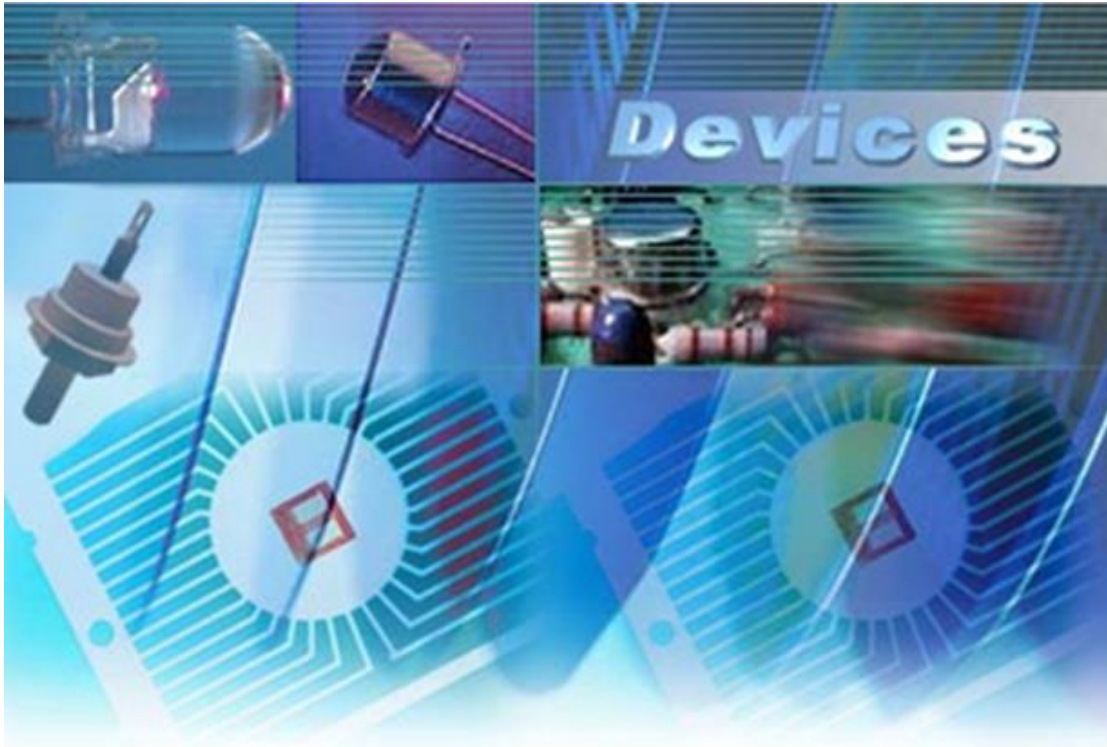




# *Биполярни транзистори*



Полупроводникови  
елементи

# Откриване на транзистора

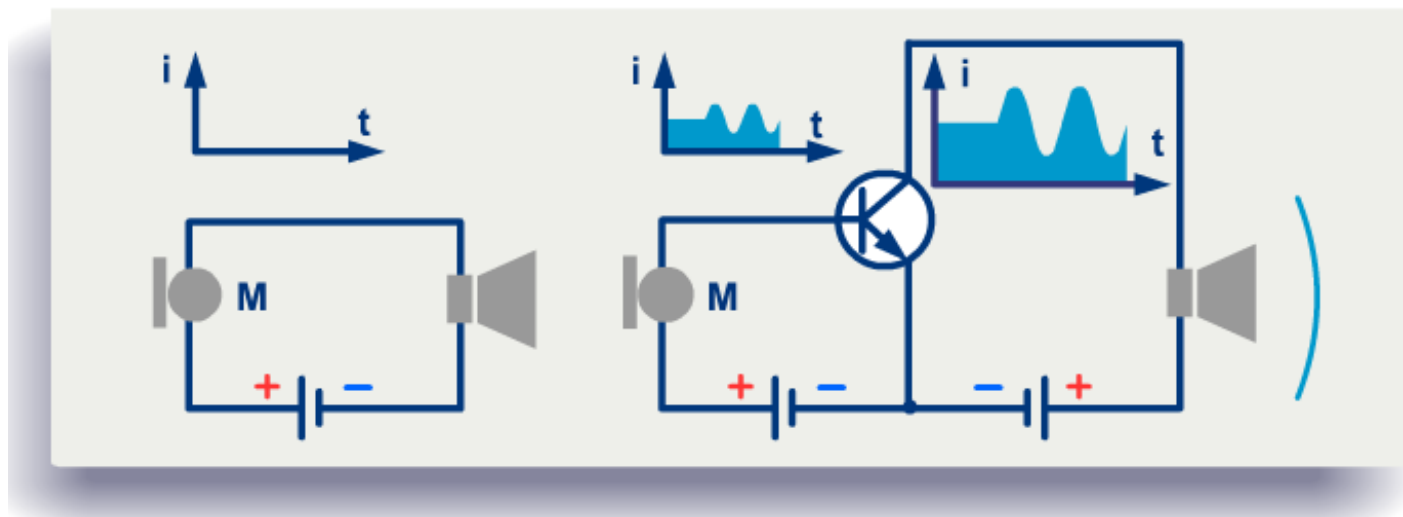


**Първият транзистор** (с точков контакт) е открит в AT&T Bell Laboratories



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

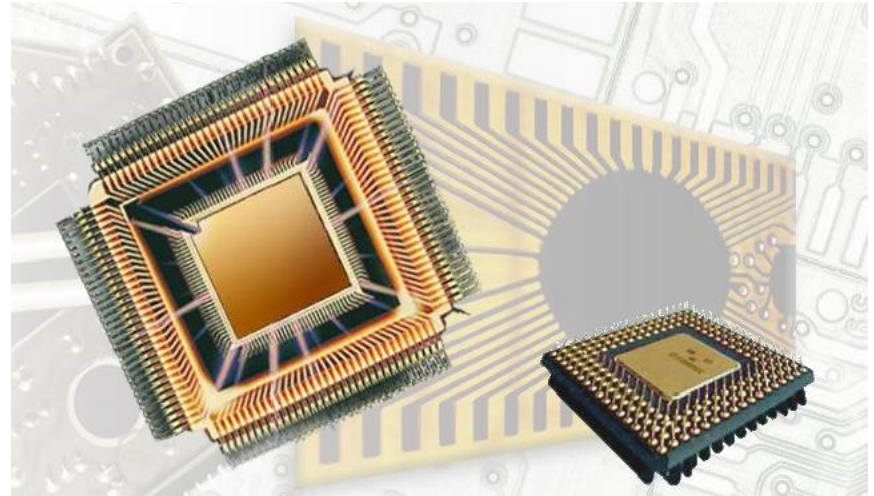
# Основни свойства



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



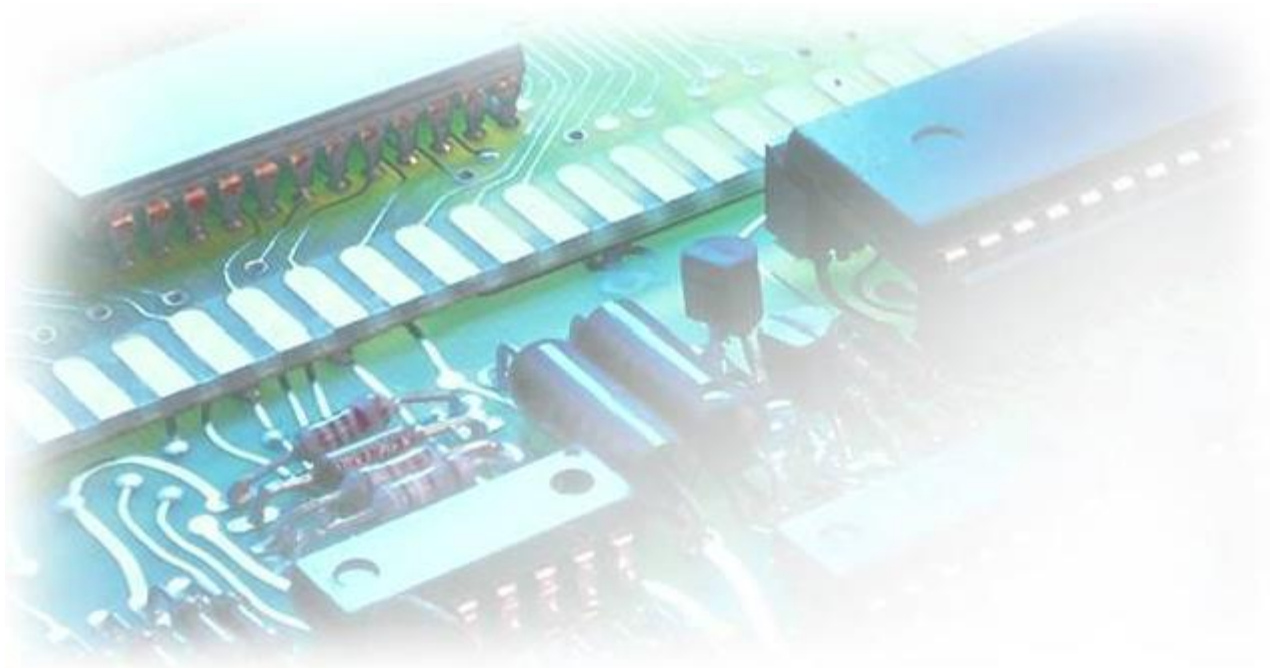
Биполярните транзистори заместват вакуумните електронни лампи.

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 работи 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**

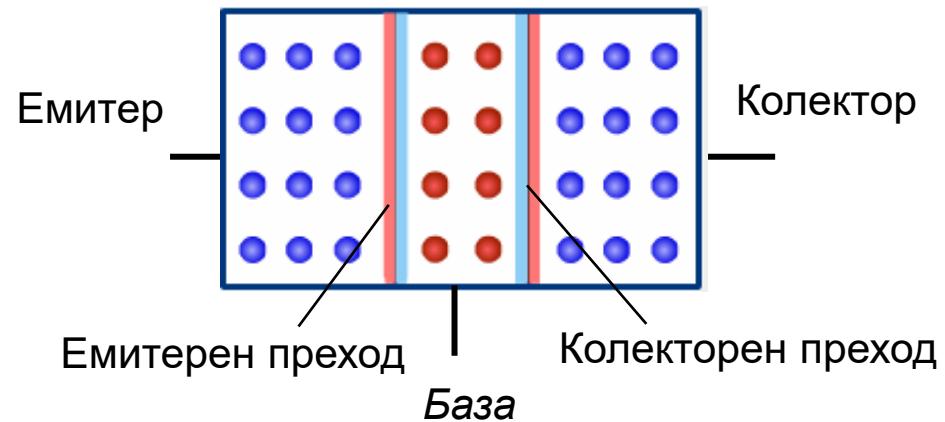
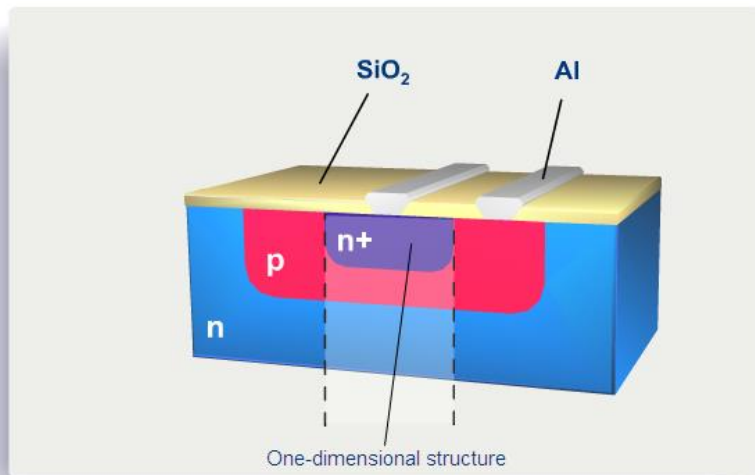
След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✚ 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



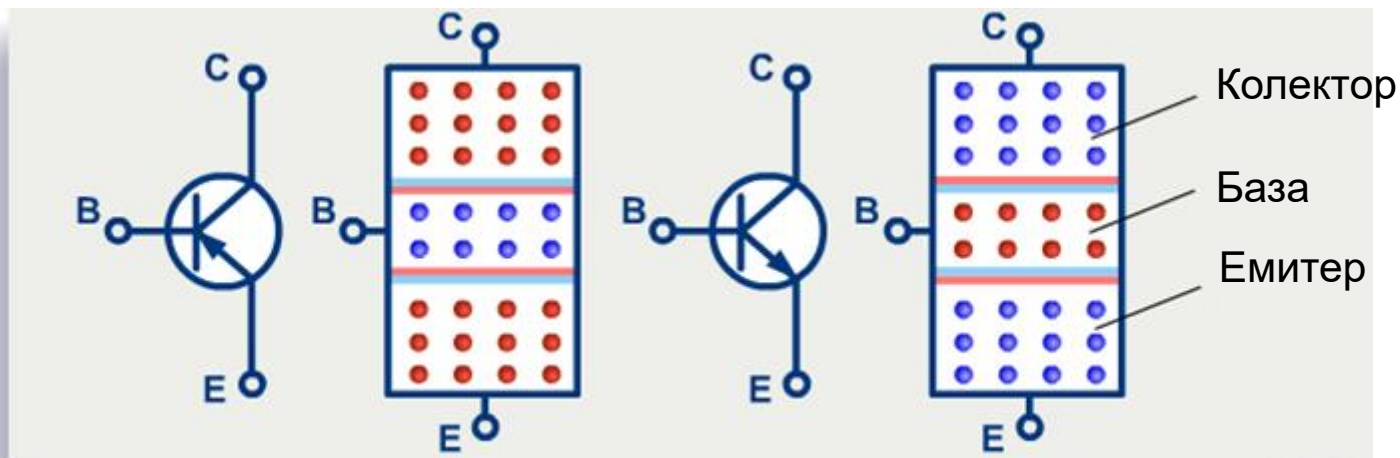
# Структура на транзистора



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

- ✚ **Емитерът** е силно легиран и инжектира токоносители
- ✚ **Базата** управлява потока на токоносители. 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.

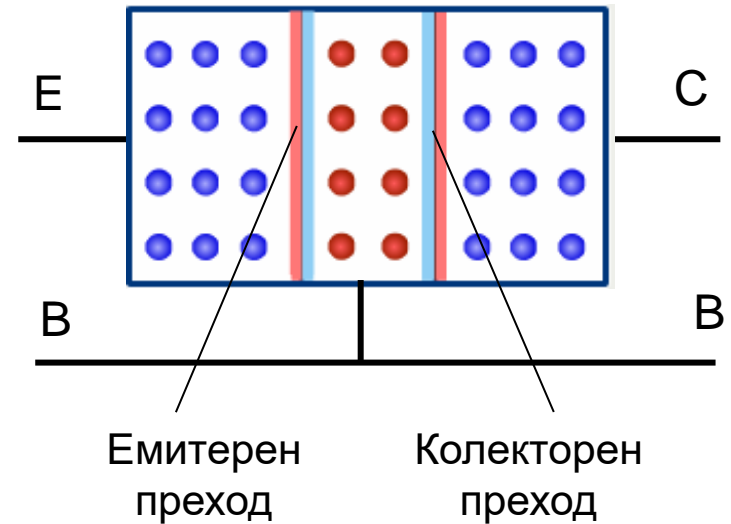
Фигурата илюстрира схемните означения на транзисторите и връзката между електродите и структурата на транзистора. **Стрелката върху емитера показва посоката на тока** през елемента.



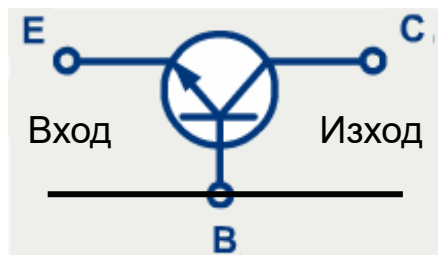
# Режими на работа на транзистора

Според поляритета на напреженията, приложени към  $p-n$  преходите, се различават четири режима на работа:

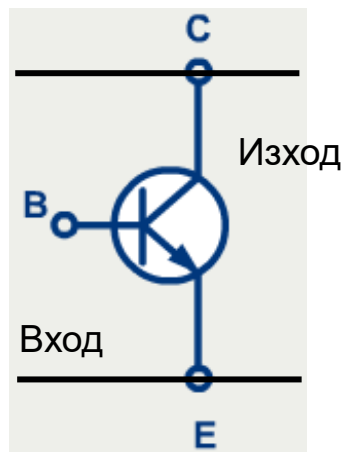
- ✚ **Активен-нормален режим**  
емитерен преход – право включване  
колекторен преход – обратно включване
- ✚ **Режим на отсечка**  
емитерен преход – обратно включване  
колекторен преход – обратно включване
- ✚ **Режим на насищане**  
емитерен преход – право включване  
колекторен преход – право включване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



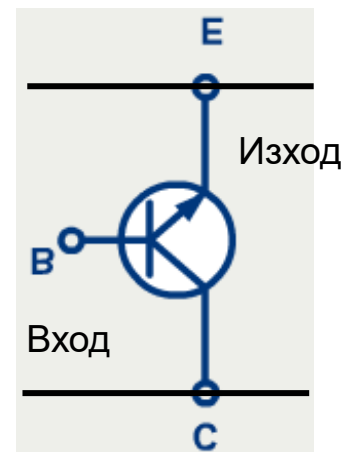
# Схеми на включване



Обща база



Общ емитер

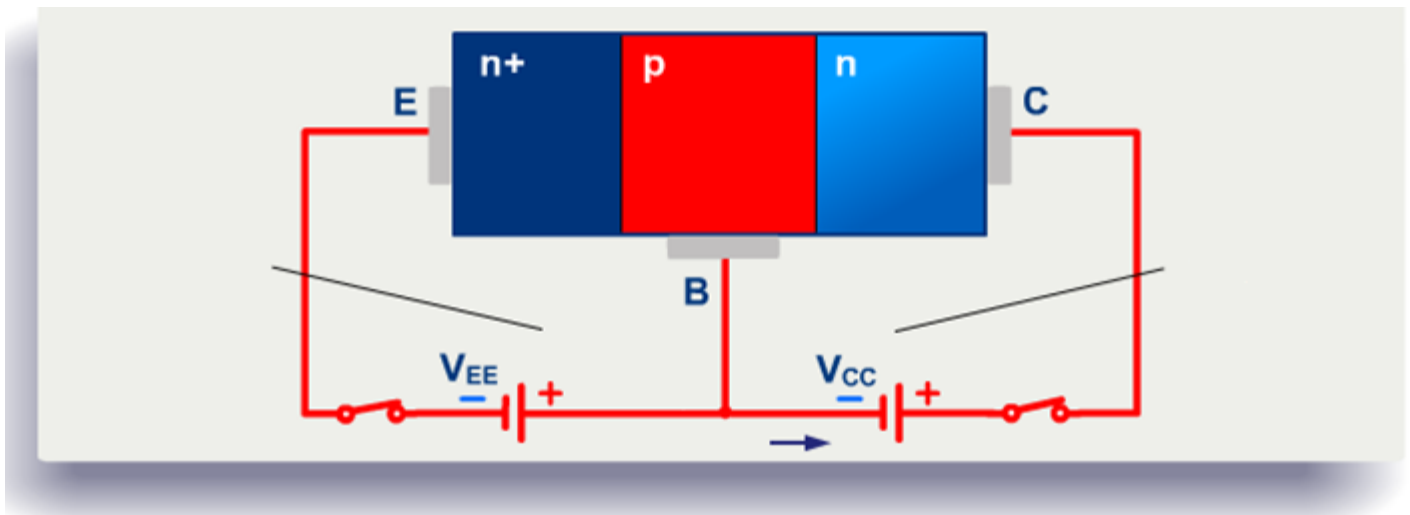


Общ колектор

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

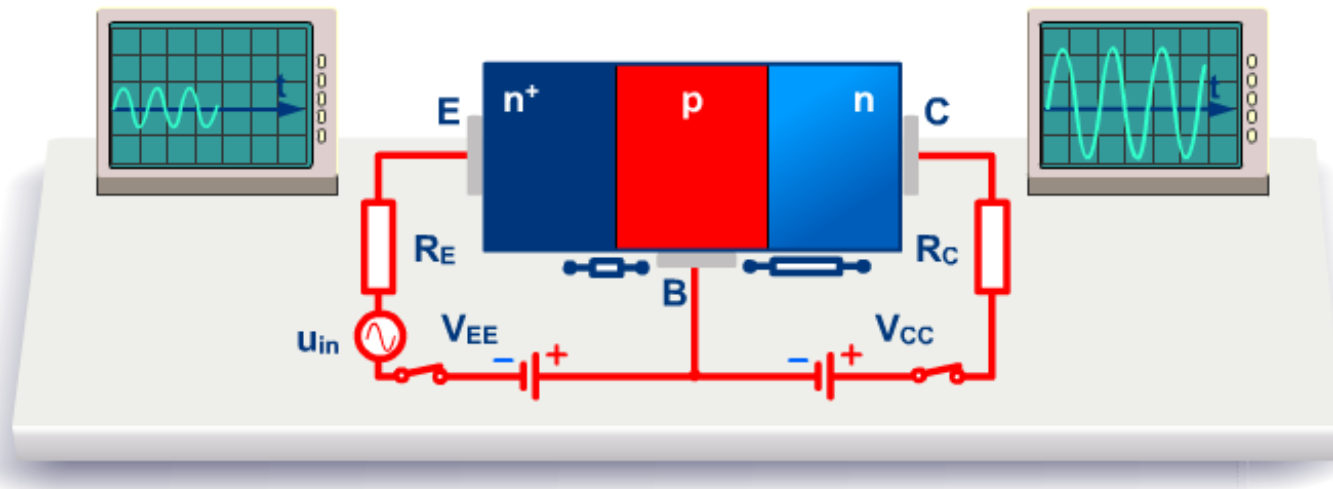


Биполярният транзистор нормално е запушен. За да започне да провежда ток, трябва на двата PN прехода да се подадат постоянни напрежения.

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.

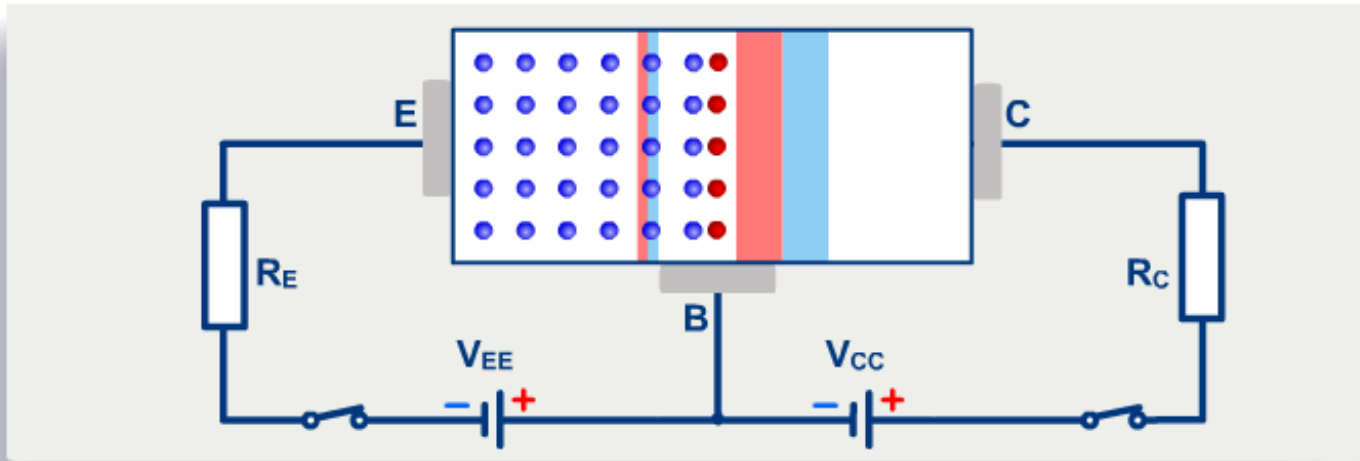
# Принцип на действие



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

Наименованието "*transistor*" произтича от "trans 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.

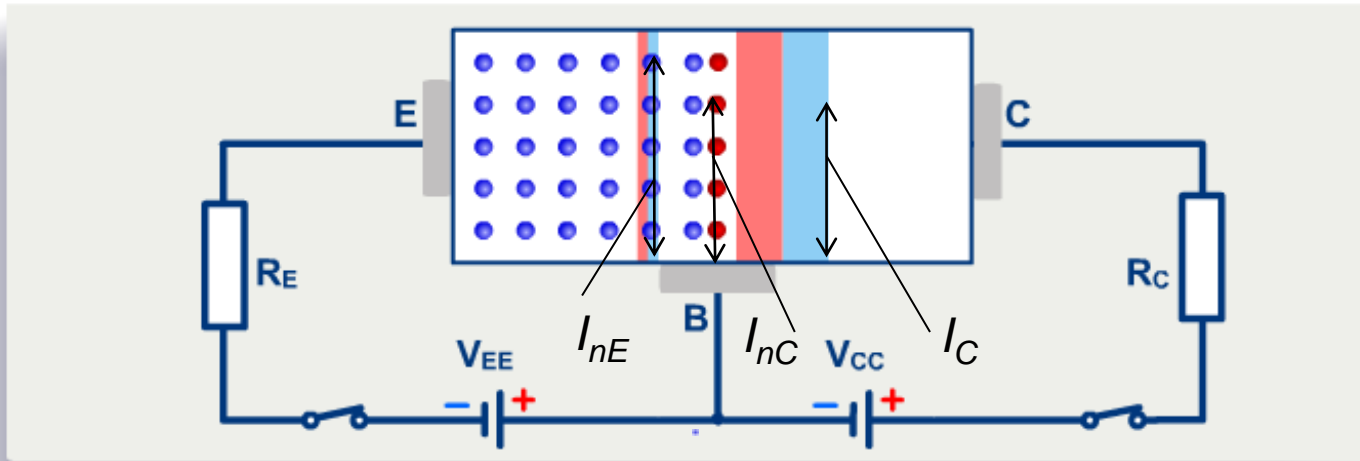
# Физически процеси в емитера



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

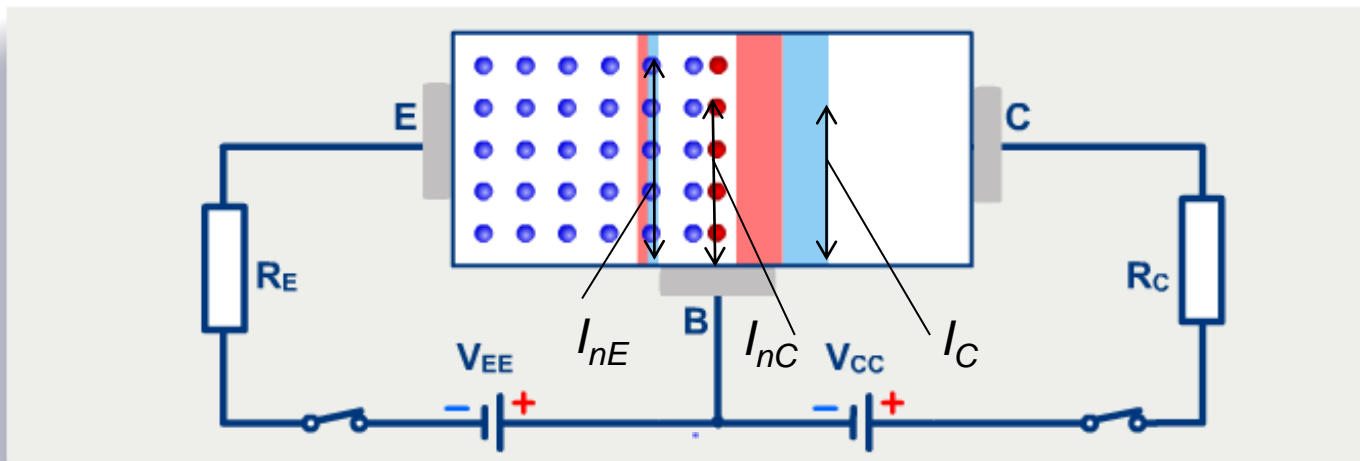


Електроните, навлизайки в  $P$  базата, са неосновни токоносители там. Тъй като базата е много тънка, незначителен брой електрони **рекомбинират** с дупки в базата и **по-голяма част** от тях достигат до колекторния преход.

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



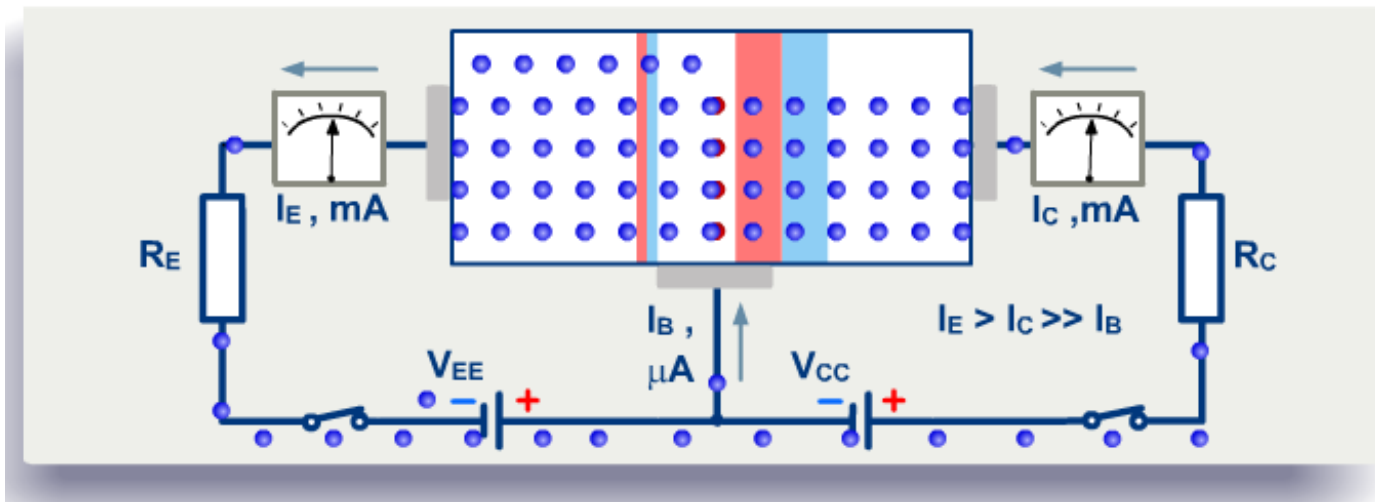
# Физически процеси в колектора



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  $M = 1$ .

$$I_C = M I_{nC} \quad M - \text{коефициент на лавинно умножение}$$

# Колекторен ток



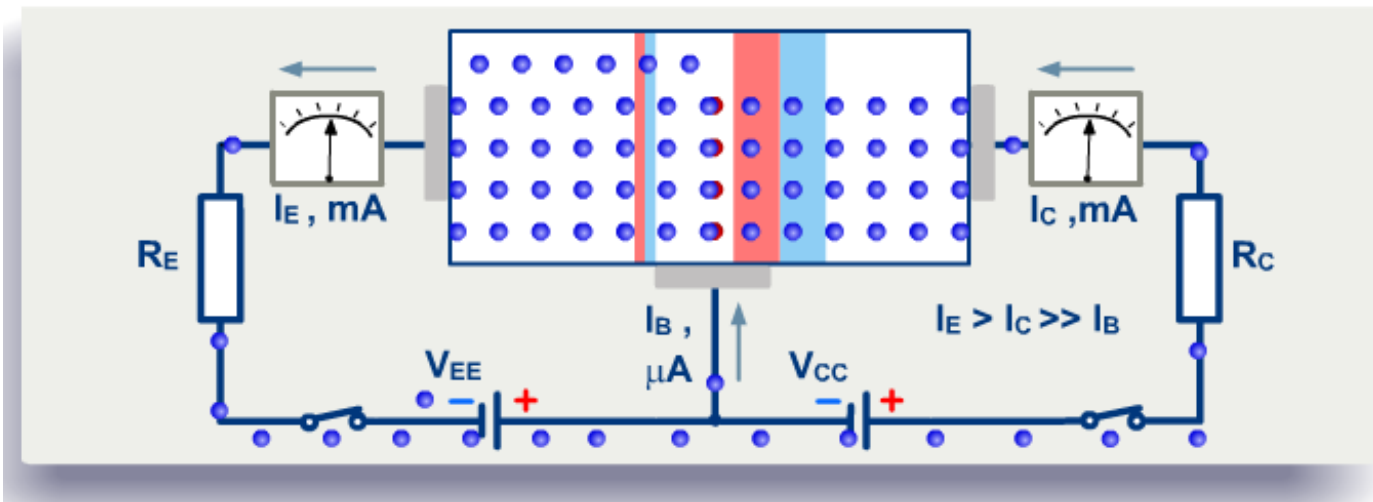
$$I_C = MI_{nC} = M\chi I_{nC} = M\chi\gamma I_{nE} = \alpha I_E$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$\alpha = \gamma\chi M$$

Коефициент на предаване  
по ток в схема ОБ

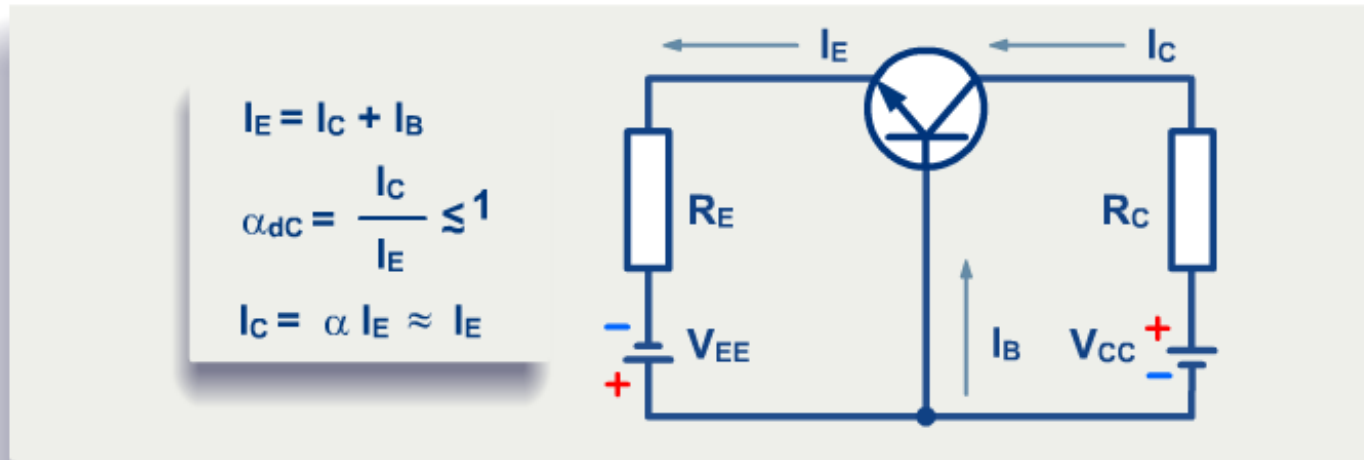
# Токове в транзистора



В транзистора има три тока:

- ✪ **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



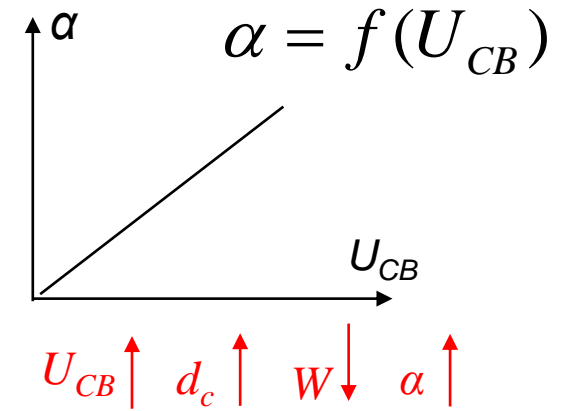
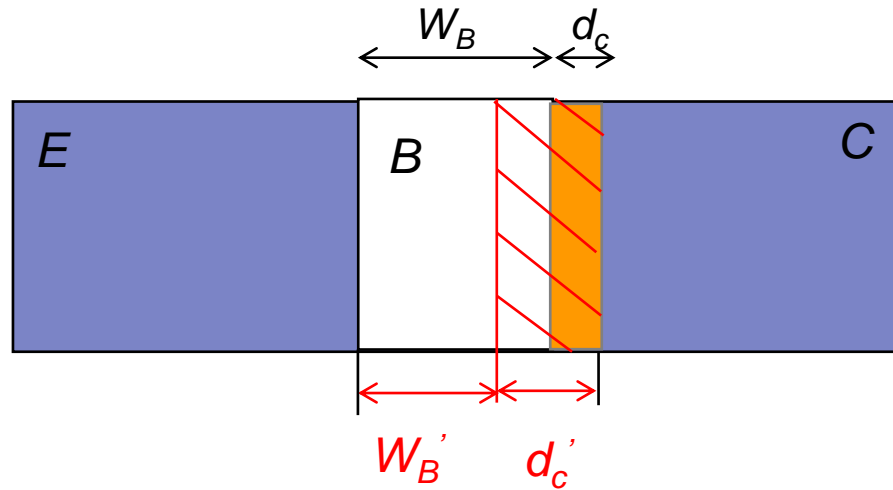
$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

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

Уравнение на колекторния ток в схема ОБ

# Влияние на $U_{CB}$ – ефект на Early



$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} + \frac{U_{CB}}{r_C}$$

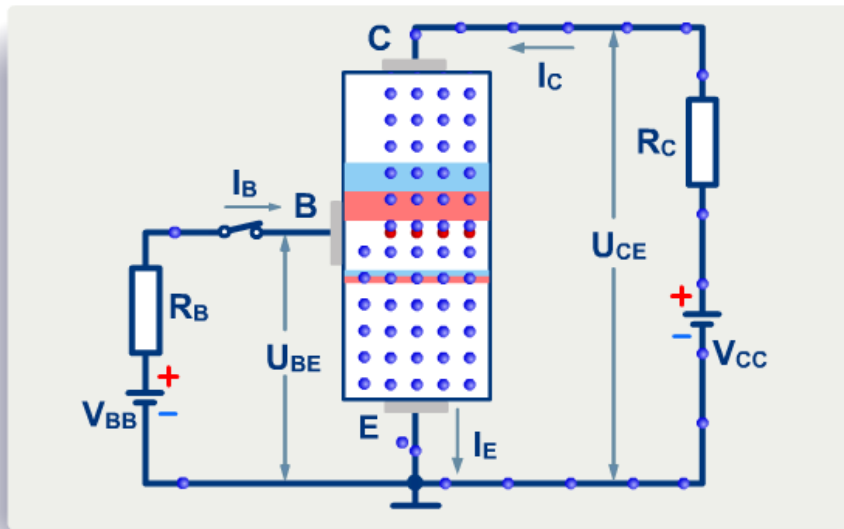
$$I_C = f(U_{CB})$$

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

$$r_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} = \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \neq \infty$$

$$\mu_{EC} = - \left. \frac{dU_{EB}}{dU_{CB}} \right|_{I_E = \text{const}}$$

# Схема общ емитер



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

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

$$I_E = I_C + I_B$$

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

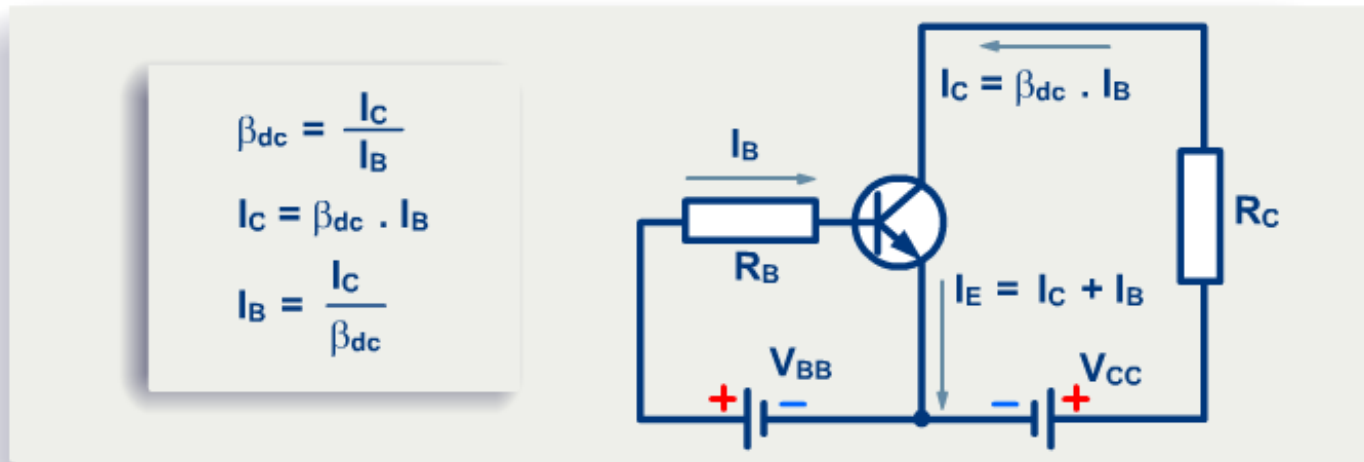
$$I_C(1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CB0} \quad I_C = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_B + \frac{1}{(1 - \alpha)} I_{CB0}$$

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

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



# Връзка между токовете в схема ОЕ

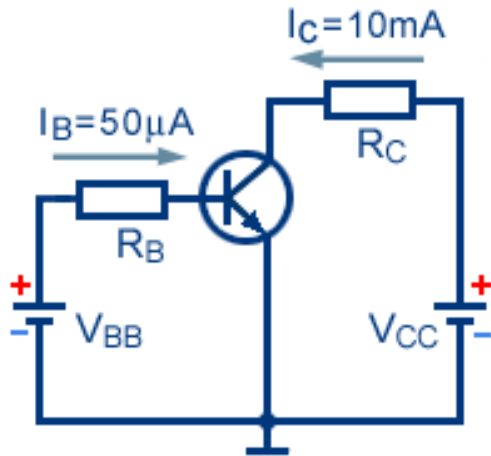


$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0} \quad \text{Ако } I_B = 0, \quad I_C = I_{CE0} \quad I_{CE0} = (1 + \beta) I_{CB0}$$

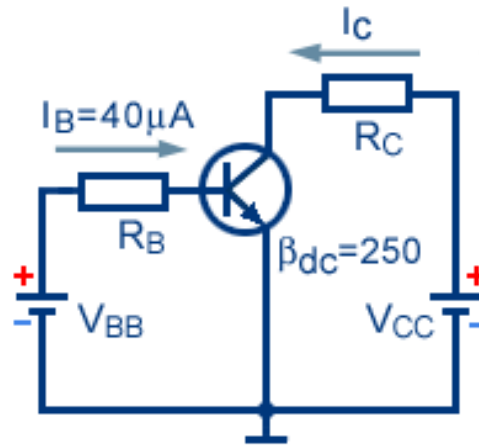
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad \beta = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \gg 1$$

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

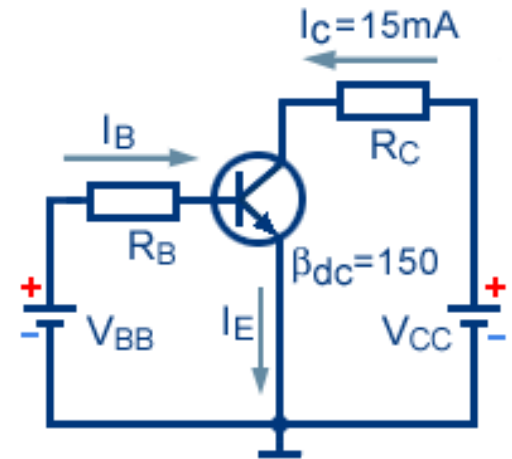
# Примери



$$\beta = ?$$

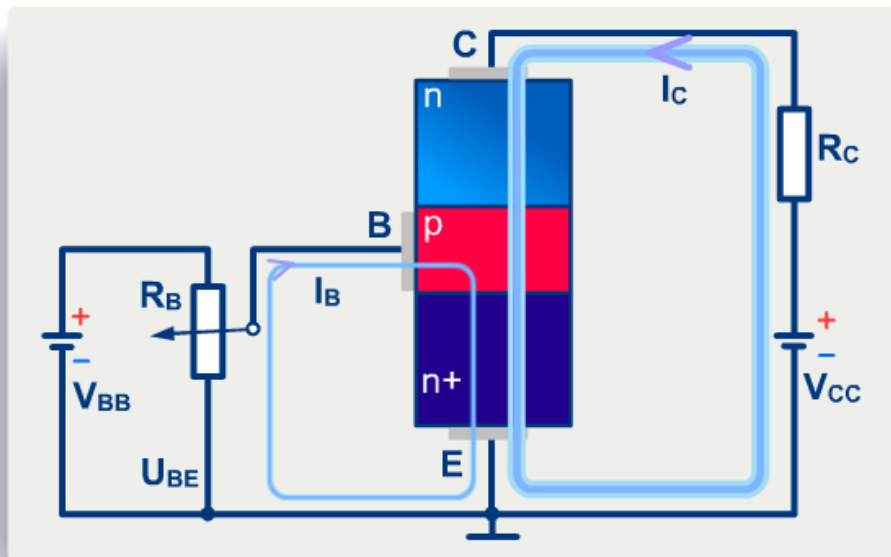


$$I_C = ?$$



$$I_E = ?$$

# Коефициент на усилване по ток



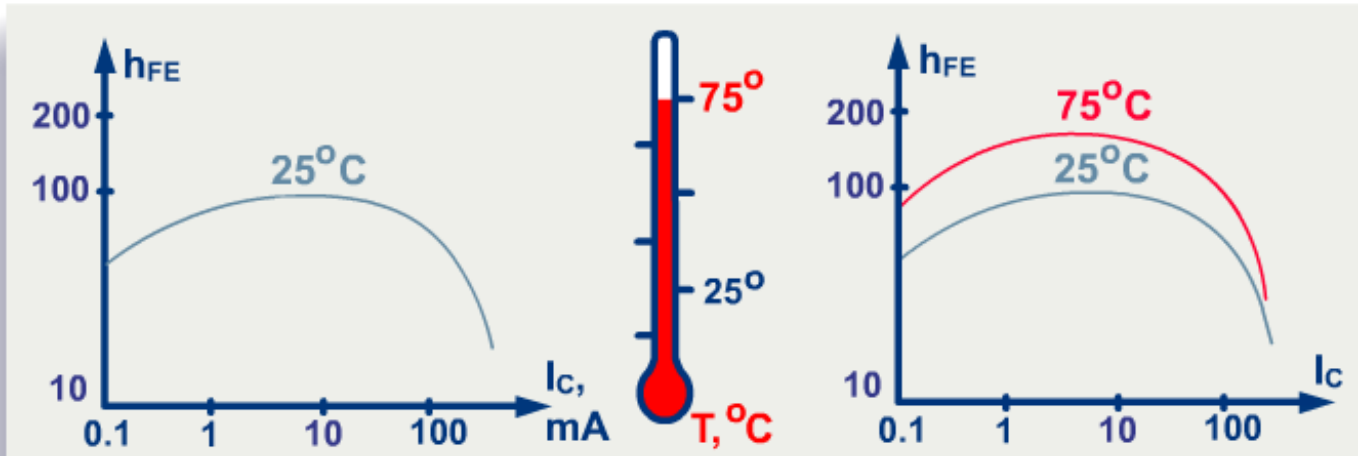
Коефициентът на усилване по ток в схема ОЕ е **много голям**, тъй като  $I_C \gg I_B$ .

За маломощни транзистори,  $\beta_{dc}$  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 $\beta$



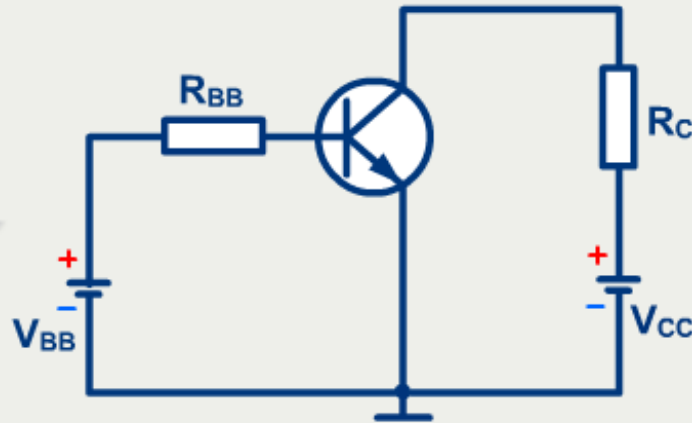
Коефициентът на усилване по ток  $\beta$  се променя в широки граници при изменение на колекторния ток, температурата и при смяна на транзистора.

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

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

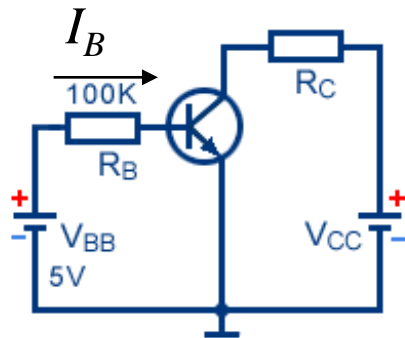
$$P_C = I_C \cdot U_{CE}$$



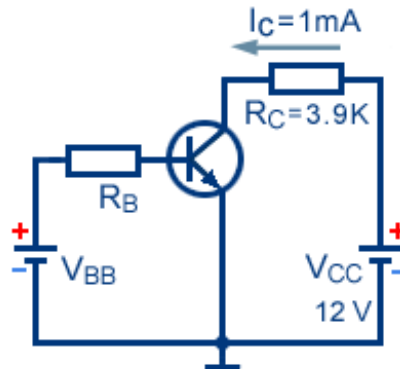
$$E_{BB} = U_{BE} + I_B R_B \quad I_B = \frac{E_{BB} - U_{BE}}{R_B}$$

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

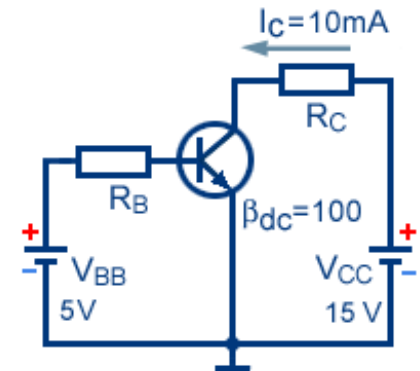
# Примери



$$I_B = ?$$

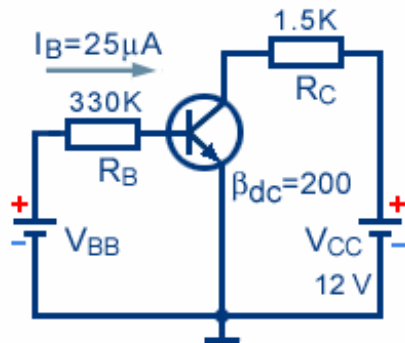


$$U_{CE} = ?$$

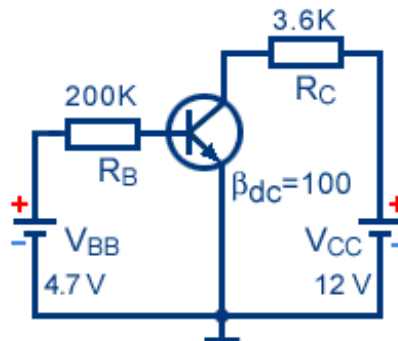


$$R_C, R_B = ?$$

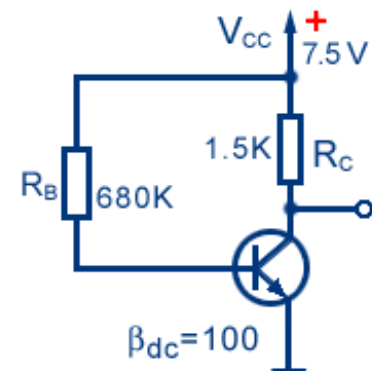
така че  $U_{CE} = 7.5V$



$$U_{CE} = ?$$



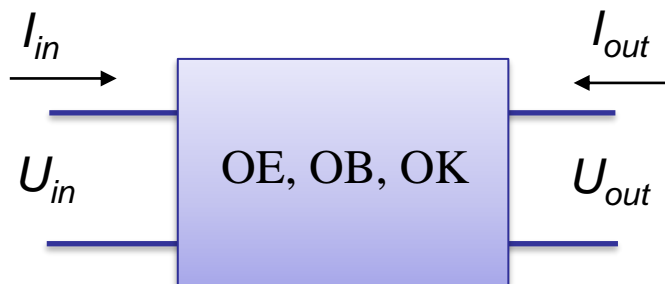
$$P_C = ?$$



$$P_C = ?$$

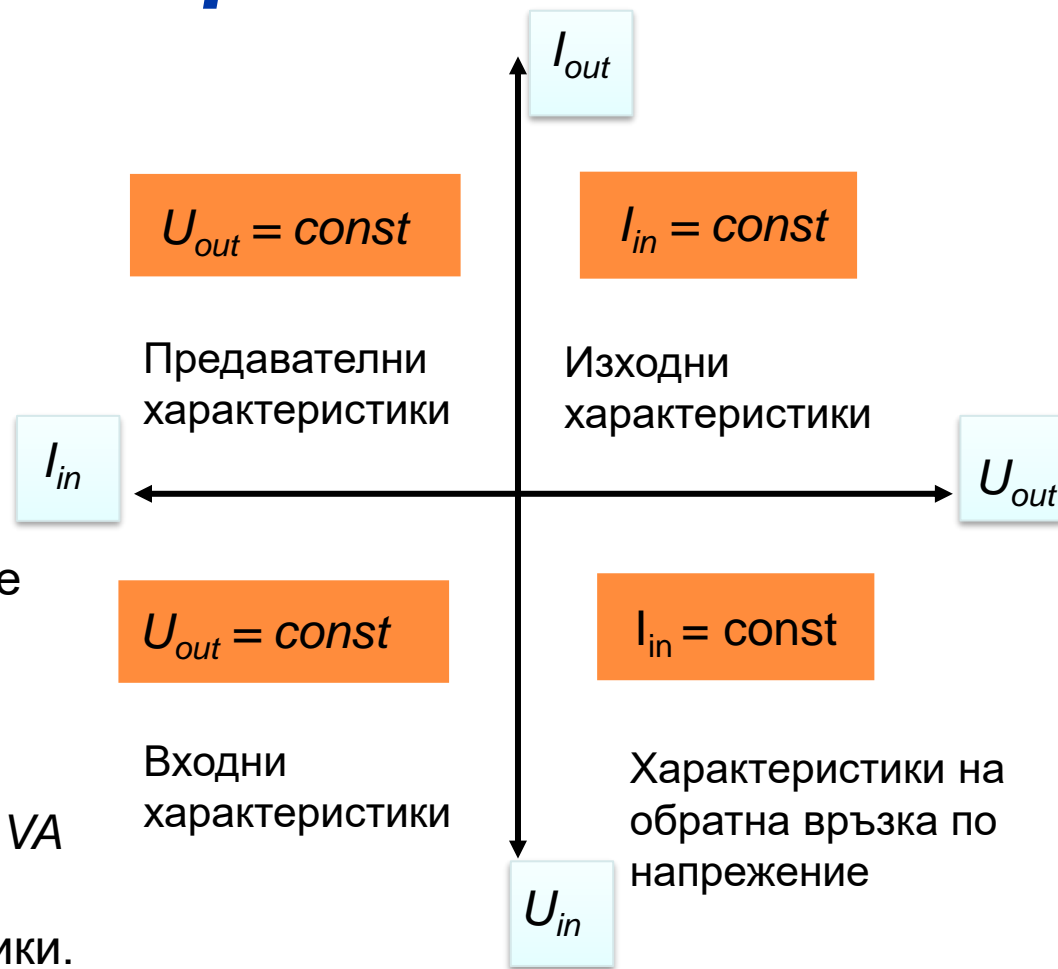


# VA характеристики

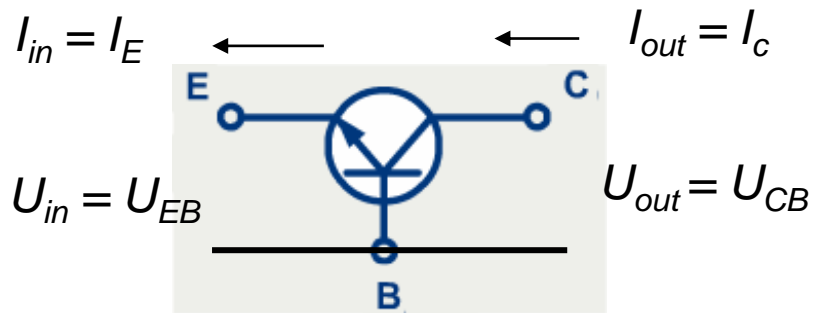


Съществува взаимна връзка между входните и изходни токове и напрежения в транзистора.

Фигурата илюстрира 4 фамилии VA характеристики. Най-важни са изходните и входни характеристики.

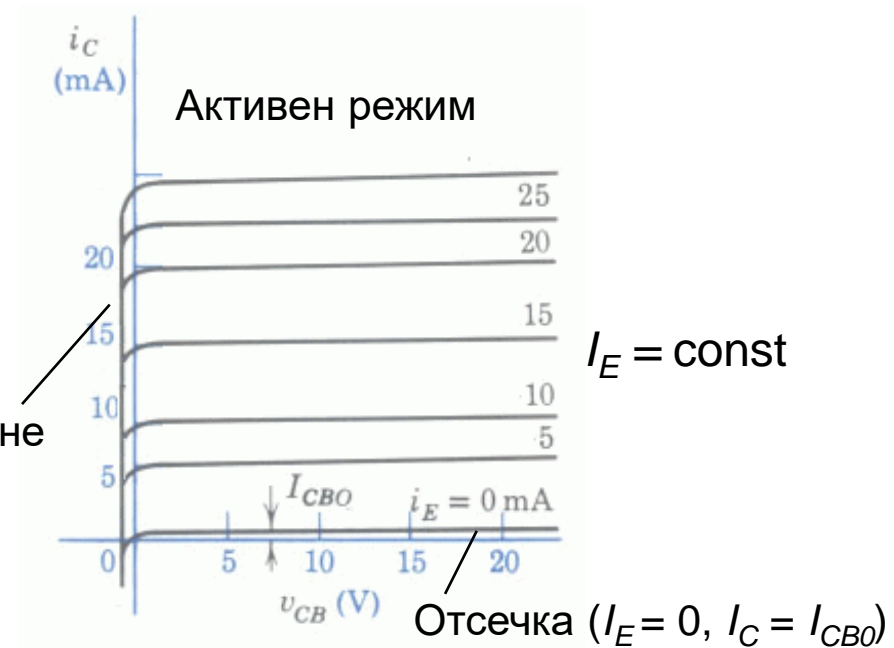


# ОБ – изходни характеристики



$$I_C = f(U_{CB}) \Big|_{I_E = \text{const}}$$

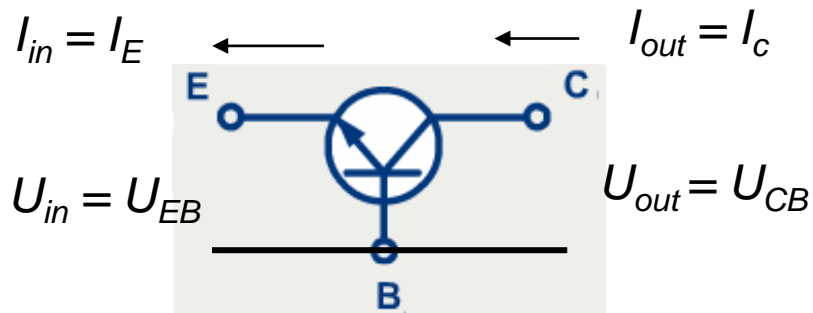
Насищане



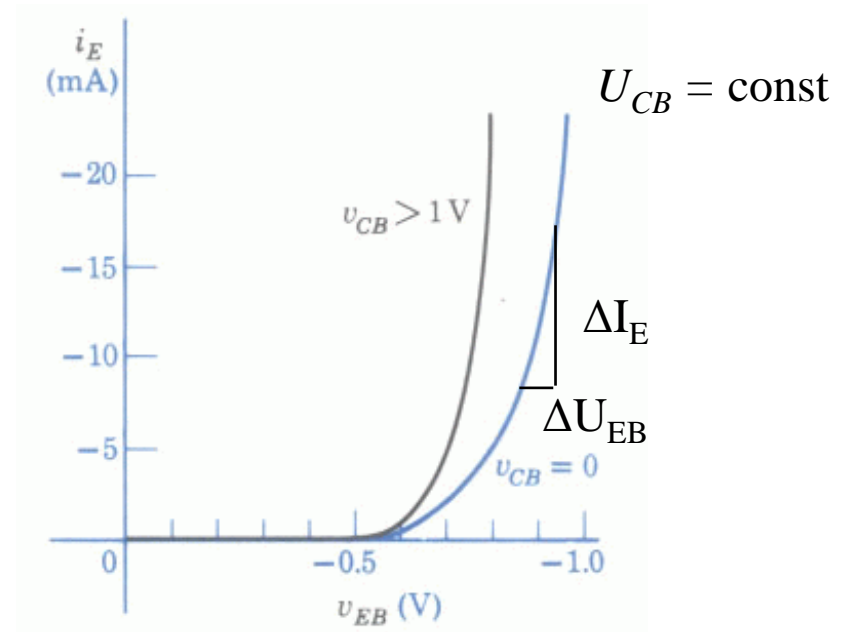
$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} + \frac{U_{CB}}{r_C}$$

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

# ОБ – входни характеристики

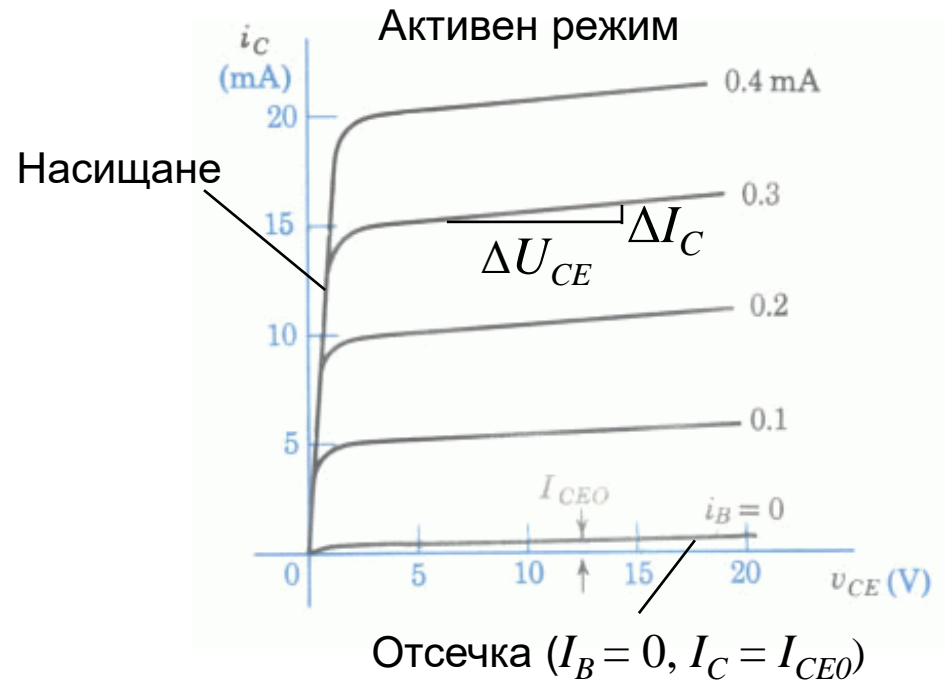
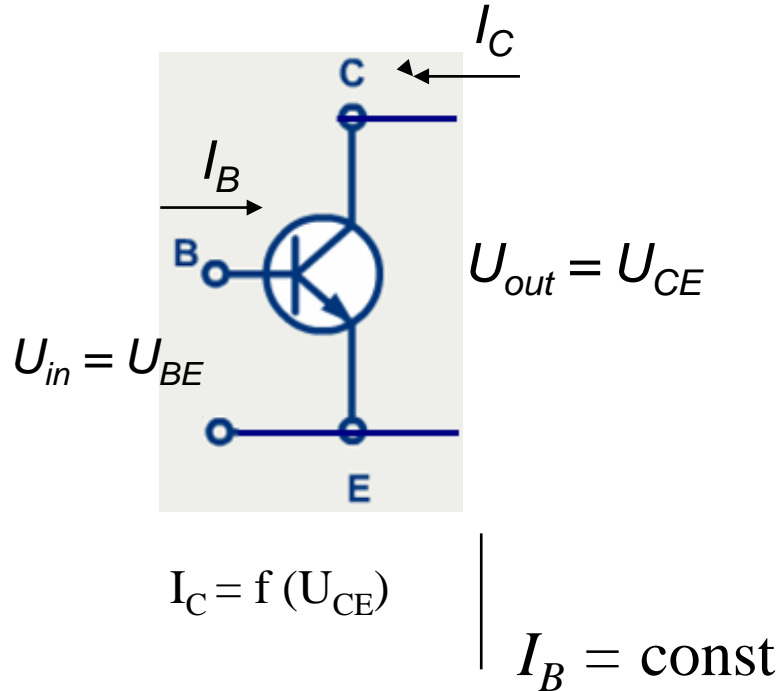


$$I_E = f(U_{EB}) \Big|_{U_{CB} = \text{const}}$$



$$r_{in} = \frac{dU_{EB}}{dI_E} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta I_E}$$

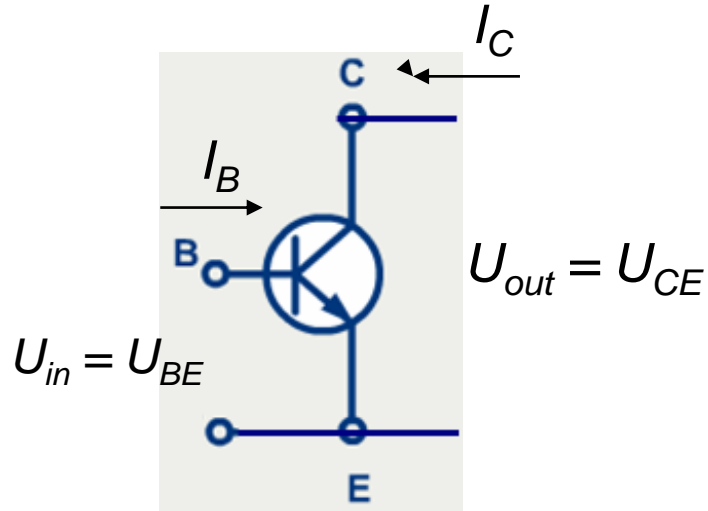
# ОЕ – изходни характеристики



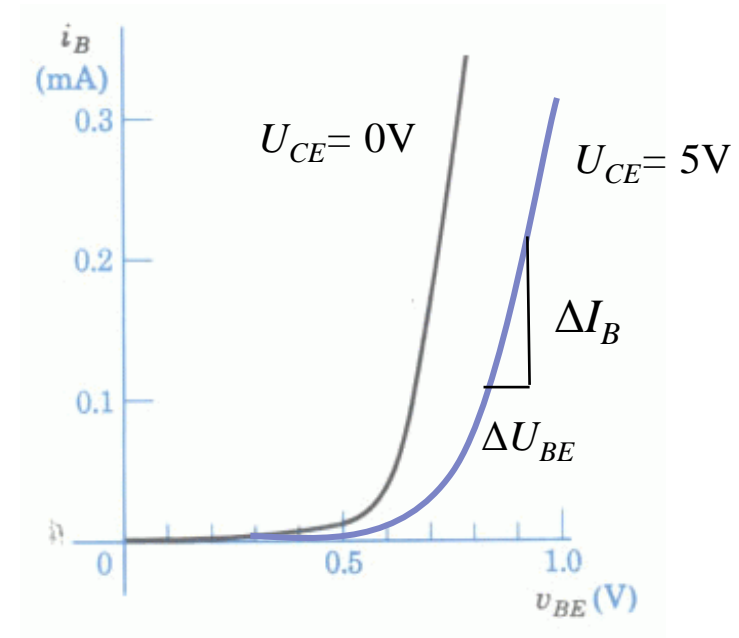
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} + \frac{U_{CE}}{r_C^*}$$

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

# OE – входни характеристики



$$I_B = f(U_{BE}) \quad \left| \quad U_{CE} = \text{const} \right.$$

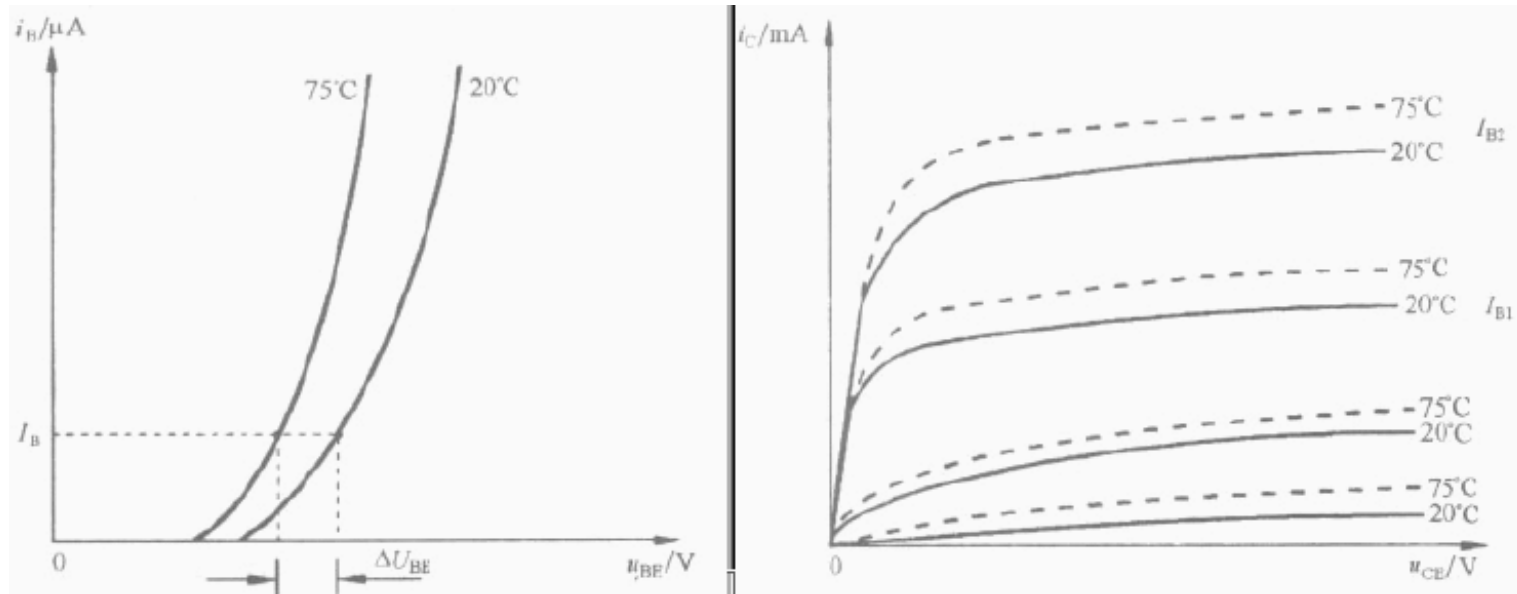


$$r_{in} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

# Влияние на температурата

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

$$\beta = f(T)$$



Транзисторът в схема ОЕ е по-температурно зависим спрямо схема ОБ защото  $I_{CE0}$  и  $\beta$  се увеличават по-бързо с температурата отколкото  $I_{CB0}$  и  $\alpha$ .



# 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

✿ **Max температура на прехода**  $T_{C\max} < T_j$ , където  $n = p = n_j$

✿ **Max мощност в колектора**  $P_{C\max}$

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

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

Мощност, разсеяна  
в околната среда

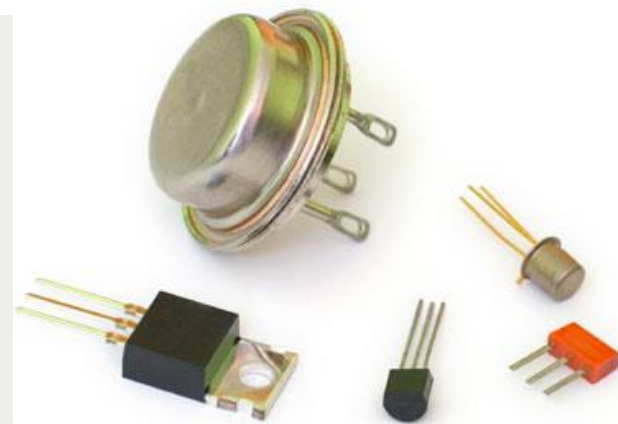
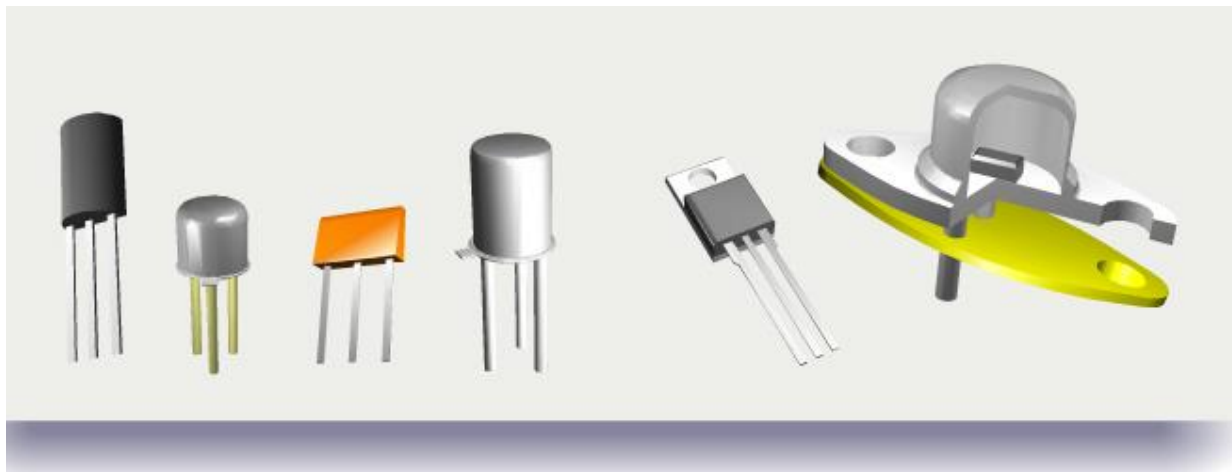
Когато се отделя мощност в колекторния  
преход, температурата му  $T_C$  се повишава.  
По-голяма мощност – по-висока температура.

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

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

Отделената мощност трябва винаги да е по-малка от max допустимата  $P_{C\max}$ . 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

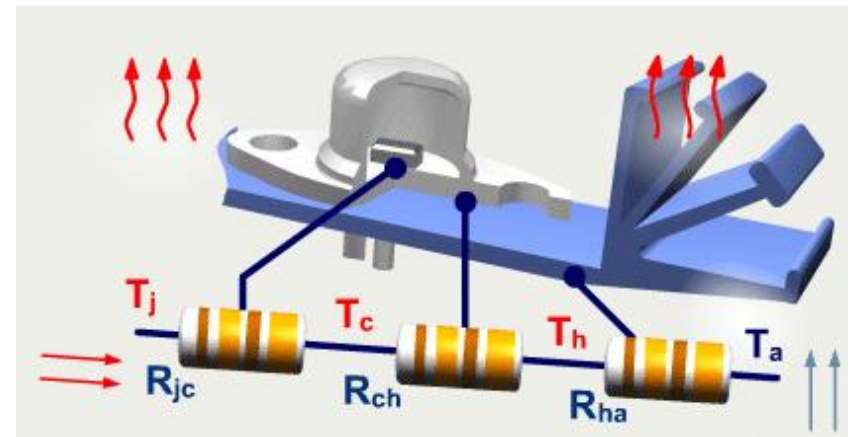
**Топлинното съпротивление**  $R_{th}$  показва ефективността при отделяне на топлината от транзистора и се измерва в  $K/W$  или в  $^{\circ}C/W$ .

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

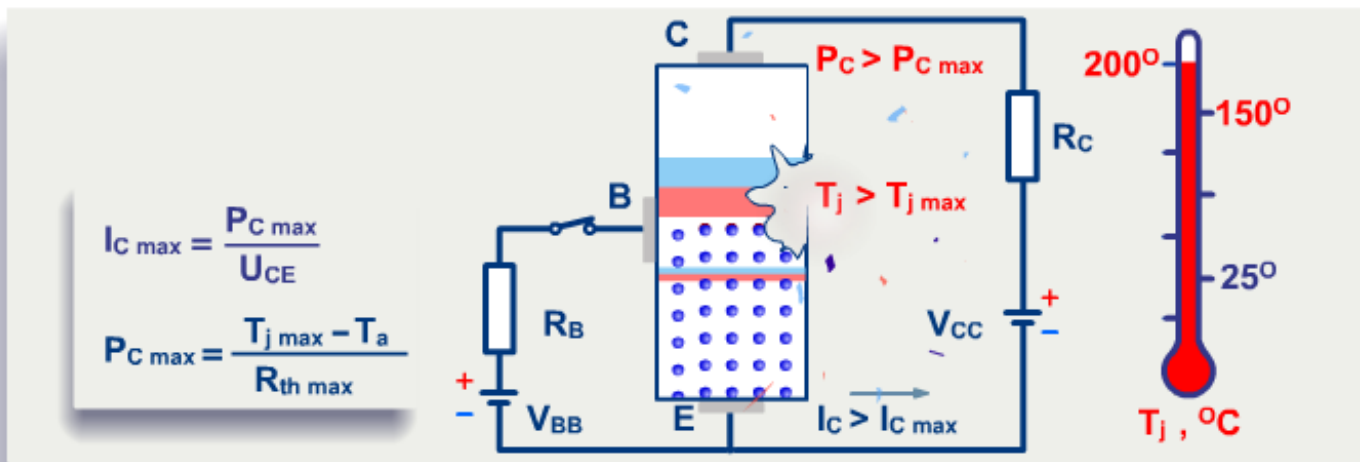
Колкото **по-малко е топлинното съпротивление** толкова **по-голяма** е максимално допустимата мощност.

Раднатор

$$R_{th} = \underbrace{R_{th_{jc}}}_{\text{Преход-корпус}} + \underbrace{R_{th_{ch}}}_{\text{Корпус-радиатор}} + \underbrace{R_{th_{ha}}}_{\text{Раднатор-околна среда}}$$



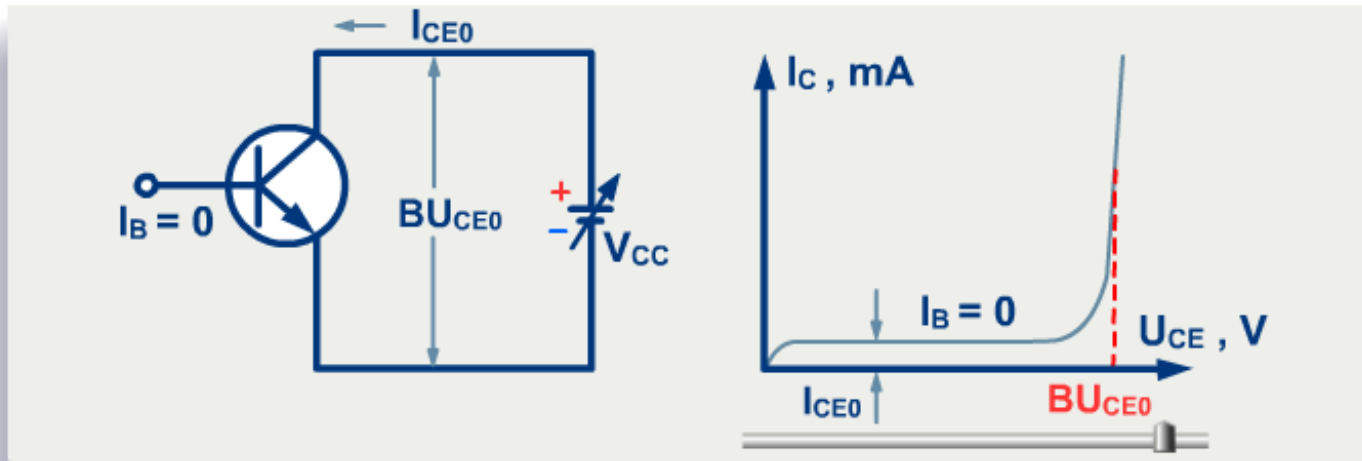
# Максимален колекторен ток



**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

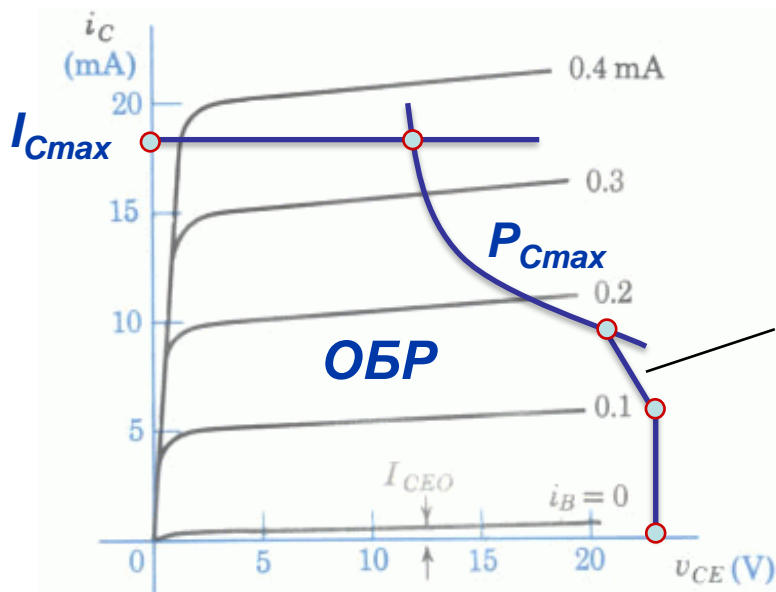


$U_{BR_{CE0}}$  представлява напрежението между емитера и колектора, при отворена база. Това е пробивното напрежение в схема ОЕ.

$U_{BR_{CB0}}$  представлява напрежението между колектора и база, при отворен емитер. Това е пробивното напрежение в схема ОЕ.

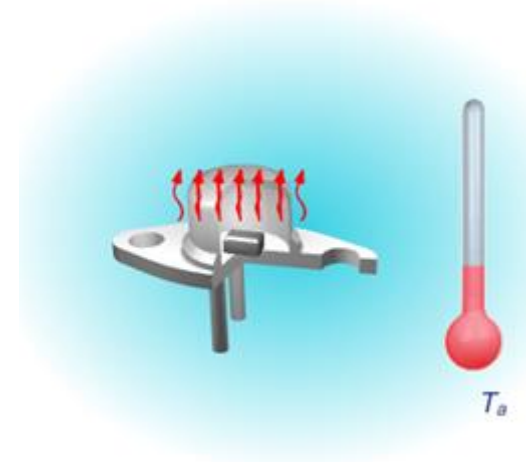
$$U_{BR_{CB0}} > U_{BR_{CE0}} \gg U_{BR_{EB0}}$$

# Област на безопасна работа



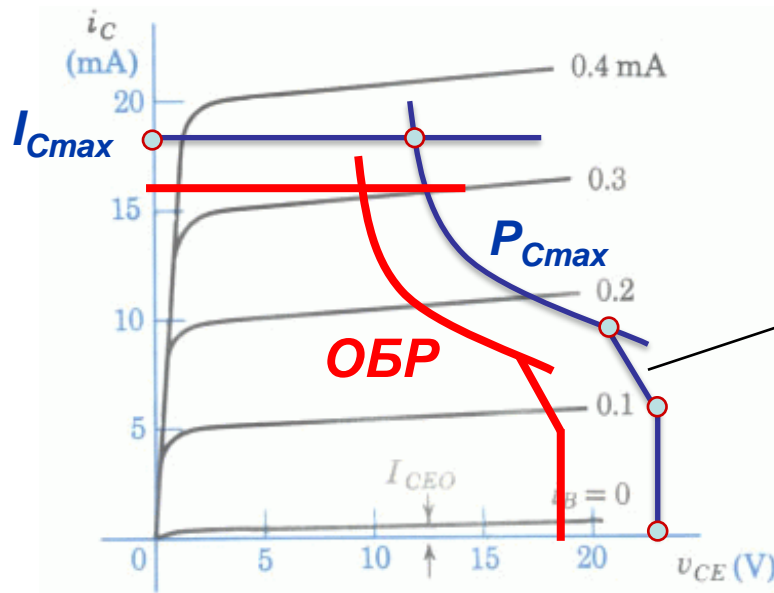
Ограничение за  
вторичен пробив

$$U_{Cmax} < U_{BR}$$



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.

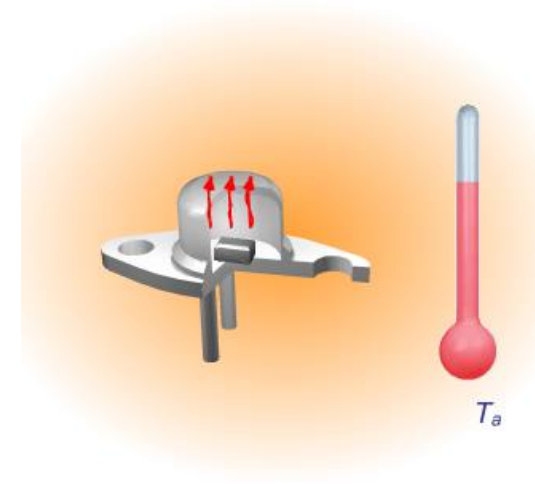
# Влияние на температурата



$$T_2 > T_1$$

Ограничение за  
вторичен пробив

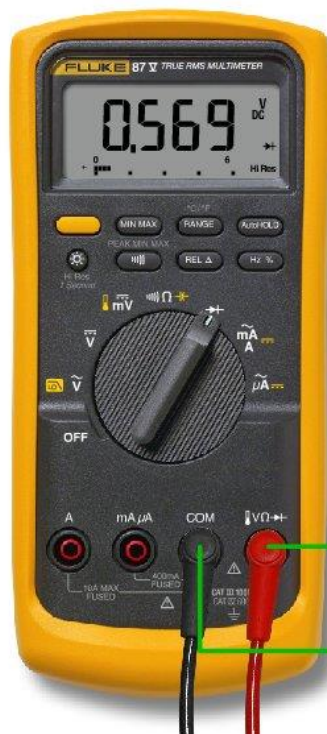
$$U_{Cmax} < U_{BR}$$



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



# Тестване на транзистора



При изправен диод  
показанието е 0,5 – 0,9 V.

Право включване



„OL” означава  
отворена верига

Обратно включване

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.