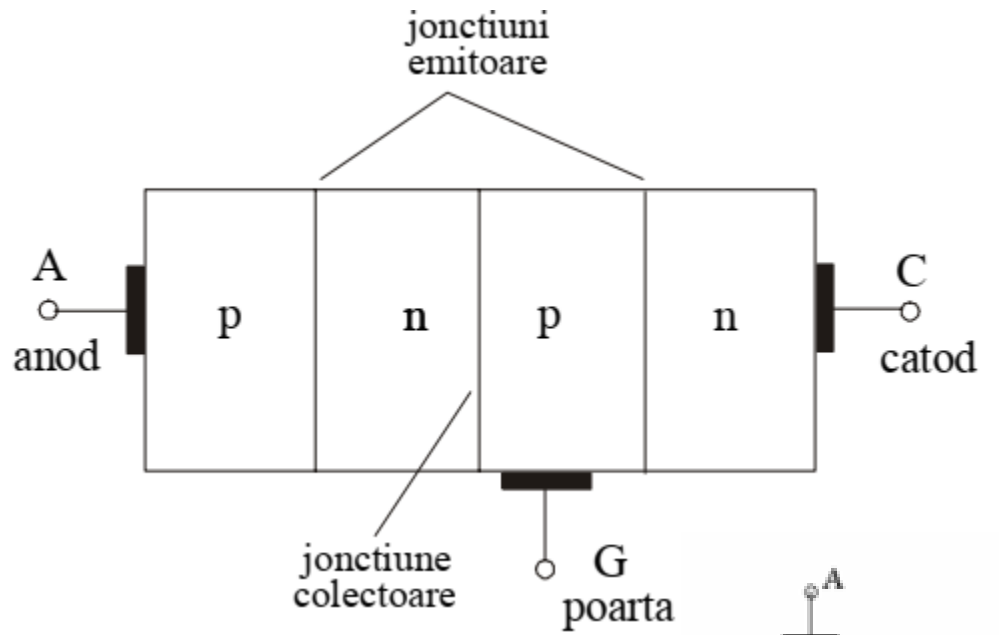
$h_{22}$  – **выходной адмитанс** при входе без нагрузки,  $h_{22}^{-1} \approx 10^5 \Omega$

параметры  $h$  являются характеристическими величинами для каждого типа транзисторов, и они указаны в каталогах компаний-производителей. Зная их конкретные значения, для анализа динамического режима цепи, содержащей транзистор, мы можем заменить его представленной схемой, получив эквивалентную схему всей схемы. Эта схема будет содержать только простые элементы схемы (источники тока и напряжения, резисторы, конденсаторы, катушки), поведение которых мы знаем и можем провести теоретический анализ поведения схемы..

# Другие типы биполярных транзисторов **Тиристор** (SCR – Silicon Controlled Rectifier)

Тиристор представляет собой многопереходное устройство.

Две дополнительные транзисторные структуры, наложенные друг на друга так, что коллекторные переходы являются общими. Он имеет три вывода, которые называются анодом, катодом и затвором. Затвор является элементом управления работой тиристора. Может быть поляризованным или нет

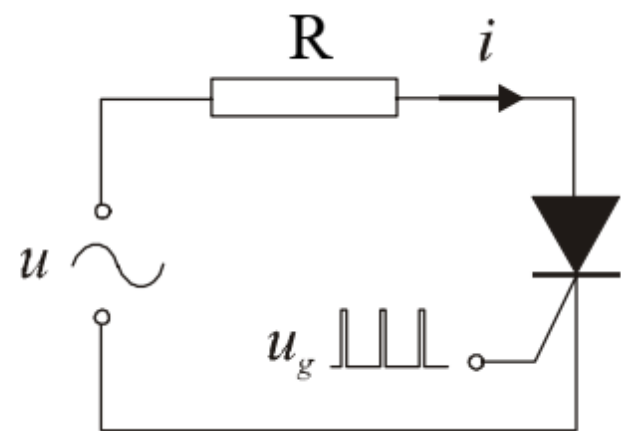


Если анод положительно поляризован по отношению к катоду, а затвор неполяризован, излучающие переходы поляризованы напрямую, а коллекторный переход - обратно поляризован. Будучи обратно поляризованным, коллекторный переход будет иметь высокое сопротивление прохождению носителей заряда, так что при малых значениях напряжения между анодом и катодом,  $U_{AK}$ , ток через полупроводниковую структуру будет очень небольшим. Поскольку  $U_{AK}$  увеличения напряжения поляризации, обратное напряжение на стыке коллекторы также увеличивается и, при определенном значении этого, начинается лавина умножения носителей нагрузки. Это имеет последствия:

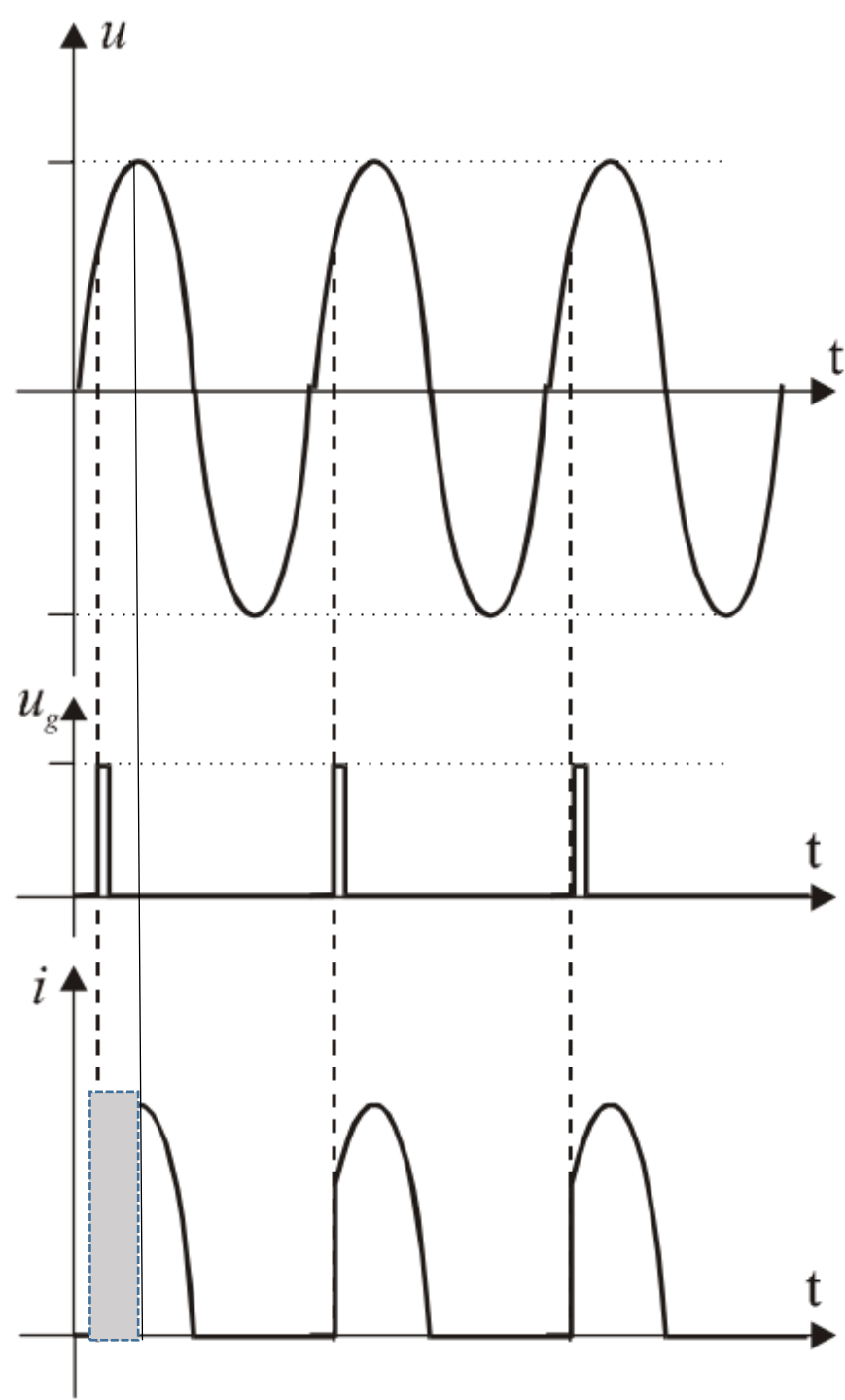
- уменьшение сопротивления коллекторного перехода
- внезапное увеличение тока между анодом и катодом

Чтобы это повышение не было неконтролируемым и привело к разрушению конструкции, в цепь смещения тиристора необходимо подключить токоограничивающий резистор.

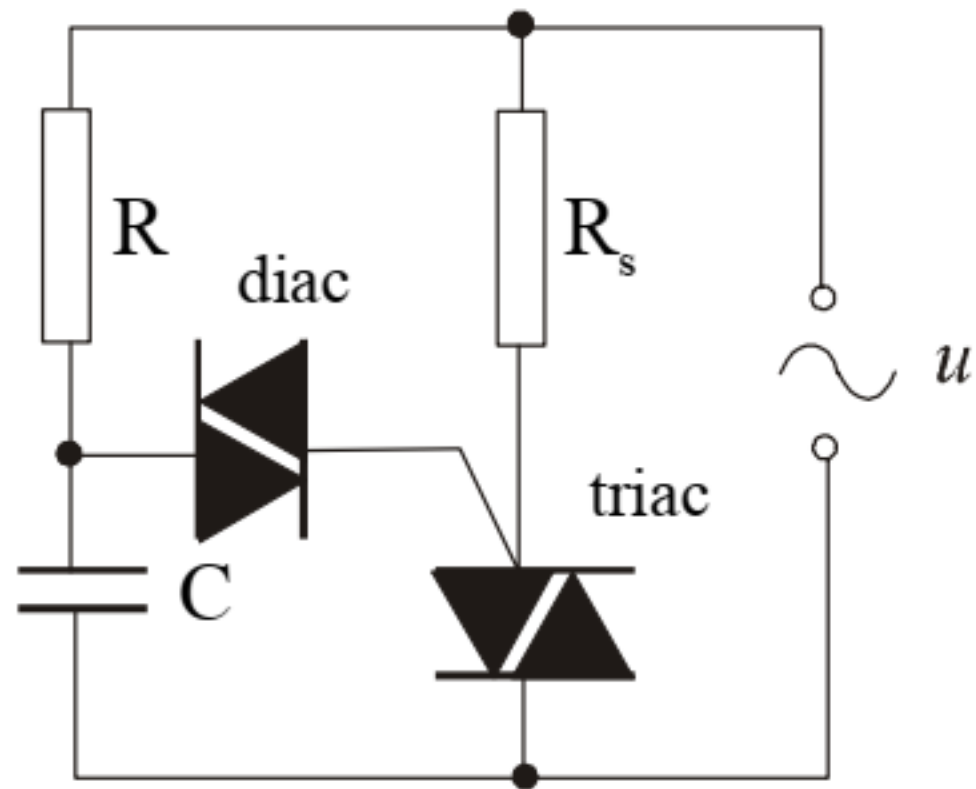
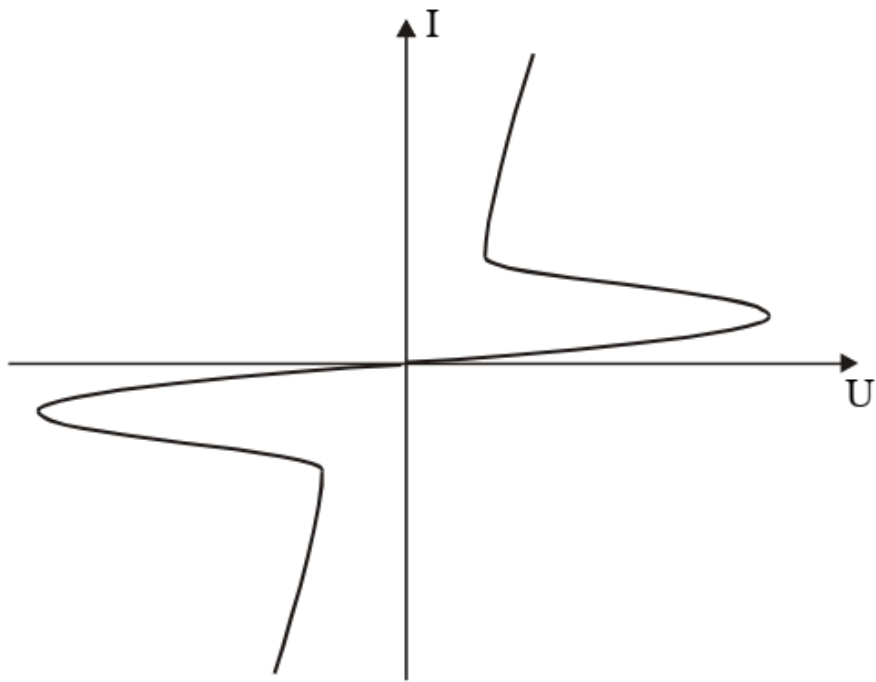
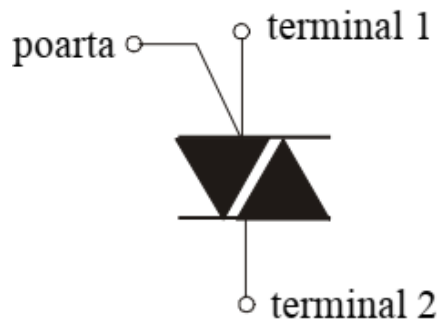
Напряжение, при котором начинается лавинное размножение носителей нагрузки, называется напряжением пробоя,  $U_{пр}$ . Если к затвору по отношению к катоду приложен положительный потенциал, чтобы генерировать ток затвора, тиристор начинает создавать напряжения, которые тем ниже, чем выше положительный потенциал затвора. Ток затвора намного ниже, чем ток между анодом и катодом, поэтому с помощью небольшого тока можно контролировать появление большого тока. Таким образом, можно сделать вывод, что тиристор - **это устройство, управляемое током.**



**a**



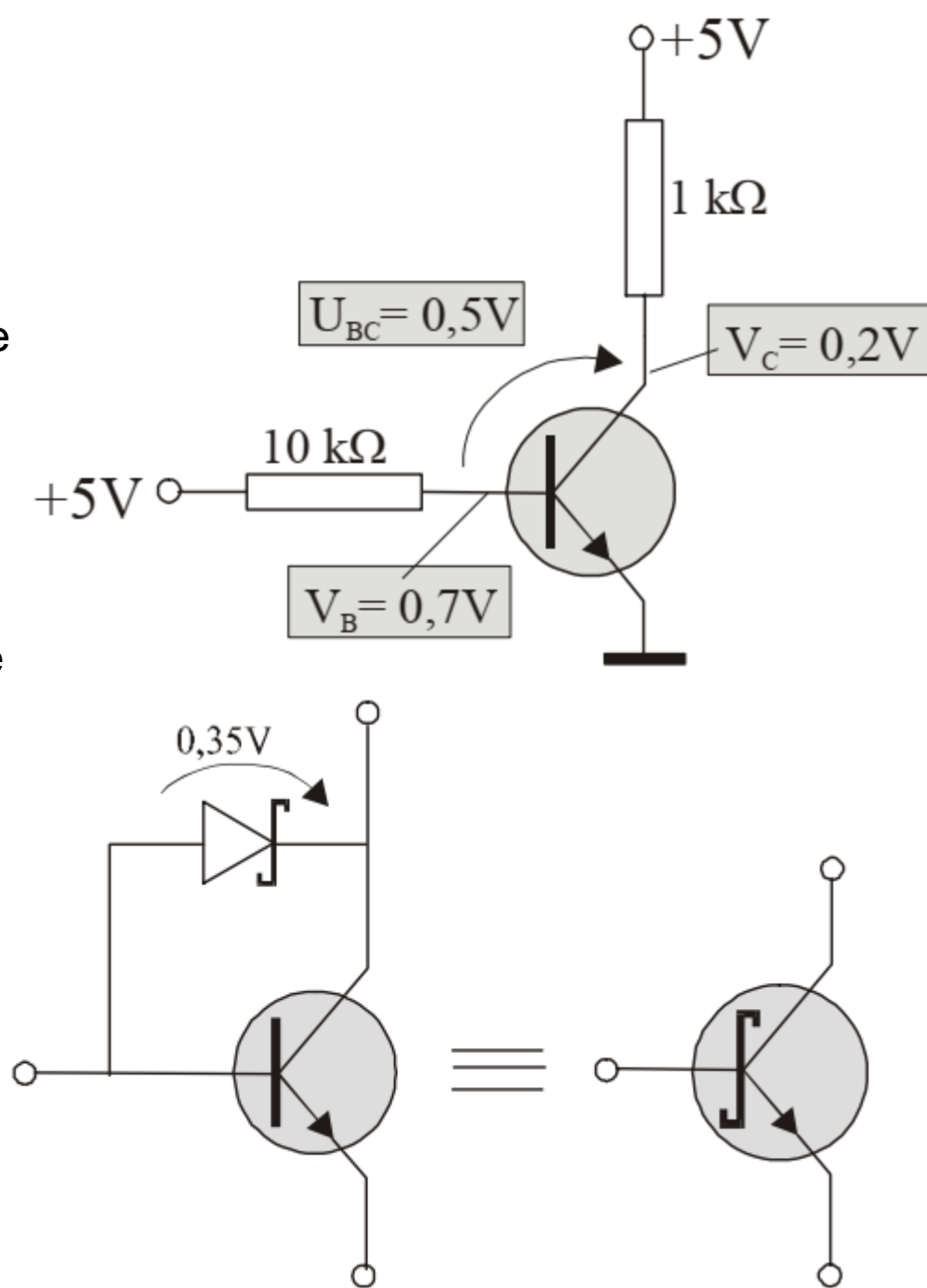
- **Симистор** Во многих приложениях требуется двустороннее управление альтернативным сигналом, как в положительном, так и в отрицательном чередовании. Для этого требуется тиристорное устройство, способное конденсироваться в обоих направлениях. Он может быть выполнен из двух встречно-параллельных структур тиристорного типа. Такое устройство называется **симистором**.





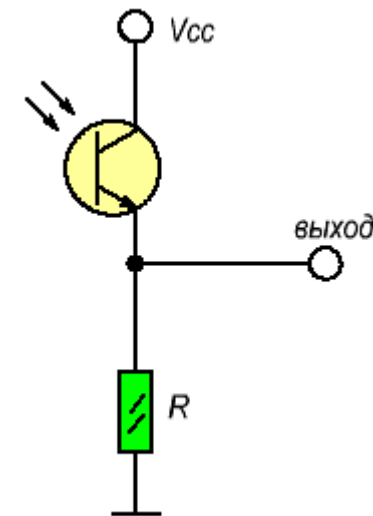
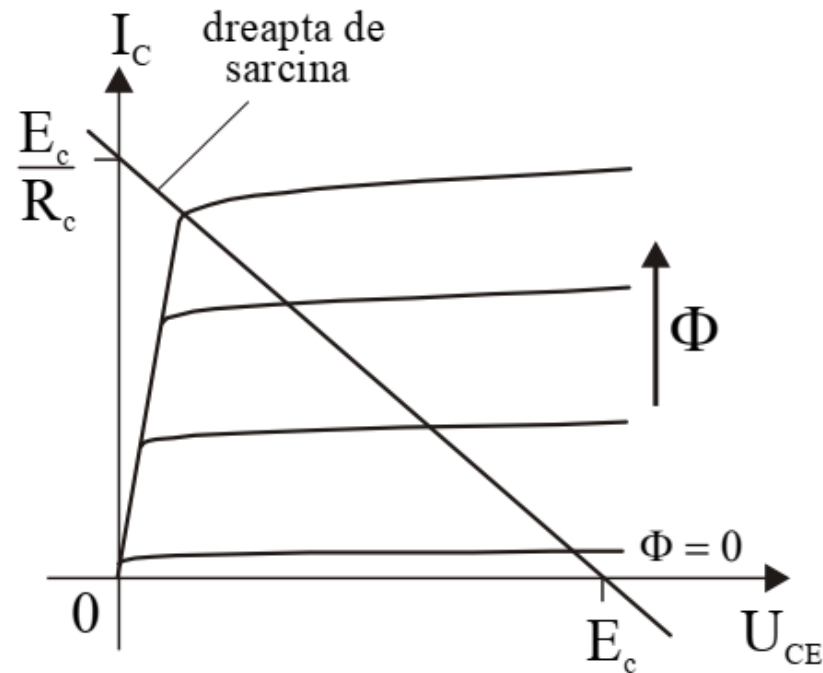
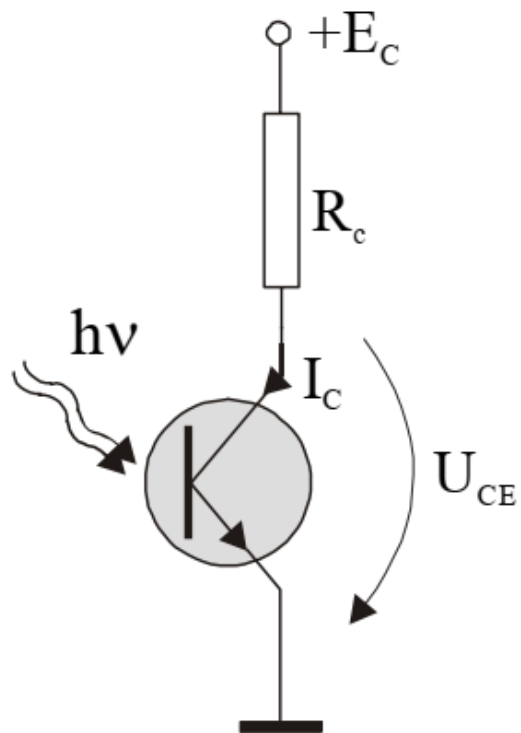
## • Транзистор Шоттки

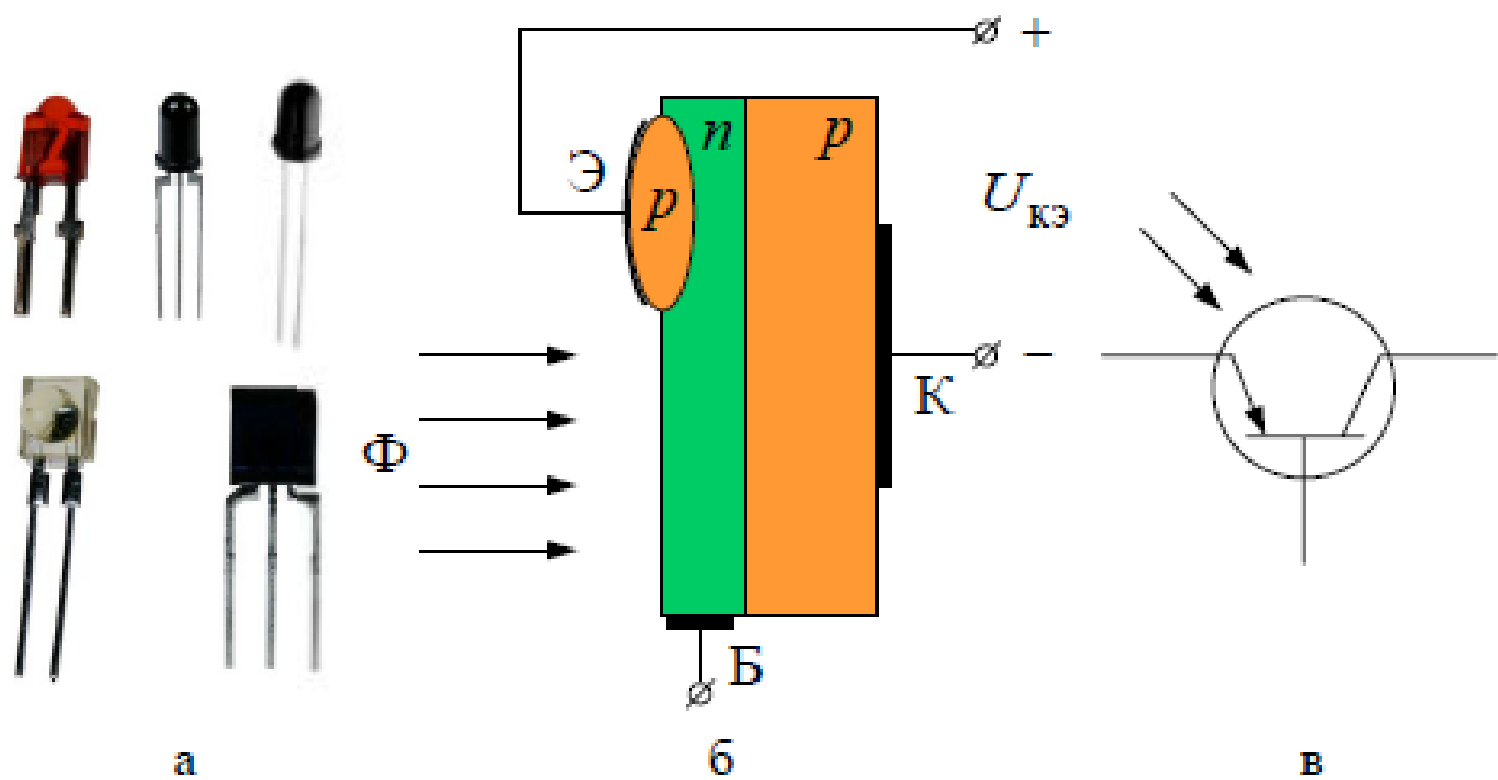
Время, необходимое для переключения из одного состояния в другое, называется **временем переключения**, и желательно, чтобы оно было как можно короче. Чем ниже напряжение прямого смещения перехода база-коллектор в режиме насыщения, тем меньше будет перераспределяться несущие нагрузки и тем короче время переключения. Уменьшение напряжения прямой поляризации перехода база-коллектор может быть выполнено, если между базой и коллектором будет сделана **полупроводниковая структура типа диода Шоттки**. Наличие диода Шоттки не позволит увеличить напряжение прямой поляризации перехода база-коллектор в режиме насыщения выше  $0,35\text{ В}$ , так что время переключения из состояния насыщения в состояние блокировки значительно уменьшится, а скорость переключения увеличится.



## • Фототранзистор

Принцип действия фототранзистора основан на внутреннем фотоэлектрическом эффекте: генерации электронно-пустых пар в полупроводнике под действием электромагнитного излучения с длиной волны видимого или ультрафиолетового диапазона. Если на полупроводник воздействует разность потенциалов, то по нему будет проходить ток, сила которого будет зависеть от величины падающего светового потока. Его интенсивность можно увеличить, используя свойство структуры транзистора усиливать ток. Фототранзистор представляет собой транзистор, область перехода эмиттер-база подвергается освещению, так что роль разности потенциалов между базой и эмиттером играет световой поток, падающий на излучающий переход. Генерация электронно-пустых пар способствует снижению потенциального барьера перехода и его открытию в большей или меньшей степени, в зависимости от количества падающих фотонов. Базовая клемма может отсутствовать или, если она есть, позволять дополнительный контроль тока коллектора.





**Рис. 6.21.** Конструкции фототранзисторов (а); структура (б) и условное графическое обозначение фототранзистора (в)

