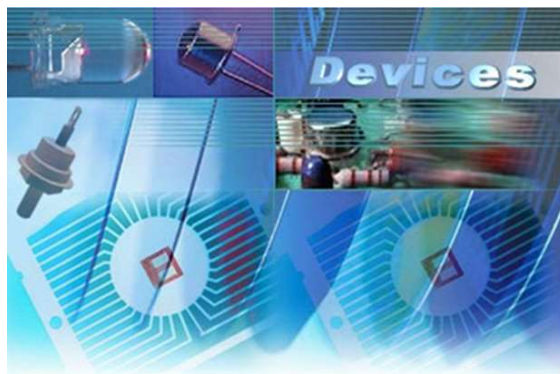




Биполярни транзистори



Полупроводникови
елементи

Откриване на транзистора

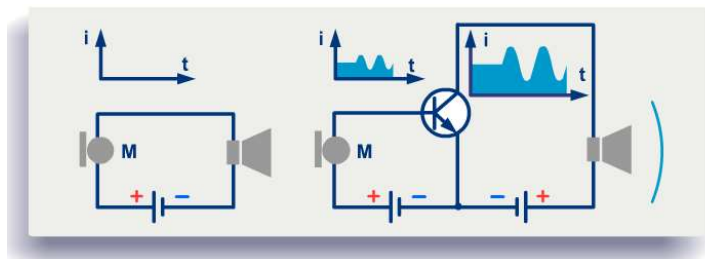


Първият транзистор (Ge с точков контакт) е открит в AT&T Bell Laboratories, 1947



Откриватели: William Shockley, Walter Brattain, и John Bardeen – носители на Нобелова награда по физика 1956

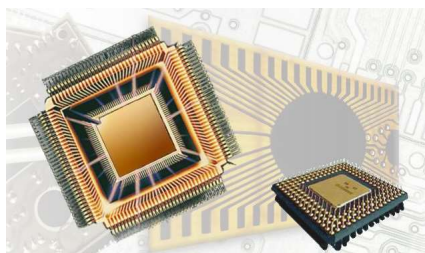
Основни свойства



Транзисторът е **активен** полупроводников елемент. Той позволява с много **малък входен сигнал** да се управлява значително **по-голям по амплитуда и мощност изходен сигнал**.

Биполярният транзистор е полупроводников елемент, предназначен за **усилване, управление и генериране** на електрически сигнали.

Предимства

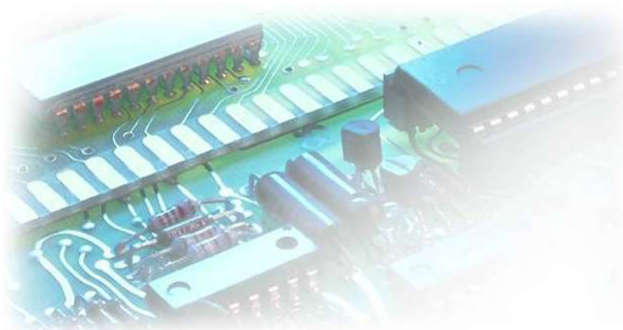


Биполярните транзистори заместват вакуумните електронни лампи. Техни основни предимства са:

- ⊕ твърдо тяло и малки размери
- ⊕ ниско топлинно излъчване
- ⊕ относително ниска консумирана мощност
- ⊕ висока надеждност.

Тези предимства позволяват **миниатюризацията** на сложни схеми и проправят път на развитие на **микроелектрониката**.

Приложения



Транзисторите се използват широко в електронно оборудване в области от джобни калкулатори до промишлени роботи и комуникационни спътници. В допълнение към приложението им като усилватели, те са основни компоненти в осцилаторите, цифровите и аналогови схеми.

Цели и предпоставки

Разглеждат се структурата, принципът на действие, характеристиките и параметрите на биполярните транзистори.

Познавате

Разбирате

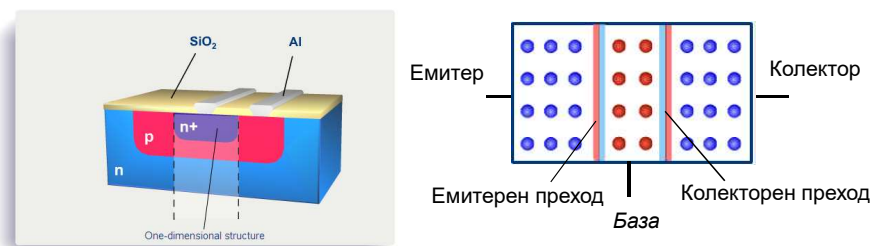
Анализирате

След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✦ Видовете транзистори и тяхната структура
- ✦ Схеми на включване на биполярния транзистор
- ✦ Режими на работа, характеристики и параметри
- ✦ Принципът на действие на транзистора
- ✦ Процесите, протичащи в областите на транзистора
- ✦ Значението на максимално допустимите параметри и областта за безопасна работа
- ✦ Връзката между токовете в транзистора
- ✦ Токовете и напреженията в схеми с транзистори

Предпоставки: полупроводников диод

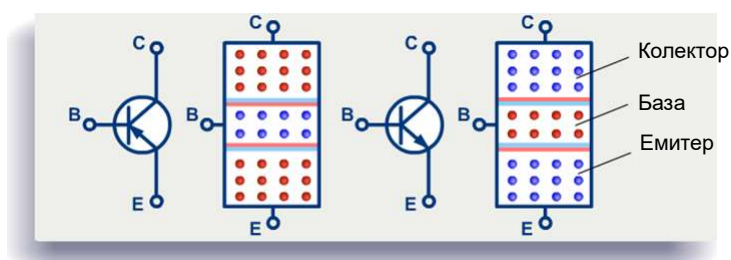
Структура на транзистора



Биполярният транзистор има 3 области: **емитер, база, и колектор**;

- ⊕ **Емитерът** е силно легиран и инжектира токоносителите
- ⊕ **Базата** управлява потока на токоносителите. Тя е много тънка.
- ⊕ **Колекторът** събира токоносителите от базата.

Типове и схемно означение



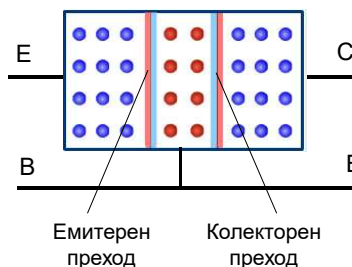
Съществуват два типа транзистори - **NPN** и **PNP**. Те имат един и същ принцип на действие, но се различават по поляритет на приложените напрежения на преходите и по посока на токовете.

Фигурата илюстрира схемните означения на транзисторите и връзката между електродите и структурата на транзистора. **Стрелката върху емитера показва посоката на тока** през елемента.

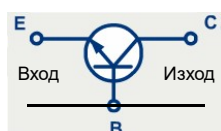
Режими на работа на транзистора

Според поляритета на напреженията, приложени към *pn* преходите, се различават четири режима на работа:

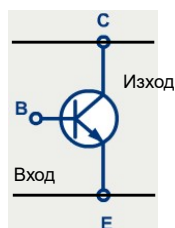
- ✦ **Активен-нормален режим**
емитерен преход – право включване
колекторен преход – обратно включване
- ✦ **Режим на отсечка**
емитерен преход – обратно включване
колекторен преход – обратно включване
- ✦ **Режим на насищане**
емитерен преход – право включване
колекторен преход – право включване
- ✦ **Инверсен-активен режим**
емитерен преход – обратно включване
колекторен преход – право включване



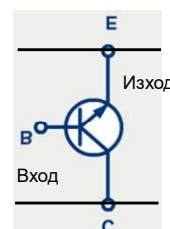
Схеми на включване



Обща база



Общ емитер

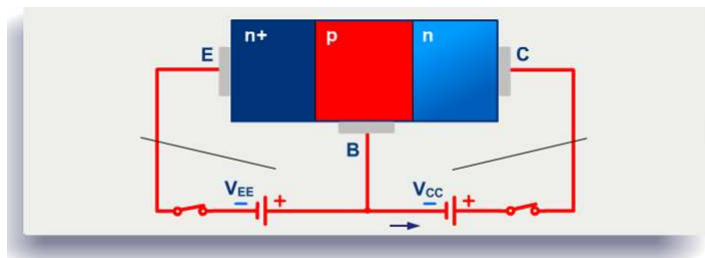


Общ колектор

В зависимост от това, кой от електродите в транзистора е **общ** между **входната**, и **изходната** верига се различават 3 схеми на свързване – обща база (ОБ), общ емитер (ОЕ) и общ колектор (ОК).

В схема **обща база**, базата е **обща** между входната и изходната вериги, докато в схема **общ емитер** емитерът е **общ** между входната и изходната вериги.

Схема обща база – активен режим

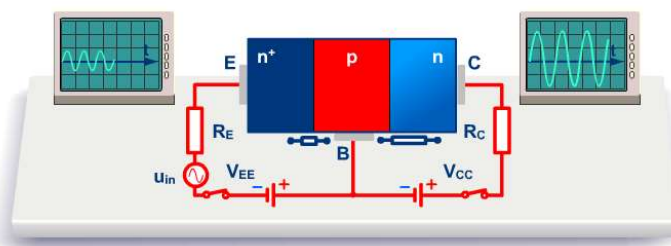


Биполярният транзистор нормално е запушен. За да започне да провежда ток, трябва на двата PN прехода да се подадат постоянни напрежения.

В **активен режим** емитерният преход се поляризира в права посока – т.е. минус на емитера спрямо базата (за *NPN* транзистор), а колекторният преход – в обратна (плюс на колектора спрямо базата).

За *PNP* транзистор, поляритетът на напреженията е противоположен.

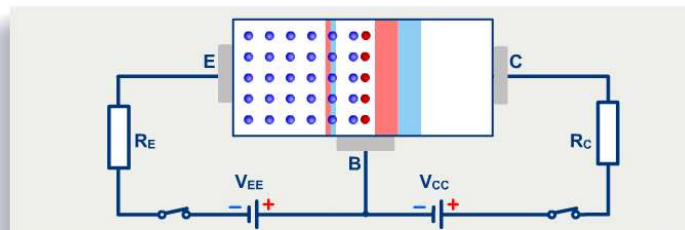
Принцип на действие



Принципът на действие на транзистора се основава на явленията, протичащи в два близко разположени и **взаимодействащи си** PN прехода.

Наименованието "**transistor**" произтича от (**transfer + resistor**) – пренася ток от верига с ниско *R* на право включения емитерен преход към верига с много по-високото *R* на обратно включения колекторен преход.

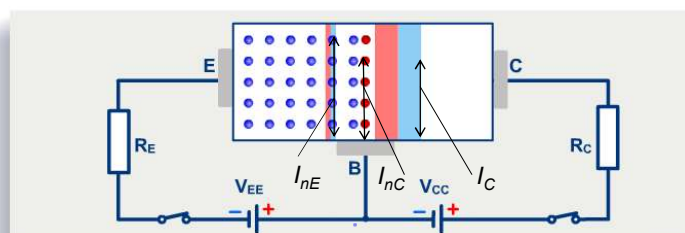
Физически процеси в емитера



Ако V_{EE} е по-голям от потенциалната бариера на емитерния преход, започва явлението **инжекция**. Тък като емитерът е по-силно легиран от базата, инжекцията е едностранен процес и токът през прехода се състои **предимно от електрони**.

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_E} < 1 \quad \text{Коефициент на инжекция}$$

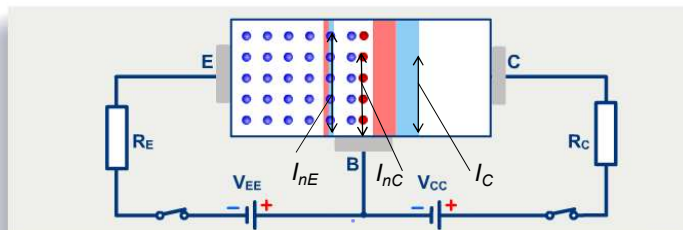
Физически процеси в базата



Електроните, навлизайки в P базата, са неосновни токоносителите там. Тък като базата е много тънка, незначителен брой електрони **рекомбинират** с дупки в базата и **по-голяма част** от тях достигат до колекторния преход.

$$\chi = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} < 1 \quad \text{Коефициент на пренасяне}$$

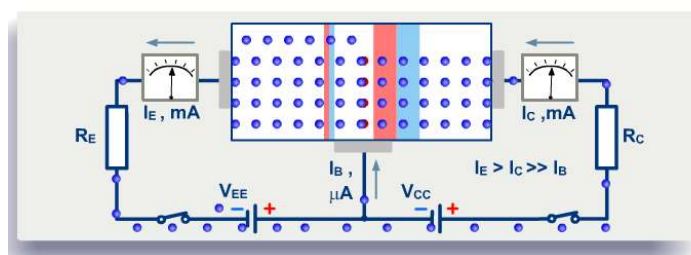
Физически процеси в колектора



Неосновните токоносители, достигнали до колектора, се **екстрахират** от обратно включения колекторен преход в областта на колектора и преминават в колекторната верига. Ако настъпи лавинен пробив те се умножават в прехода. При липса на пробив $M = 1$.

$$I_C = MI_{nC} \quad M - \text{коэффициент на лавинно умножение}$$

Колекторен ток



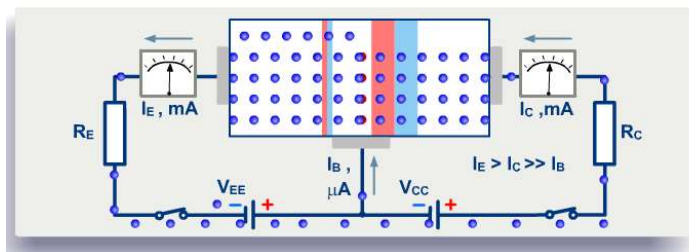
$$I_C = MI_{nC} = M\chi I_{nC} = M\chi\eta I_{nE} = \alpha I_E$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$\alpha = \eta\chi M$$

Коефициент на предаване по ток в схема ОБ

Токове в транзистора



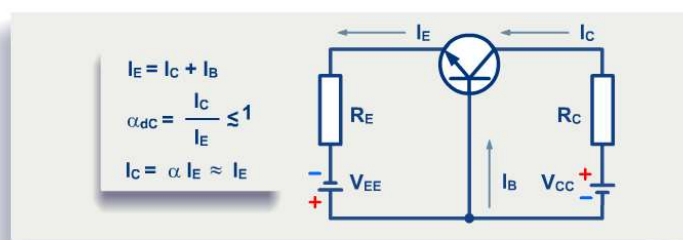
В транзистора има три тока:

$$I_E > I_C \gg I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

- ✦ **Емитерният ток** е **най-големият** ток, защото е източник на свободни електрони
- ✦ **Колекторният ток** е приблизително равен на емитерния, но **по-малък** от него.
- ✦ **Базисният ток** е **най-малкият**. I_B се измерва в микроампери.

Връзка между токовете в схема ОБ



$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \lesssim 1$$

$$I_C = \alpha I_E \approx I_E$$

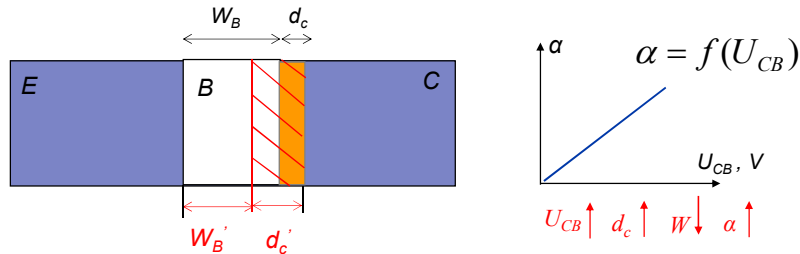
$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E} < 1$$

Уравнение на колекторния ток в схема ОБ

Влияние на U_{CB} – ефект на Early

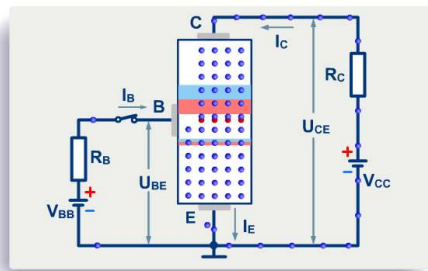


$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} + \frac{U_{CB}}{r_C} \quad I_C = f(U_{CB})$$

Уравнение на колекторния ток в схема ОБ с отчитане влиянието на U_{CB}

$$r_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} = \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \neq \infty \quad \mu_{EC} = - \left. \frac{dU_{EB}}{dU_{CB}} \right|_{I_E = const}$$

Схема общ емитер



Принципът на действие на транзистора не зависи от схемата на включване.

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

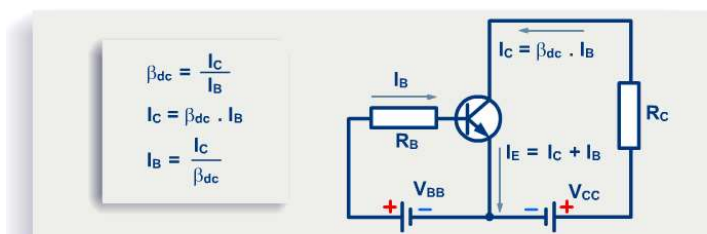
$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} = \alpha(I_C + I_B) + I_{CB0} = \alpha I_C + \alpha I_B + I_{CB0}$$

$$I_C(1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CB0} \quad I_C = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_B + \frac{1}{(1 - \alpha)} I_{CB0}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0}$$

Връзка между токовете в схема ОЕ

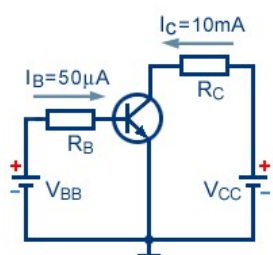


$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0} \quad \text{Ако } I_B = 0, \quad I_C = I_{CE0} \quad I_{CE0} = (1 + \beta) I_{CB0}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad \beta = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \gg 1$$

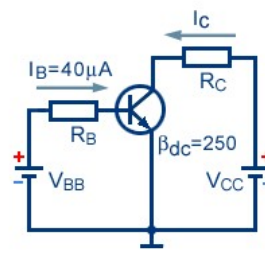
Отношението на колекторния към базисния ток се нарича **коэффициент на усилване по ток** в схема ОЕ, и се означава като β_{dc} или h_{FE} .

Примери



$$\beta = ?$$

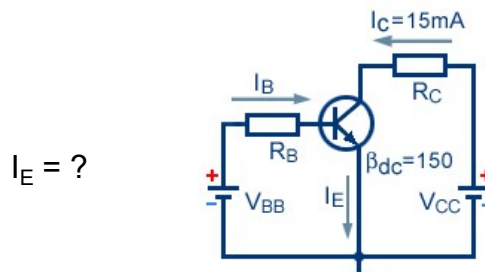
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 0.2 \cdot 10^3 = 200$$



$$I_C = ?$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 250 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 10 \text{ mA}$$

Примери

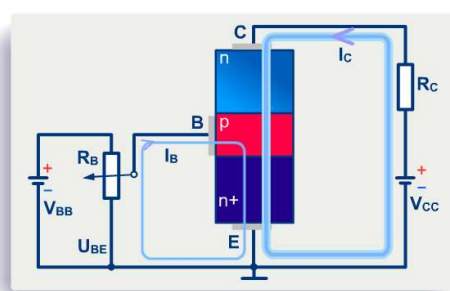


$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{150} = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.1 \text{ mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = 15 \cdot 10^{-3} + 0.1 \cdot 10^{-3} = 15.1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 15.1 \text{ mA}$$

Коефициент на усилване по ток



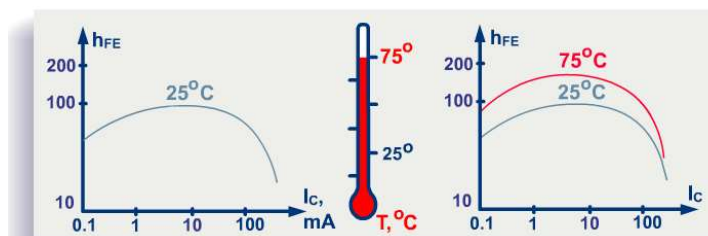
Коефициентът на усилване по ток в схема ОЕ е **много голям**, тъй като $I_C \gg I_B$.

За маломощни транзистори, β_{dc} типично е от 100 до 300.

Малка промяна на базисния ток в транзистора предизвиква голямо увеличение на колекторния ток.

Транзисторът в схема ОЕ има голямо **усилване по ток**, голямо **усилване по напрежение** и следователно **голямо усилване по мощност**.

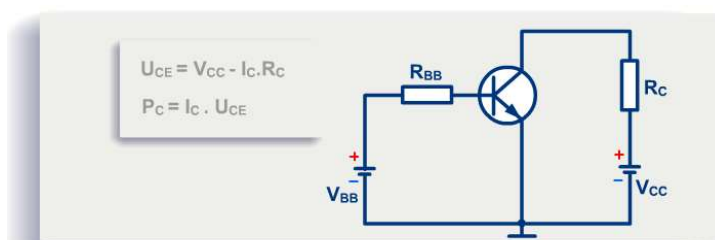
Изменение на β



Коефициентът на усилване по ток β се променя в широки граници при изменение на колекторния ток, температурата и при смяна на транзистора.

Поради производствените толеранси, коефициентът на усилване по ток може да варира в диапазон 3:1 при замяна с транзистор от същия тип.

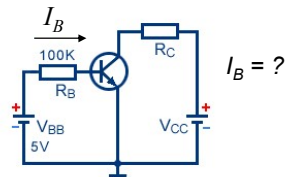
Токове и напрежения



$$E_{BB} = U_{BE} + I_B R_B \quad I_B = \frac{E_{BB} - U_{BE}}{R_B}$$

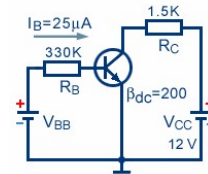
$$U_{CE} = E_{CC} - I_C R_C \quad I_C = \frac{E_{CC} - U_{CE}}{R_C} \quad I_E = I_C + I_B$$

Примери



$$I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{100 \cdot 10^3} = 0,047 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 47 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 47 \mu\text{A}$$

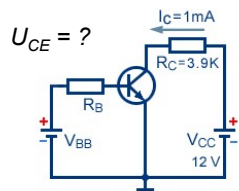
$U_{CE} = ?$



$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 200 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 5 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 12 - 7,5 = 4,5 \text{ V}$$



$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,9 \cdot 10^3 = 12 - 3,9 = 8,1 \text{ V}$$

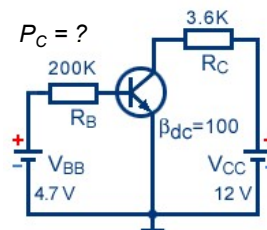
Примери

$$P_C = I_C \cdot U_{CE}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_B}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$



$$I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4,7 - 0,7}{200 \cdot 10^3} = 0,02 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,02 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 12 - 7,2 = 4,8 \text{ V}$$

$$P_C = I_C \cdot U_{CE} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,8 = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 9,6 \text{ mW}$$

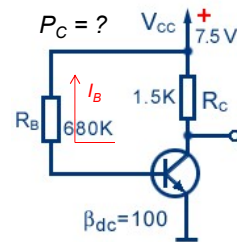
Примери

$$P_C = I_C \cdot U_{CE}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$



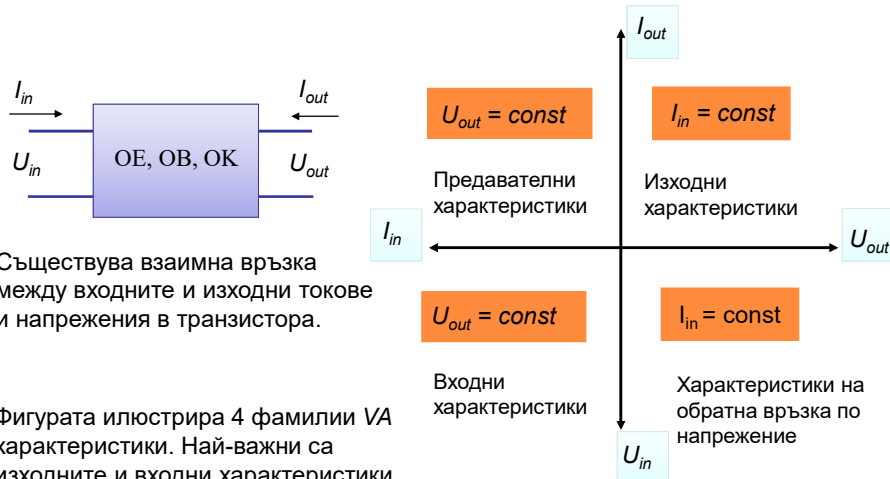
$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{7.5 - 0.7}{680 \cdot 10^3} = \frac{6.8}{680 \cdot 10^3} = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.01 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

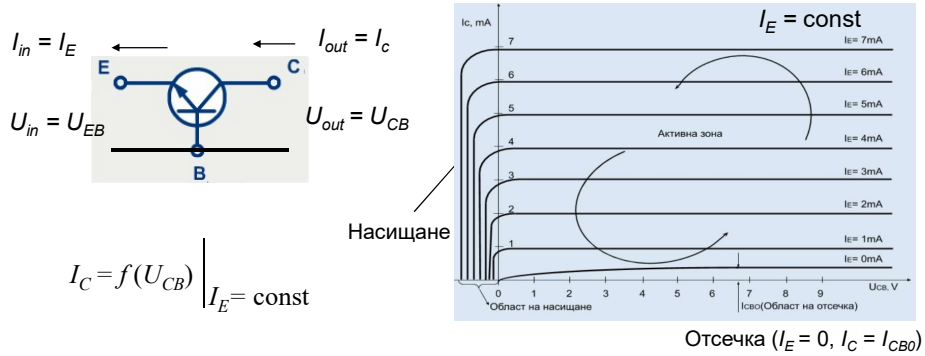
$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 7.5 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 7,5 - 1,5 = 6 \text{ V}$$

$$P_C = I_C \cdot U_{CE} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 6 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 6 \text{ mW}$$

VA характеристики

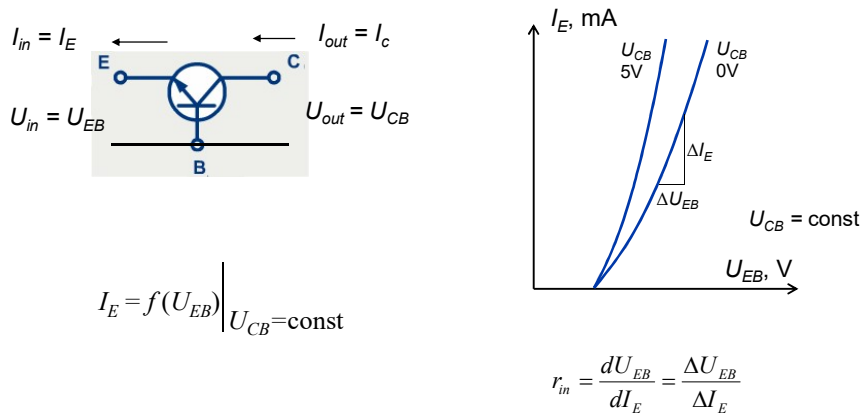


ОБ – изходни характеристики

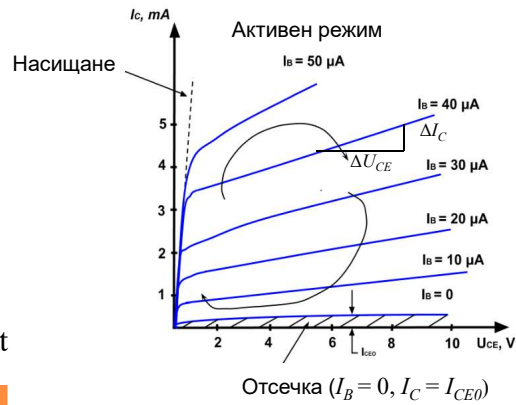
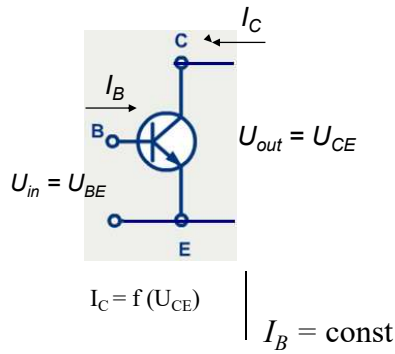


$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} + \frac{U_{CB}}{r_C} \quad \alpha = f(I_E) \quad r_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} \Big|_{I_E = \text{const}}$$

ОБ – входни характеристики



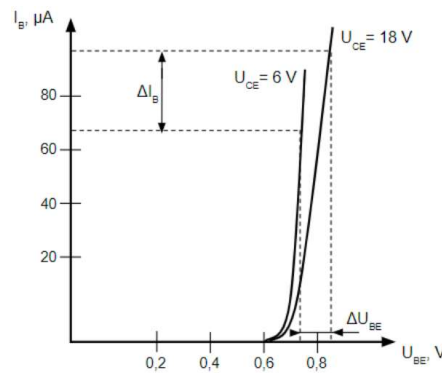
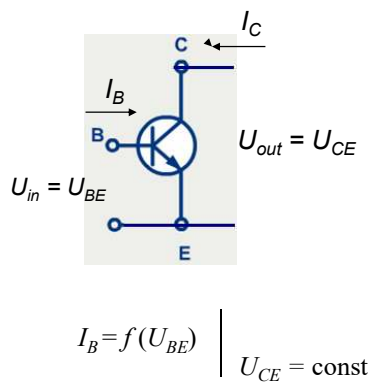
ОЕ – изходни характеристики



$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} + \frac{U_{CE}}{r_C^*}$$

$$\beta = f(I_C) \quad r_C^* = \frac{dU_{CE}}{dI_C} = \frac{r_C}{1 + \beta}$$

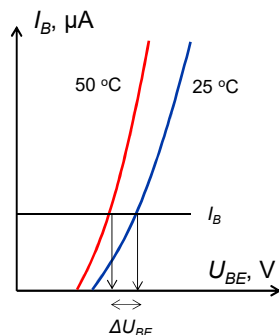
ОЕ – входни характеристики



$$r_{in} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

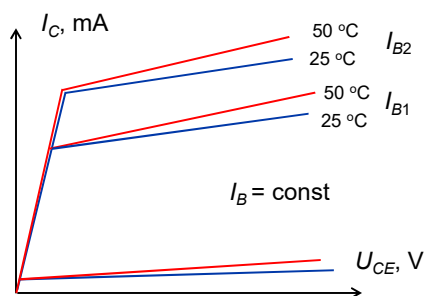
Влияние на температурата

$$TKU_{BE} < 1$$



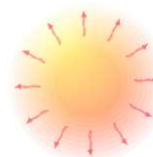
$$I_{CE0} = (1 + \beta)I_{CB0}$$

$$\beta = f(T)$$



Транзисторът в схема **ОЕ** е по-силно зависим от температурата спрямо схема **ОБ** защото I_{CE0} и β се увеличават по-бързо с температурата отколкото I_{CB0} и α .

Максимално допустими параметри



Максимално допустимите параметри определят границите на токове, напрежения, мощности и други величини в транзистора, които не трябва да се надвишават, за да се гарантира надеждна експлоатация. Те се задават в каталозите от фирмите производители за всеки тип транзистор.

Тези параметри определят нивата, над които елементът се разрушава. Те не би трябвало дори да се доближават за всички режими на работа. В противен случай елементът може да не функционира нормално или да се съкрати срокът му за експлоатация.

Максимална мощност

✦ **Мах температура на прехода** $T_{Cmax} < T_i$, където $n = p = n_i$

✦ **Мах мощност в колектора** P_{Cmax}

$P = U_C I_C$ Мощност, отделена в колекторния преход

$$P = \frac{T_C - T_a}{R_{th}}$$

Мощност, разсеяна в околната среда

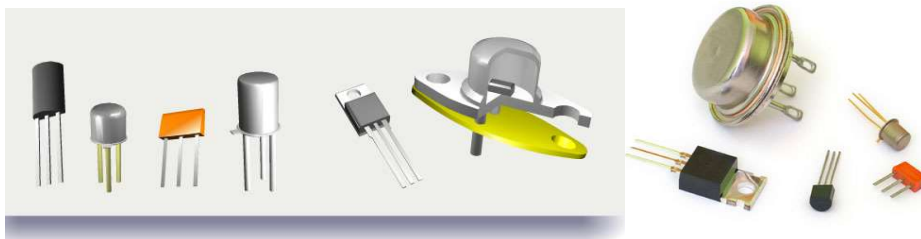
Когато се отделя мощност в колекторния преход, температурата му T_C се повишава. По-голяма мощност – по-висока температура.

$$UI = \frac{T_C - T_a}{R_{th}}$$

$$P_{Cmax} = \frac{T_{Cmax} - T_a}{R_{th}}$$

Отделената мощност трябва винаги да е по-малка от мах допустимата P_{Cmax} . В противен случай елементът се разрушава.

Отвеждане на топлината



Отделената в прехода топлина се отвежда през корпуса на транзистора.

Биполярните транзистори се срещат с пластмасови или метални корпуси според разсейваната от тях мощност.

Средномощните транзистори имат метална плоча до корпуса си. При мощните корпусът е метален за по-бързото разсейване на топлината.

Топлинно съпротивление

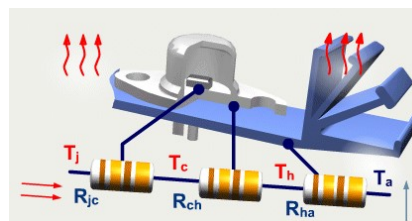
Топлинното съпротивление R_{th} показва ефективността при отделяне на топлината от транзистора и се измерва в K/W или в $^{\circ}C/W$.

$$R_{th} = R_{th_{jc}} + R_{th_{ca}} \quad R_{th_{ca}} \gg R_{th_{jc}} \quad P_{C \max} = \frac{T_{C \max} - T_a}{R_{th}}$$

Колкото **по-малко е топлинното съпротивление** толкова **по-голяма** е максимално допустимата мощност.

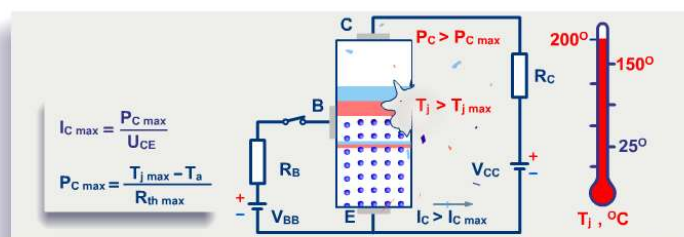
$$R_{th} = R_{th_{jc}} + R_{th_{ch}} + R_{th_{ha}}$$

Преход-корпус Корпус-радиатор Радиатор-околна среда



Радиатор

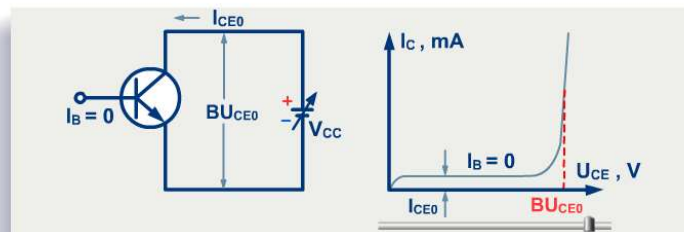
Максимален колекторен ток



Максималният колекторен ток $I_{C \max}$ показва максималният ток, който може да протече през транзистора без да се надвиши $P_{C \max}$.

$$U_{CE} I_{C \max} = P_{C \max} = \frac{T_{C \max} - T_a}{R_{th}}$$

Пробиви в транзистора

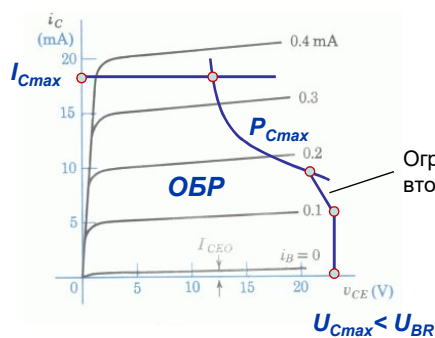


U_{BRCE0} представлява напрежението между емитера и колектора, при отворена база. Това е пробивното напрежение в схема ОЕ.

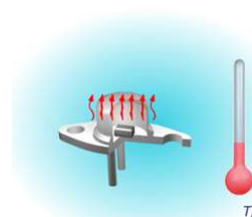
U_{BRCB0} представлява напрежението между колектора и база, при отворен емитер. Това е пробивното напрежение в схема ОЕ.

$$U_{BRCB0} > U_{BRCE0} \gg U_{BREB0}$$

Област на безопасна работа



Ограничение за вторичен пробив



Ако работната точка е избрана в областта на безопасна работа (ОБР), това гарантира, че по време на експлоатация няма да се надвишат максимално-допустимите параметри.

Влияние на температурата



С увеличаване на температурата границите на областта на безопасна работа се снижават.

Тестване на транзистора



Съпротивлението на PN преходите може да се провери с омметър – трябва да е малко при право включване и голямо при обратно. При тестване на транзистор този подход се използва за всеки от двата PN прехода.