



Биполярни транзистори

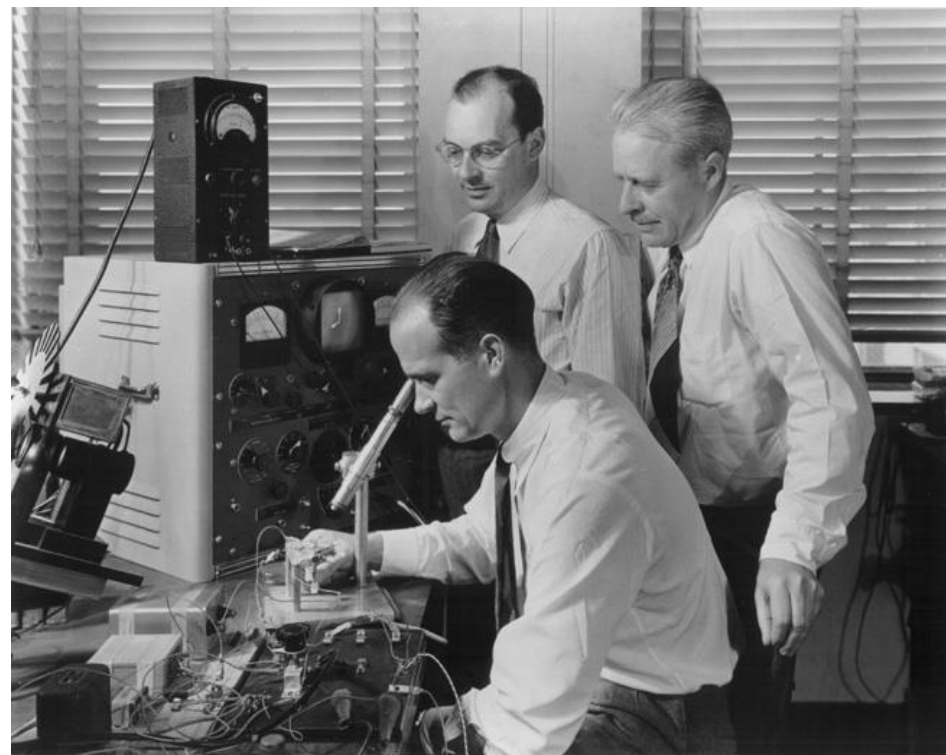


Полупроводникови
елементи

Откриване на транзистора

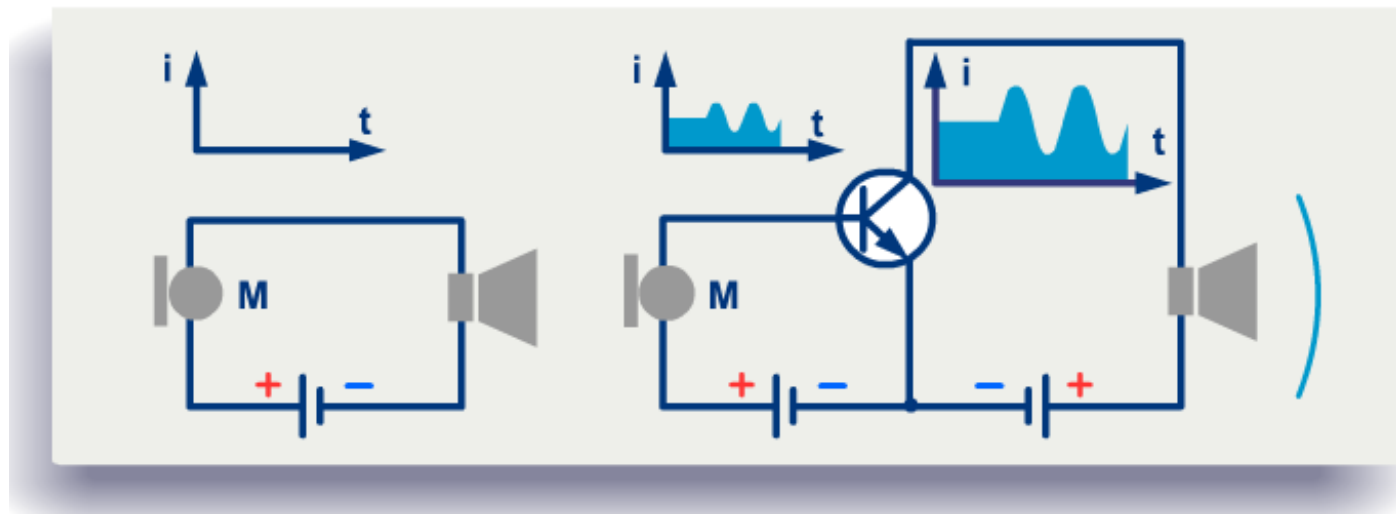


Първият транзистор (Ge с точков контакт) е открит в AT&T Bell Laboratories, 1947



The Nobel Prize in Physics 1956 was awarded jointly to William Bradford Shockley, John Bardeen and Walter Houser Brattain "for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect."

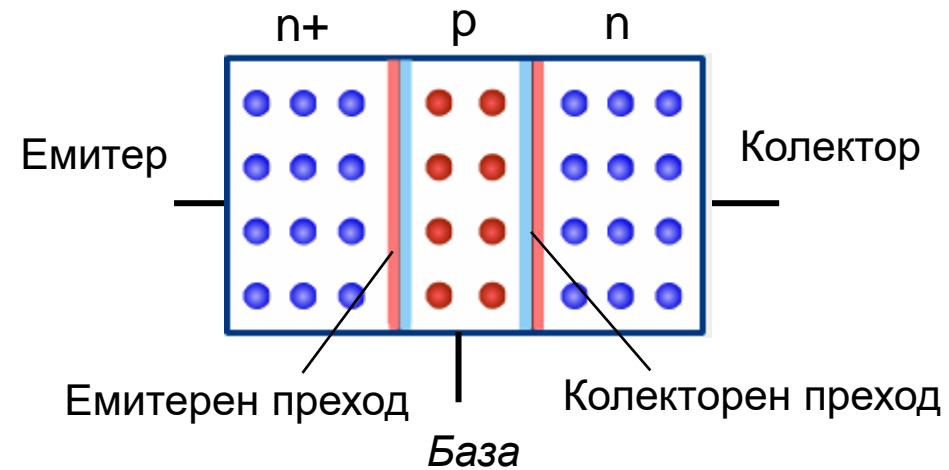
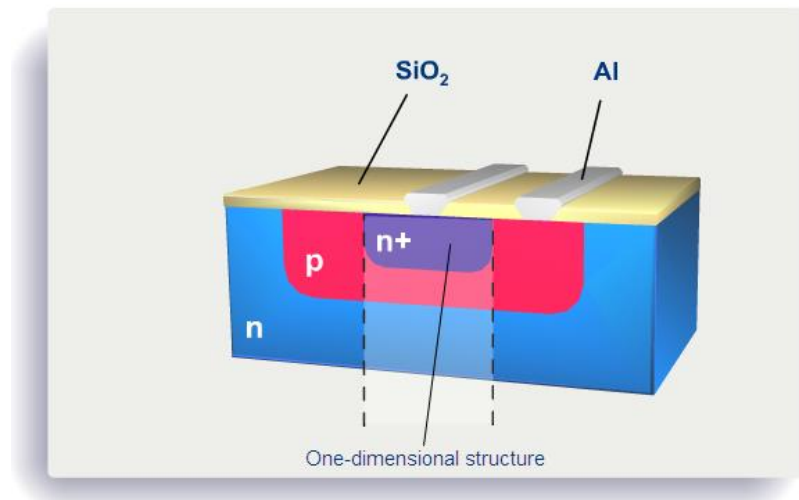
Основни свойства



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.

Структура на транзистора



Биполярният транзистор има три области: емитер, база, и колектор, които формират два PN прехода: емитер-база и база-колектор.

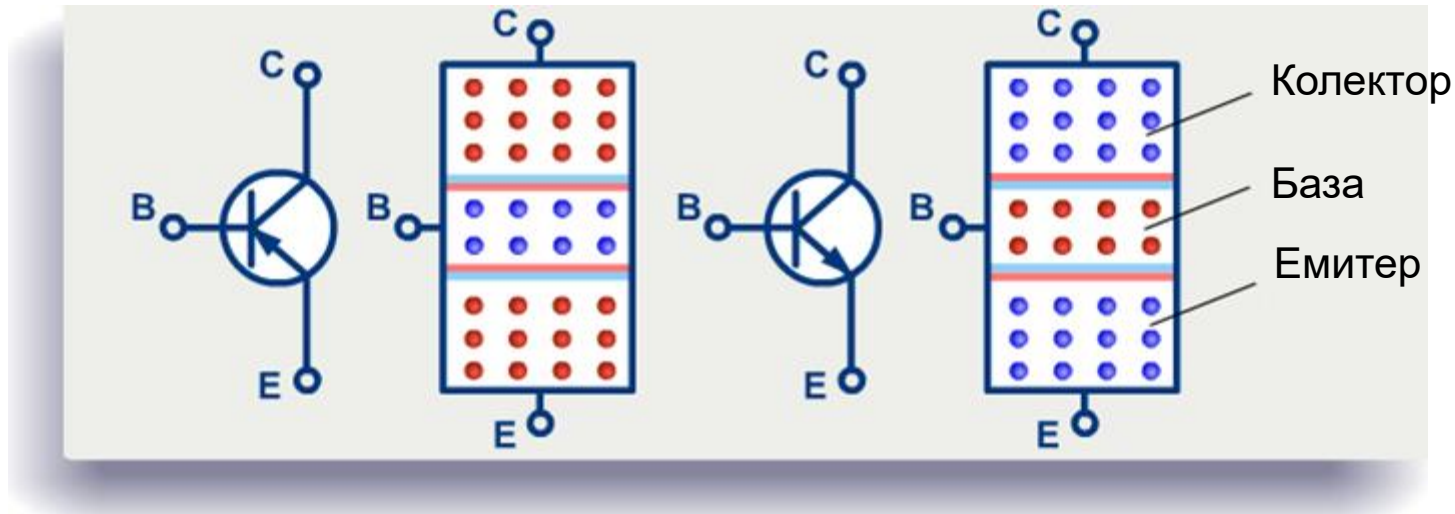
Емитерът е силно легиран и инжектира токоносителите.

Базата управлява потока на токоносителите. Тя е слабо легирана и е много тънка.

Колекторът събира токоносителите преминали през базата.

Вследствие на дифузията на свободни токоносителите, в PN преходите се образуват обеднени области с бариерен потенциал от около 0.7V при 25°C за Si.

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

коллекторен преход – обратно включване

Режим на отсечка

емитерен преход – обратно включване

коллекторен преход – обратно включване

Режим на насищане

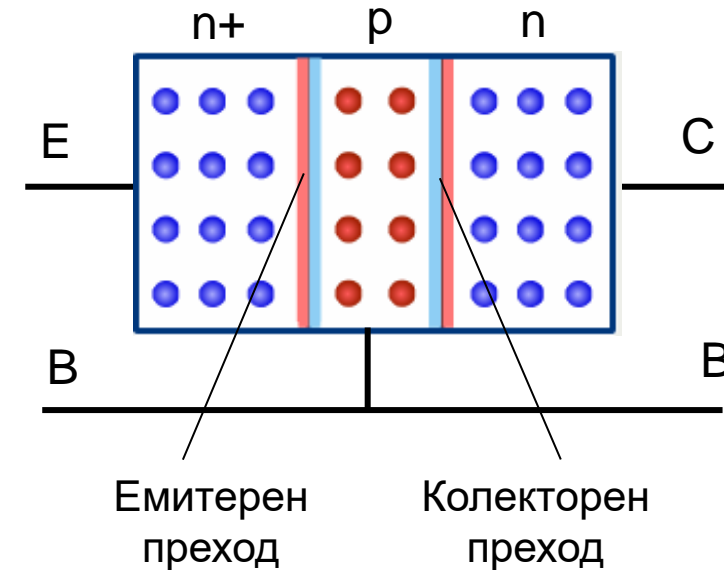
емитерен преход – право включване

колекторен преход – право включване

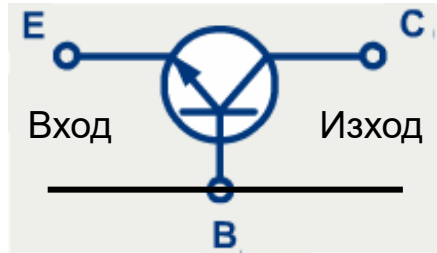
Инверсен-активен режим

емитерен преход – обратно включване

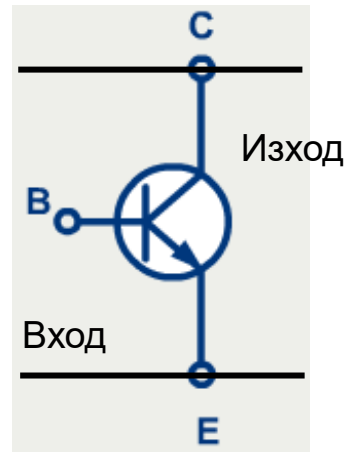
коллекторен преход – право включване



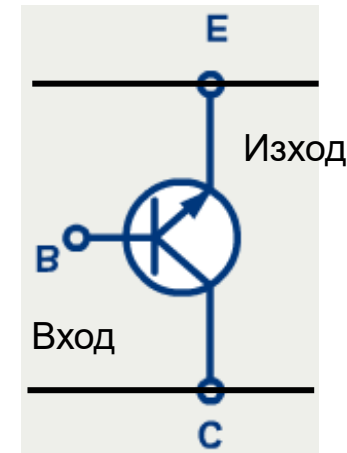
Схеми на включване



Обща база



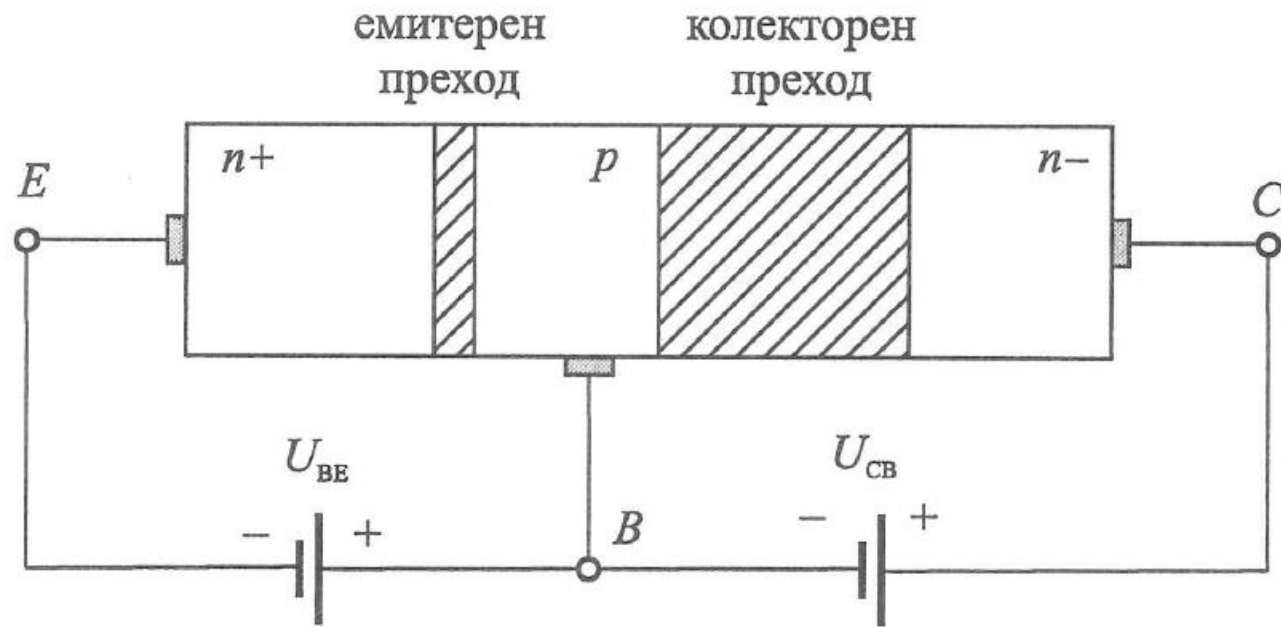
Общ емитер



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).

Схема обща база – активен режим

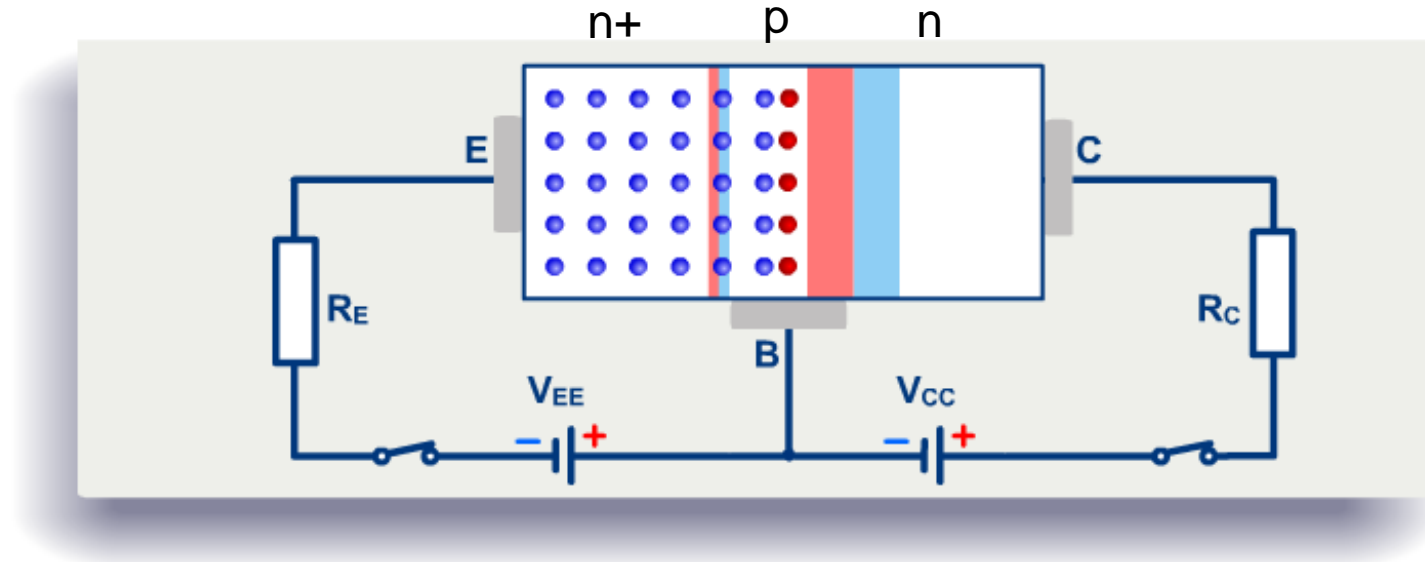


Биполярният транзистор нормално е запушен. За да започне да провежда ток, трябва на двата PN прехода да се подадат постоянни напрежения.

В **активен режим** PN преходът емитер-база е включен в права посока, а преходът база-колектор – в обратна.

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

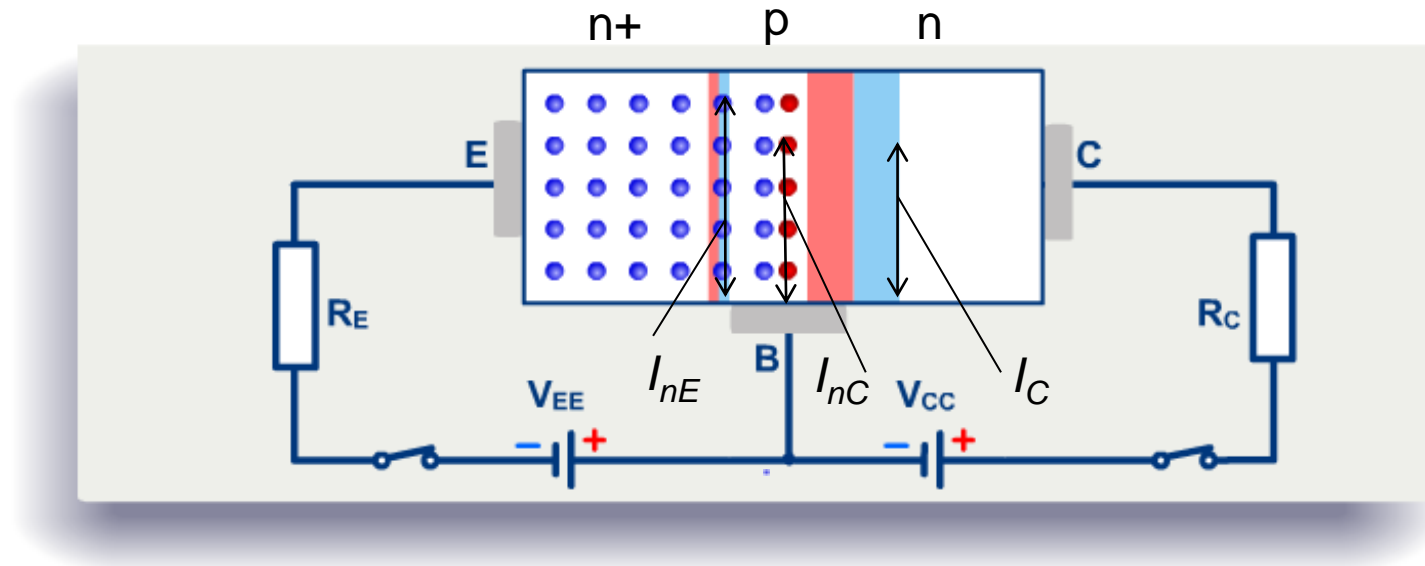
Физически процеси в емитера



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**.

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

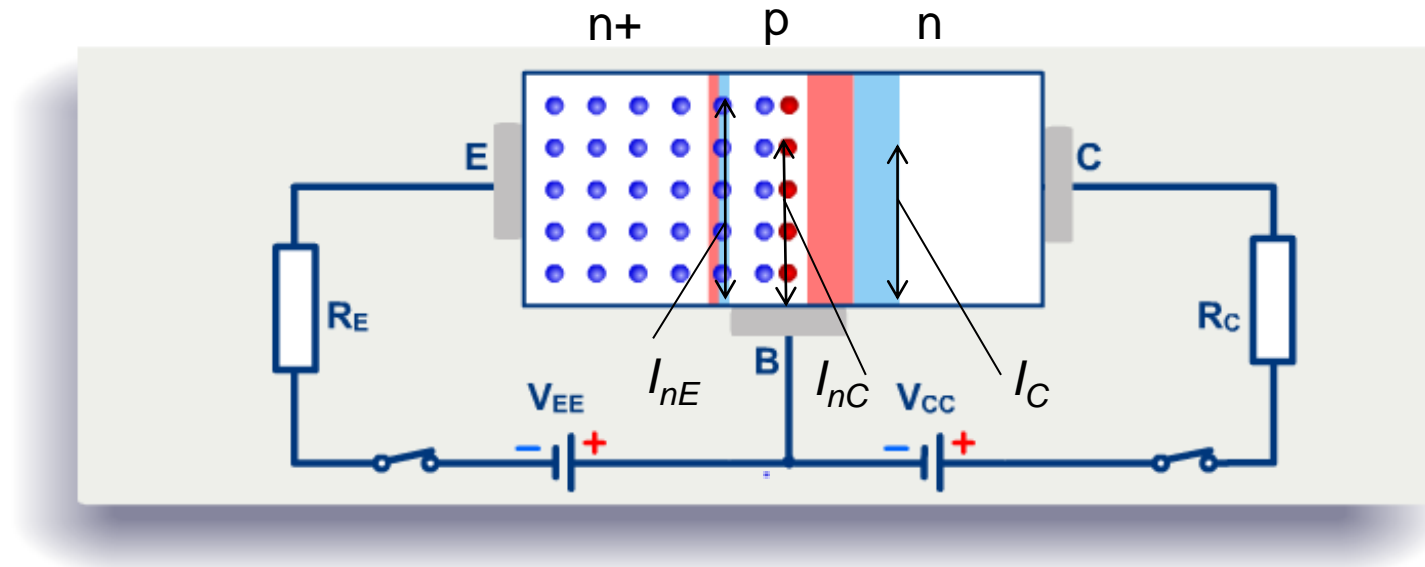
Физически процеси в базата



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.

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

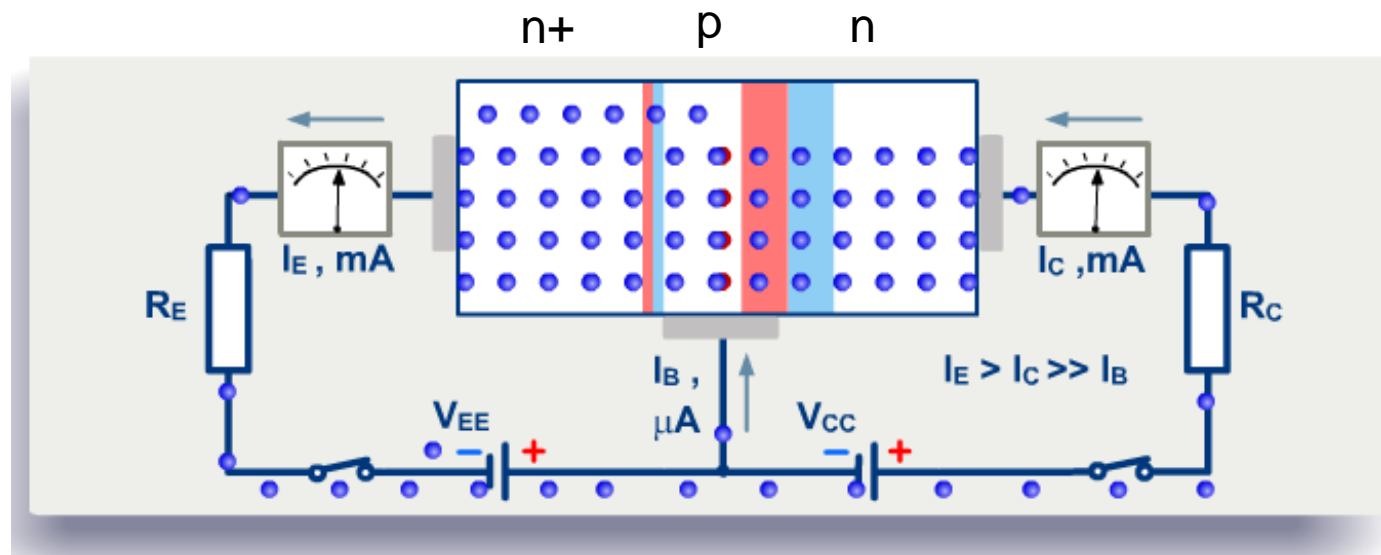
Физически процеси в колектора



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

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

Колекторен ток



$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_E} < 1$$

Коефициент на инжекция

$$\chi = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} < 1$$

Коефициент на пренасяне

$$I_C = M I_{nC}$$

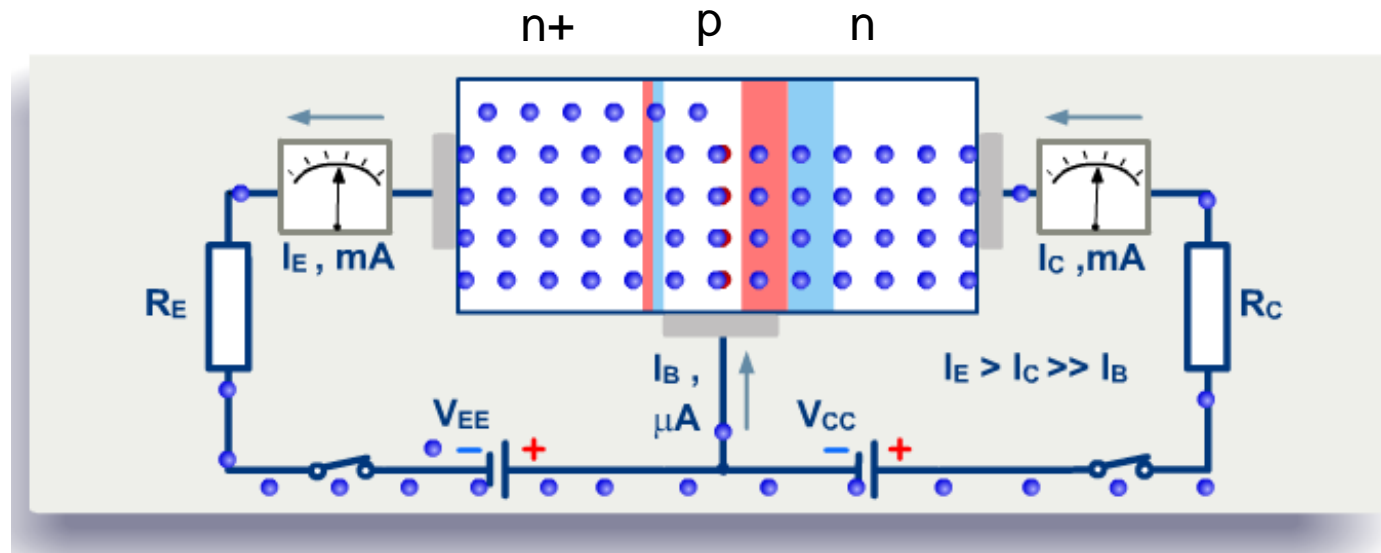
коефициент на лавинно умножение

$$I_C = \alpha I_E$$

Коефициент на предаване
по ток в схема ОБ

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

Токове в транзистора



В транзистора има три тока:

$$I_E > I_C \gg I_B$$

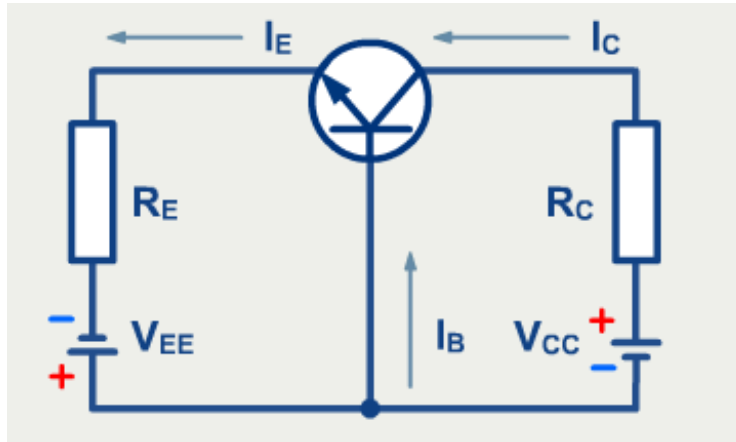
$$I_E = I_C + I_B$$

Емитерният ток е **най-големият** ток, защото емитерът 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.

Токове в транзистора – връзка между колекторен и емитерен ток

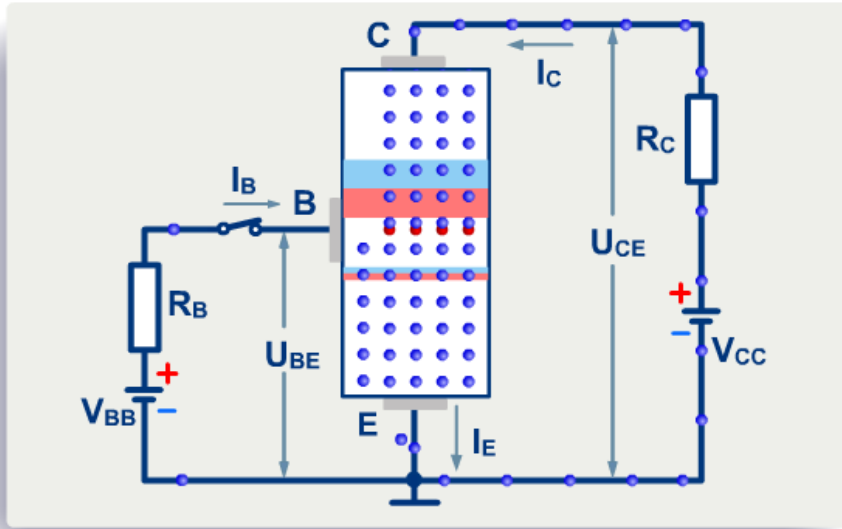


$$I_E = I_C + I_B$$

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

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

Схема общ емитер



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

$$I_E = I_C + I_B$$

Как зависи I_C or I_B ?

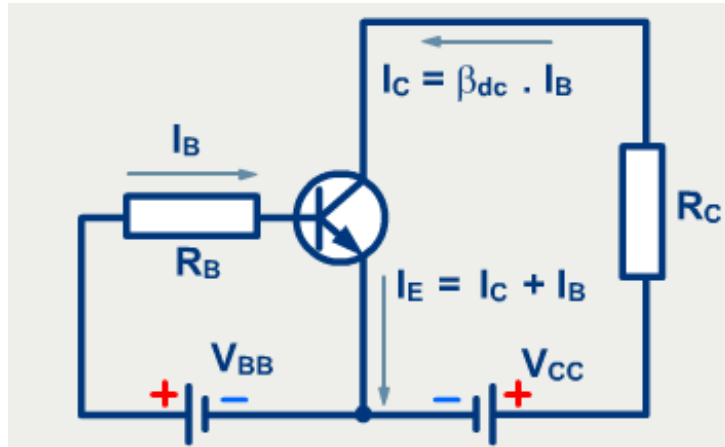
$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} = \alpha(I_C + I_B) + I_{CB0} = \alpha I_C + \alpha I_B + I_{CB0}$$

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

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

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

Токове в транзистора – връзка между колекторен и базов ток



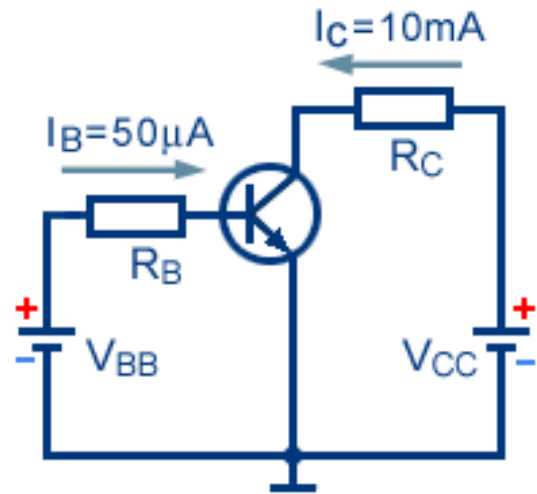
$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0}$$

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

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \approx \beta I_B$$

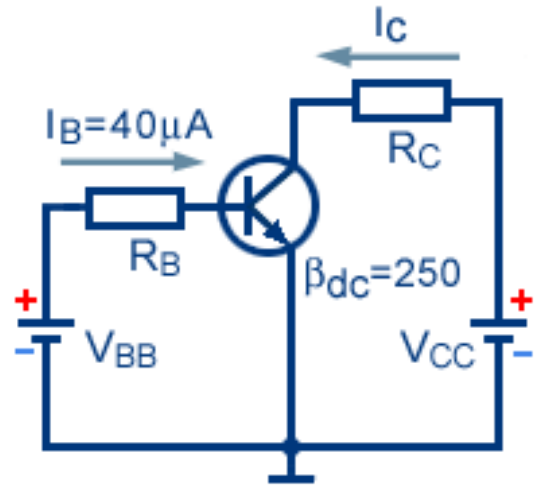
$$\beta = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \gg 1$$

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} .



$$\beta = ?$$

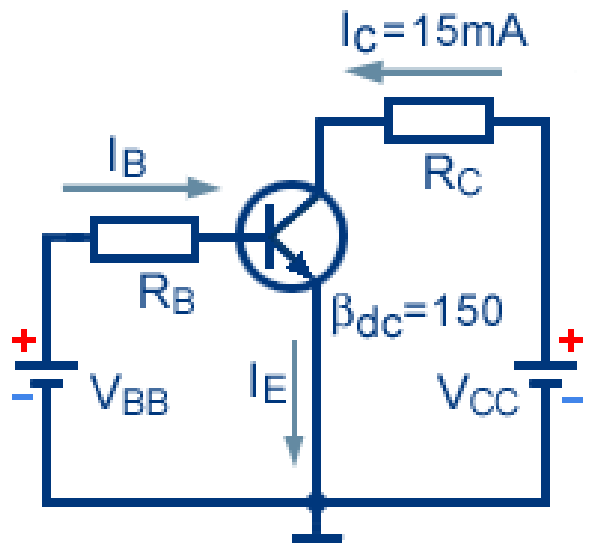
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 0.2 \cdot 10^3 = 200$$



$$I_C = ?$$

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

Примери



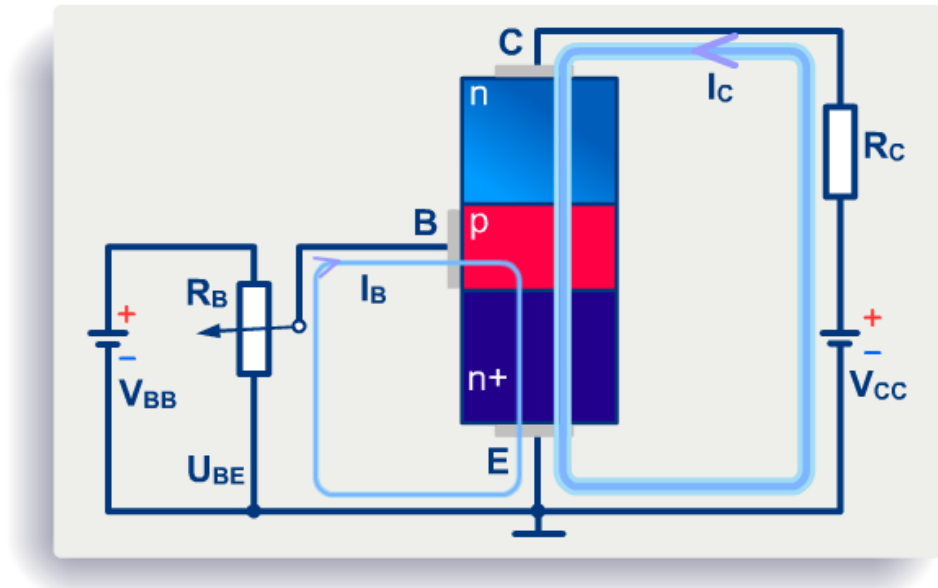
$$I_E = ?$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{150} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,1 \text{ mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = 15 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 15,1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 15,1 \text{ mA}$$

Коефициент на усилване по ток β



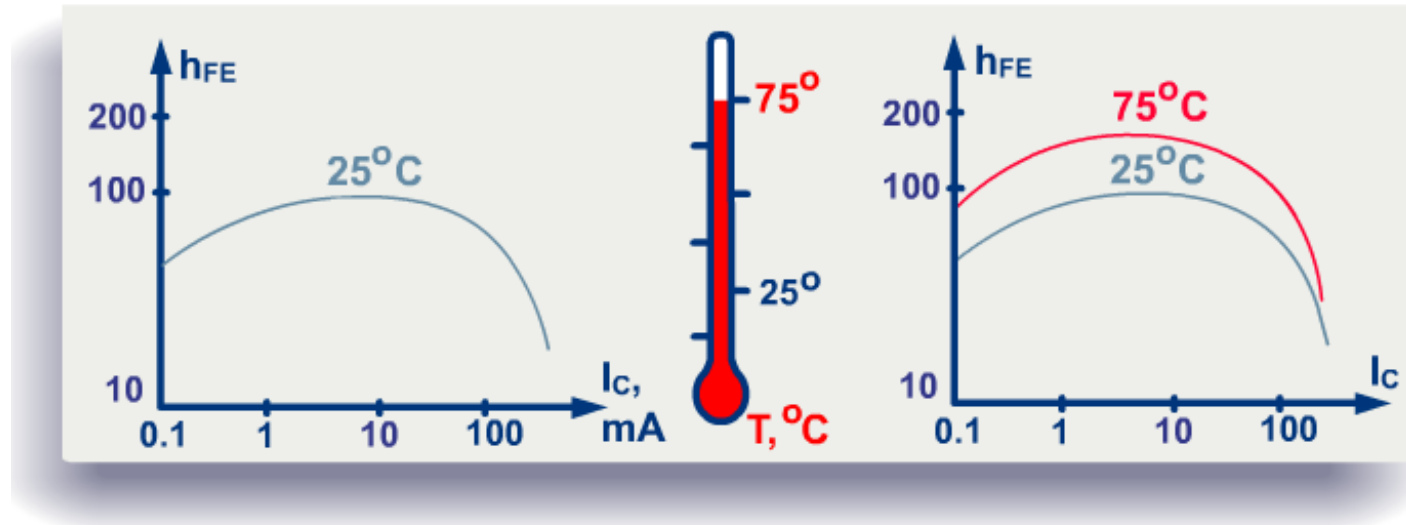
Коефициентът на усилване по ток в схема ОЕ е **много голям**, тъй като $I_C \gg I_B$.

За маломощни транзистори, β_{dc} типично е от 100 до 600.

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**.

Коефициент на усилване по ток β



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

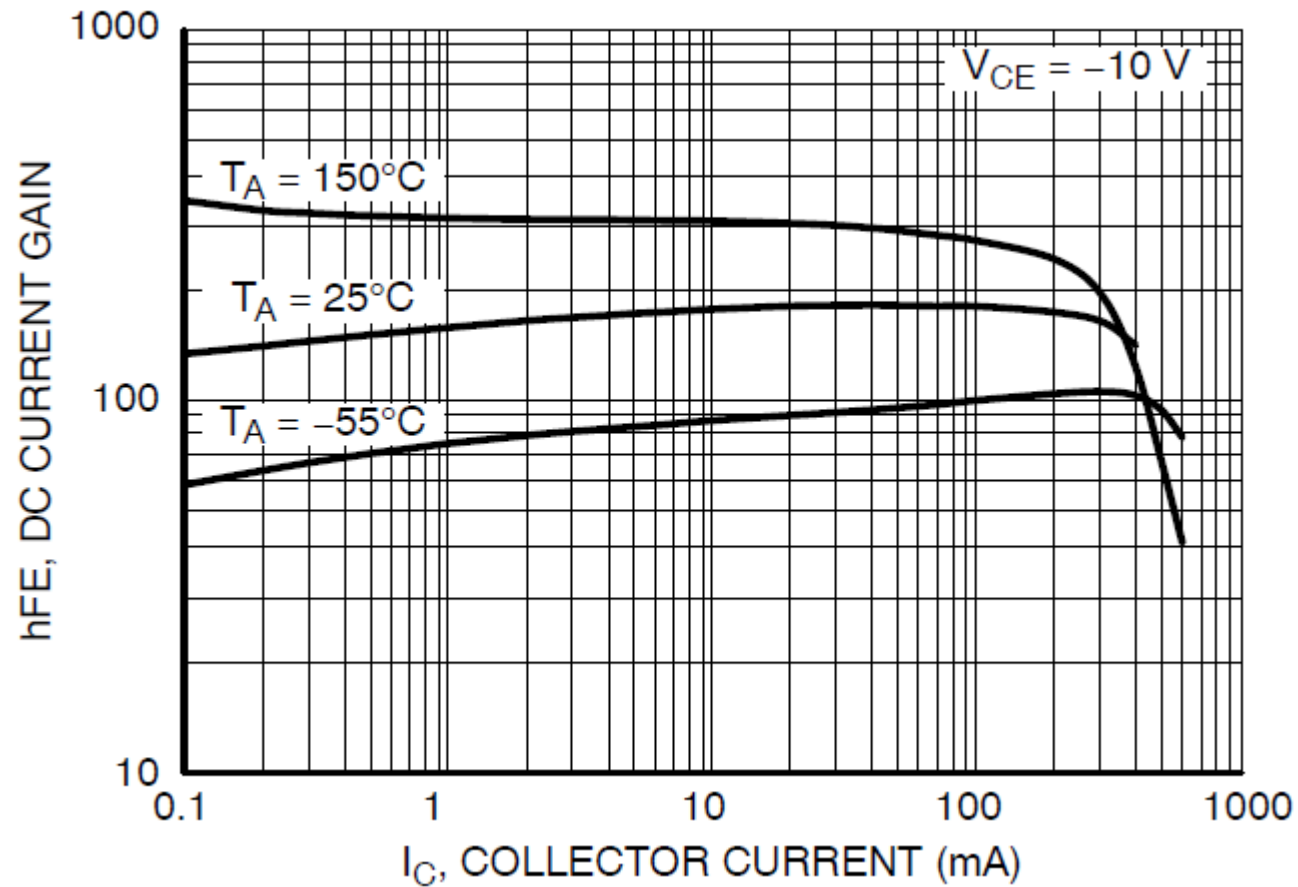
Поради производствените толеранси, коефициентът на усилване по ток може да варира в диапазон 3:1 при замяна с транзистор от същия тип.

Коефициент на усилване по ток β

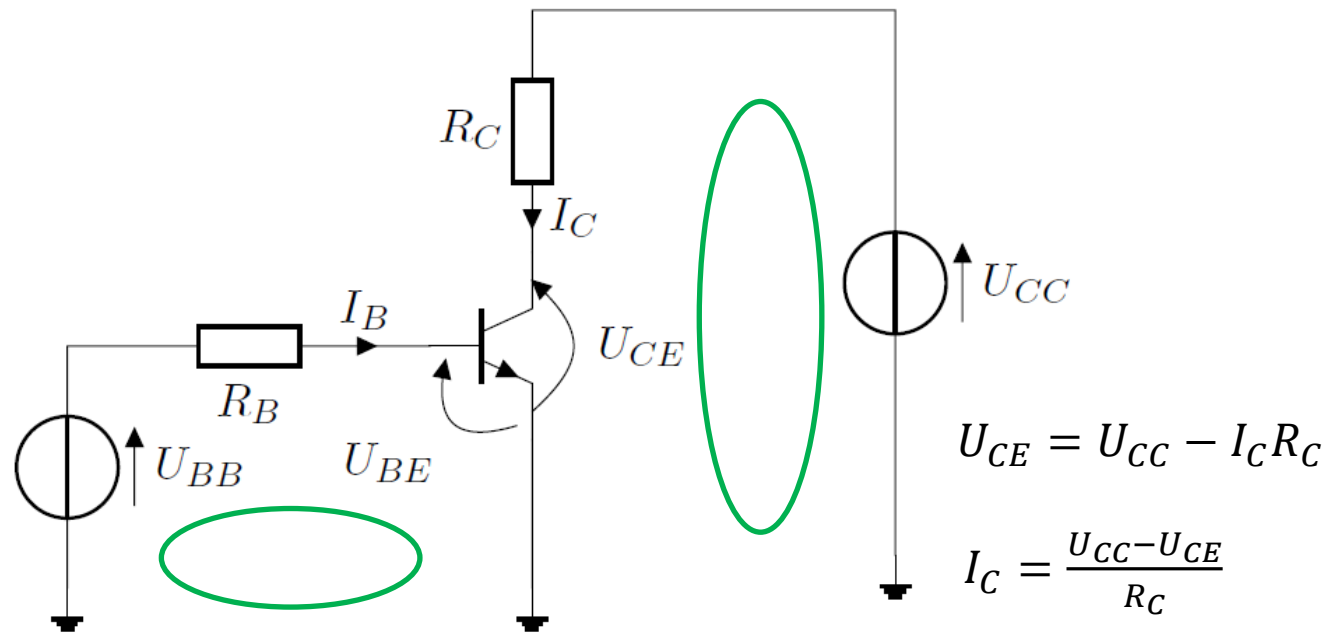
MIN

MAX

DC Current Gain	h_{FE}		
$(I_C = -0.1 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ V})$		75	—
$(I_C = -1.0 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ V})$		100	—
$(I_C = -10 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ V})$		100	—
$(I_C = -150 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ V})$ (Note 1)		100	300
$(I_C = -500 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ V})$ (Note 1)		50	—



Постоянно-токов режим



$$U_{BB} = U_{BE} + I_B R_B$$

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

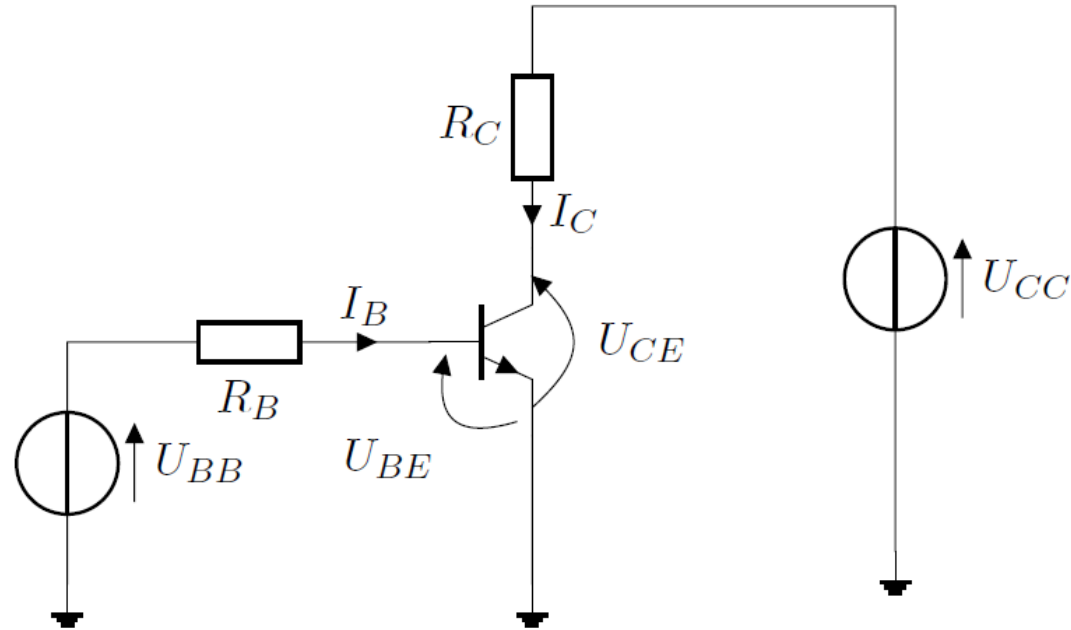
$$I_E = I_C + I_B$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C}$$

Примери

$$\begin{aligned}U_{BB} &= 5V \\ R_B &= 100k\Omega \\ I_B &= ?\end{aligned}$$



$$I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{100 \cdot 10^3} = 0,043 \cdot 10^{-3} A = 43 \cdot 10^{-6} A = 43 \mu A$$

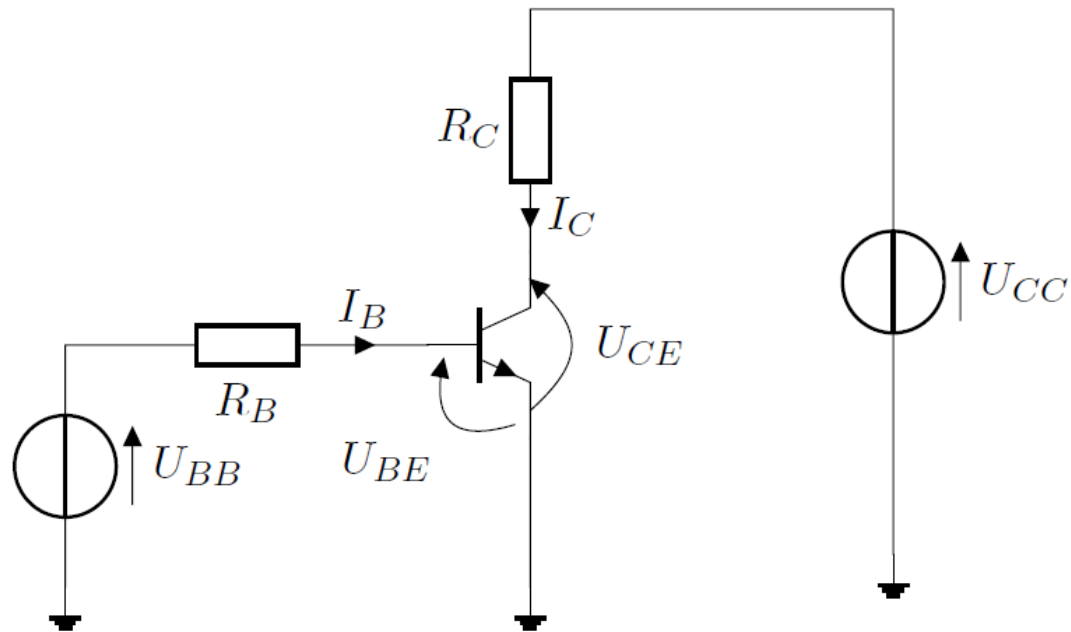
Примери

$$U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 3k\Omega$$

$$I_C = 1mA$$

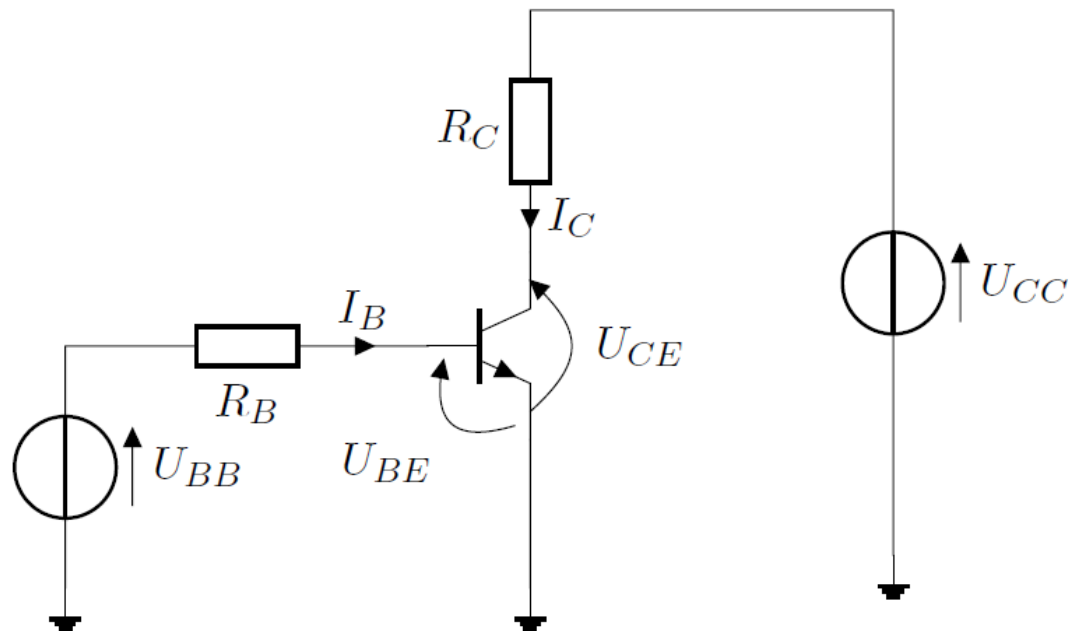
$$U_{CE} = ?$$



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

Примери

$$\begin{aligned}U_{CC} &= 12V \\ R_C &= 1.5k\Omega \\ R_B &= 330k\Omega \\ I_B &= 25\mu A \\ \beta_{DC} &= 200 \\ U_{CE} &= ?\end{aligned}$$



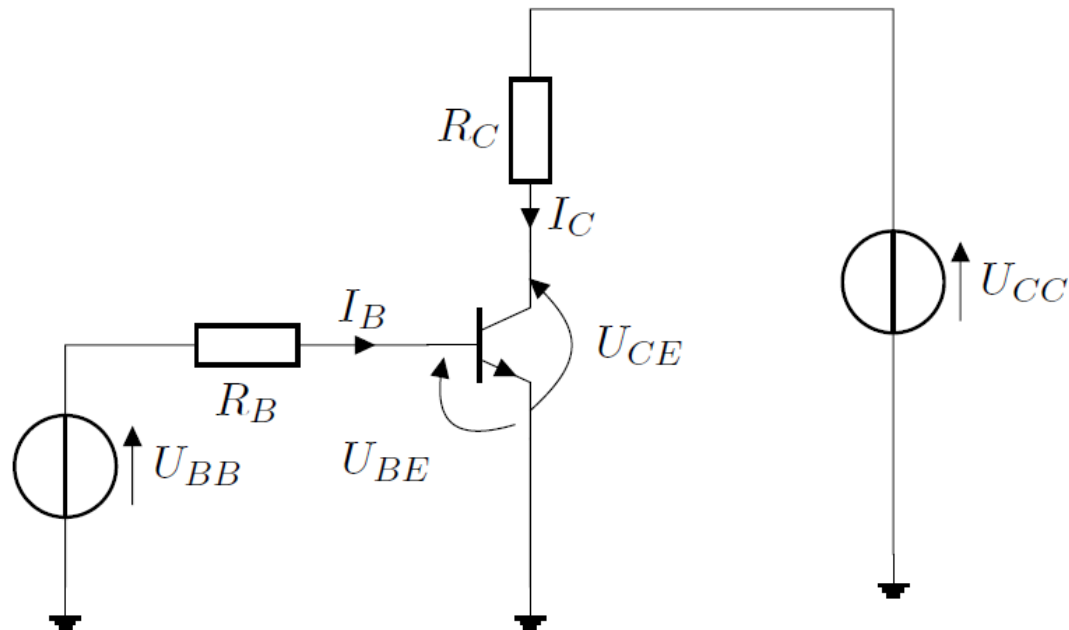
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C$$

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

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1.5 \cdot 10^3 = 12 - 7.5 = 4.5 \text{ V}$$

Примери

$$\begin{aligned}U_{CC} &= 12V \\ R_C &= 3.6k\Omega \\ R_B &= 200k\Omega \\ U_{BB} &= 4.7V \\ \beta_{DC} &= 100 \\ P_C &= ?\end{aligned}$$



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

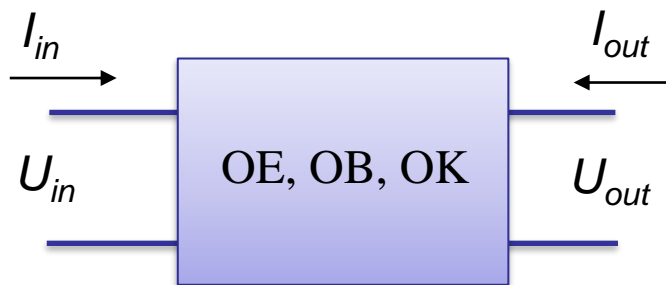
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4.7 - 0.7}{200 \cdot 10^3} = 0.02 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.02 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0.02 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 3.6 \cdot 10^3 = 12 - 7.2 = 4.8 \text{ V}$$

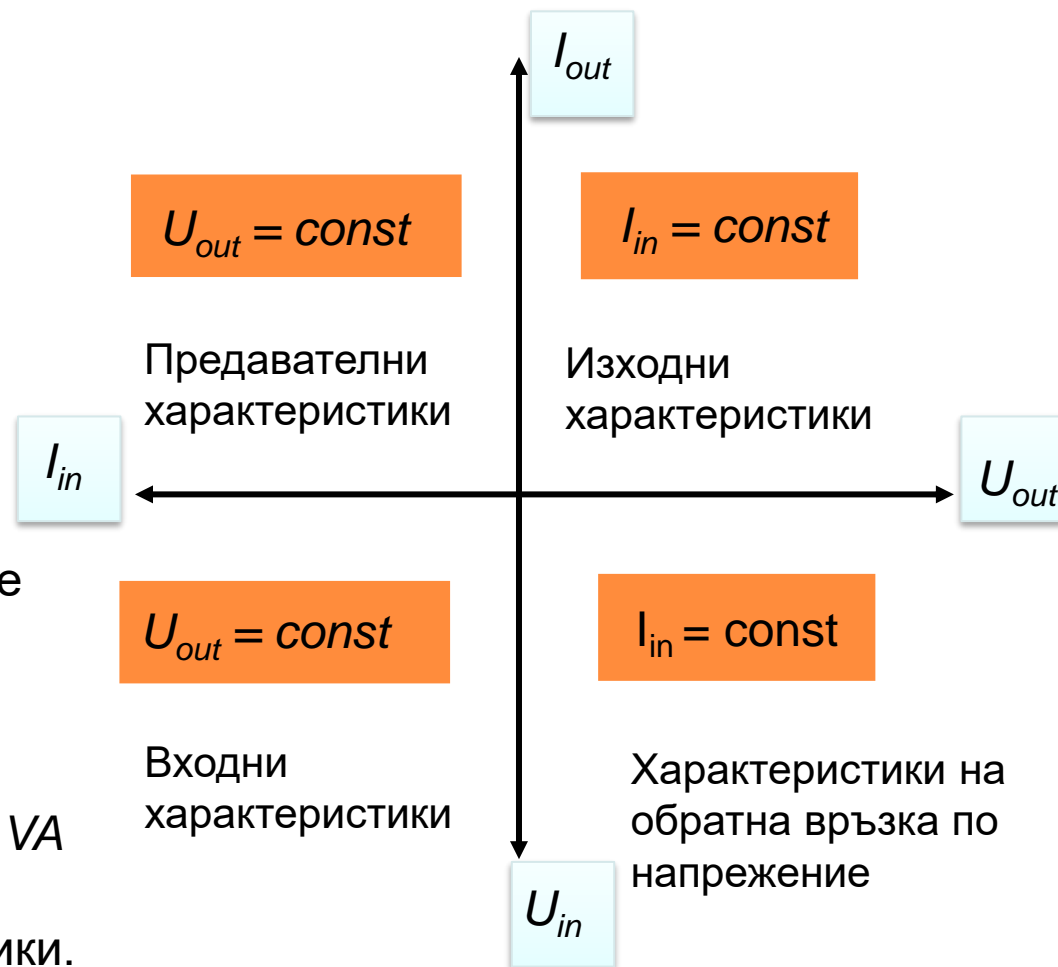
$$P_C = I_C \cdot U_{CE} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 4.8 = 9.6 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 9.6 \text{ mW}$$

VA характеристики

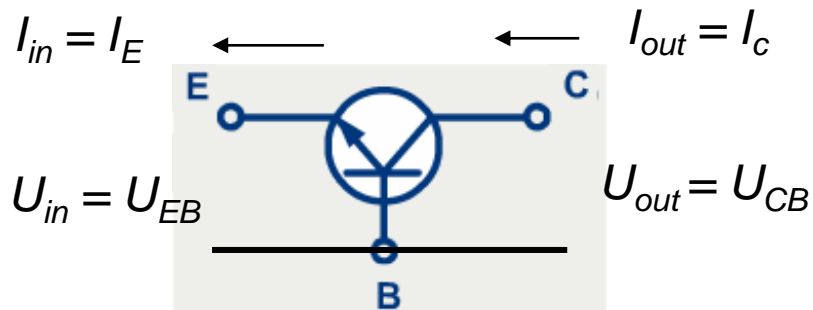


Съществува взаимна връзка между входните и изходни токове и напрежения в транзистора.

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

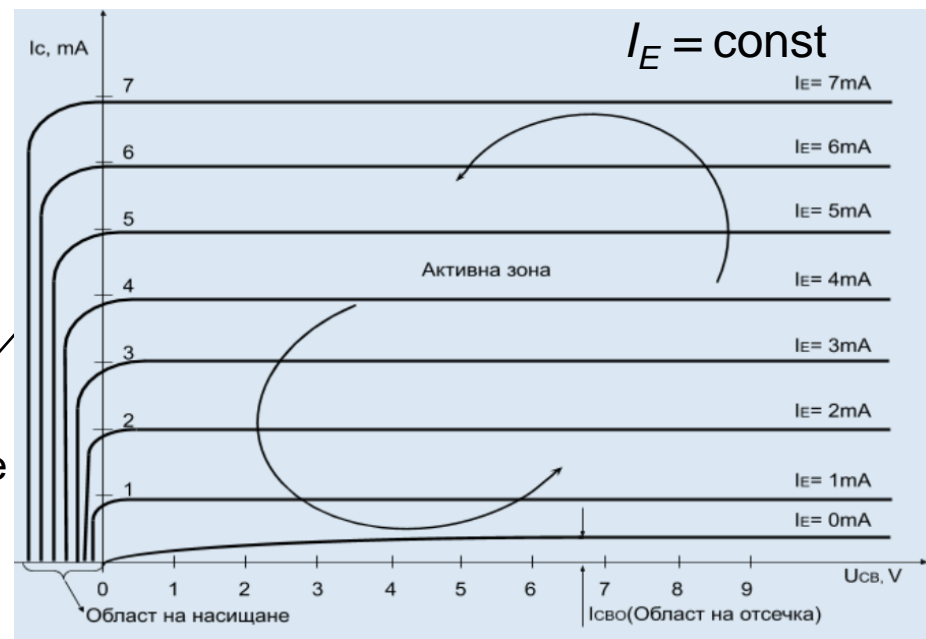


ОБ – изходни характеристики



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

Насищане



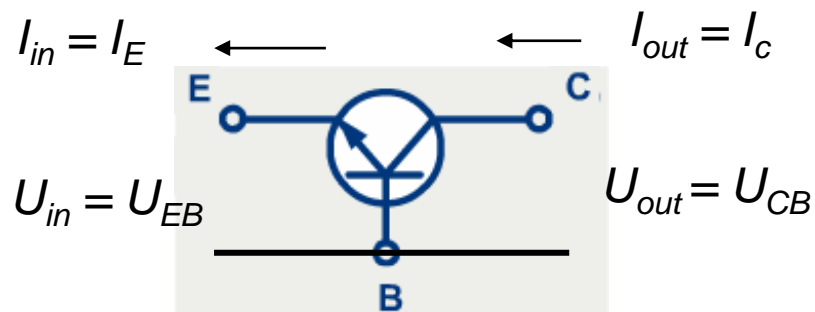
Отсечка ($I_E = 0$, $I_C = I_{CB0}$)

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

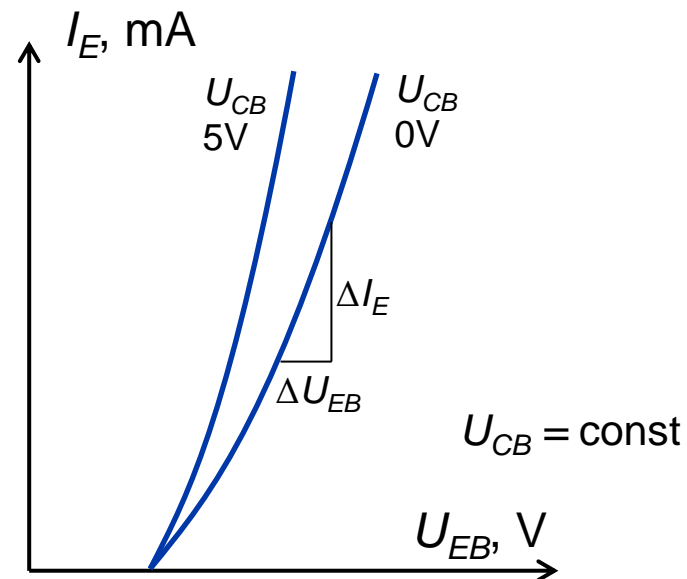
$$\alpha = f(I_E) \quad r_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} \Big|_{I_E = \text{const}}$$

Изходно диференциално
съпротивление в ОБ

ОБ – входни характеристики



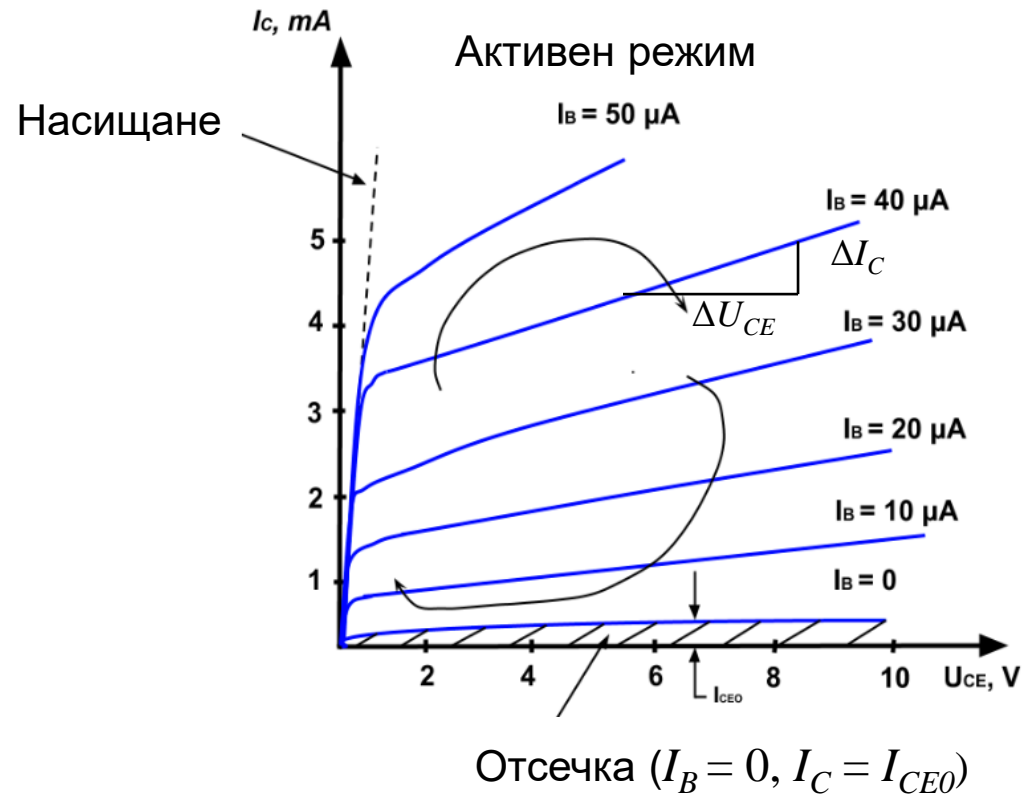
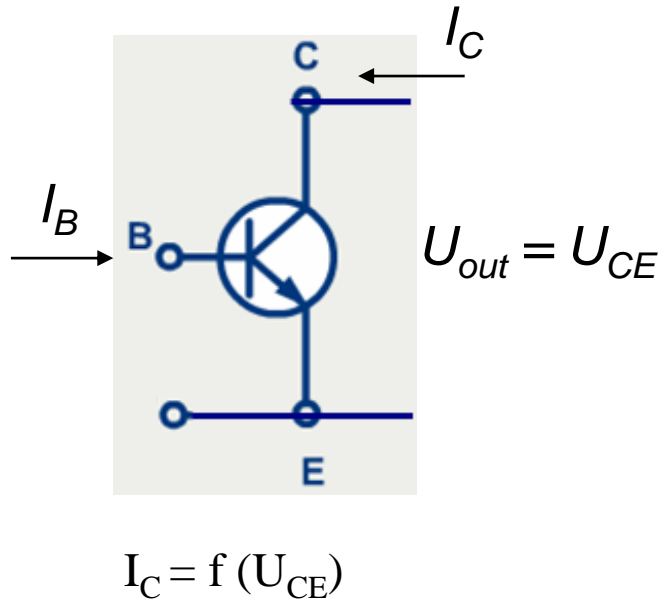
$$I_E = f(U_{EB}) \Big|_{U_{CB} = \text{const}}$$



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

Входно диференциално съпротивление в ОБ

Общ Емитер – изходни характеристики



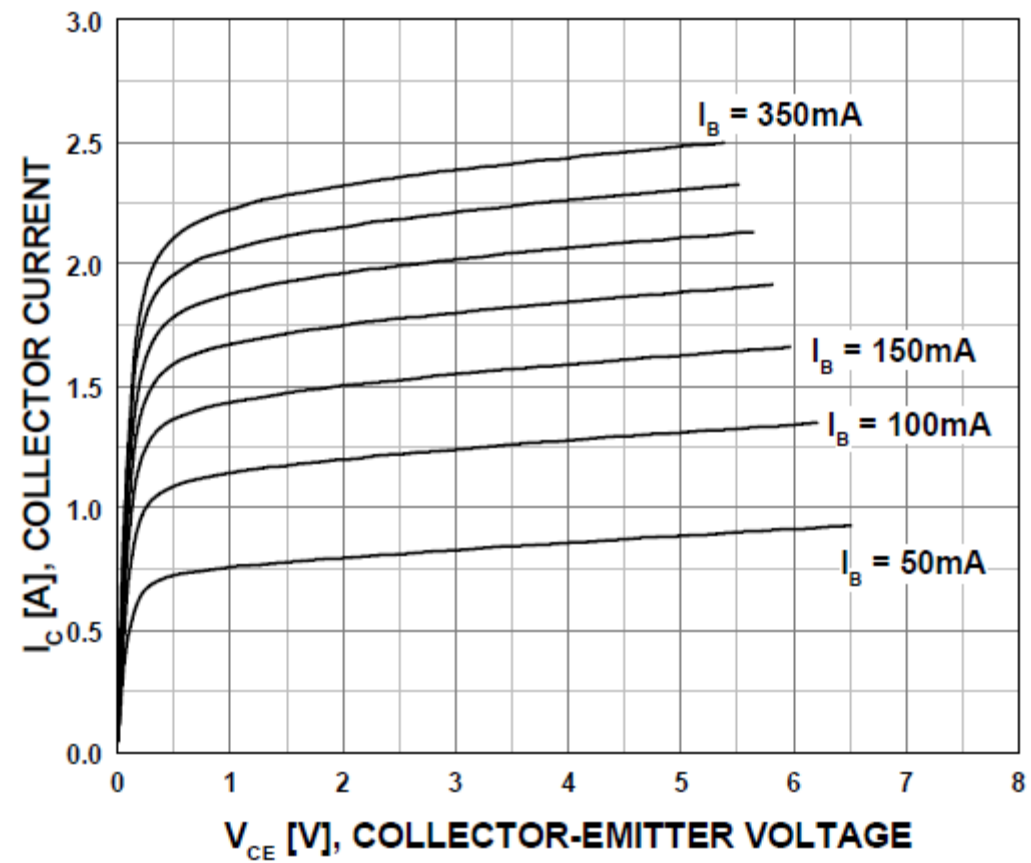
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} + \frac{U_{CE}}{r_C^*}$$

$$\beta = f(I_C)$$

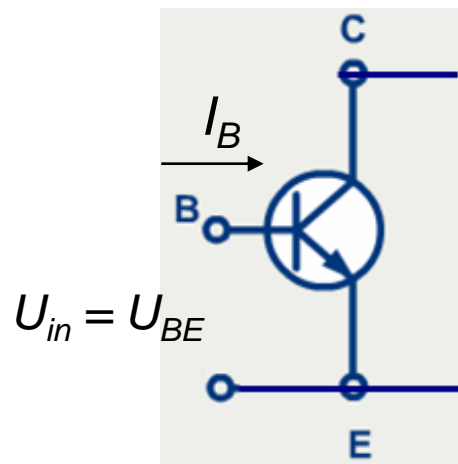
$$r_C^* = \frac{dU_{CE}}{dI_C} = \frac{r_C}{1 + \beta}$$

Изходно диференциално
съпротивление в ОЕ

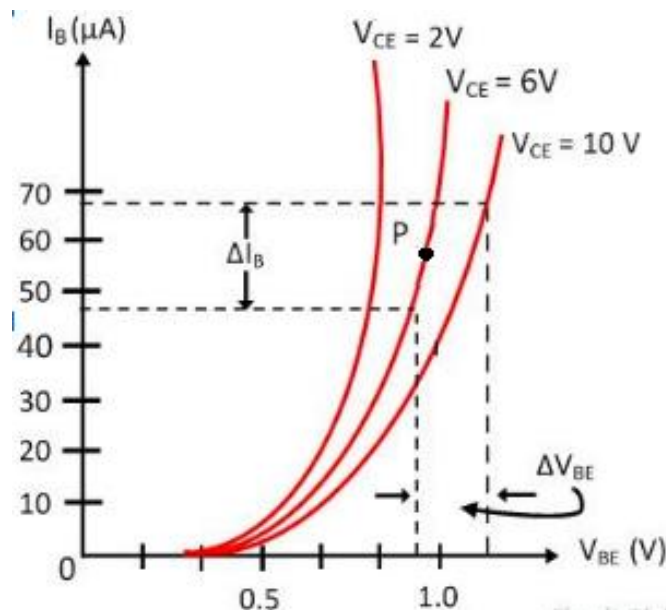
Общ Емитер – изходни характеристики



ОЕ – входни характеристики



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

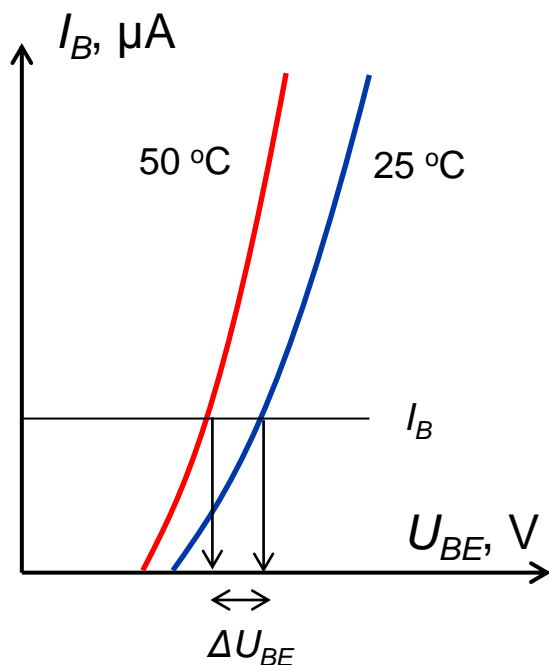


$$r_{in} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

Входно диференциално
съпротивление в ОЕ

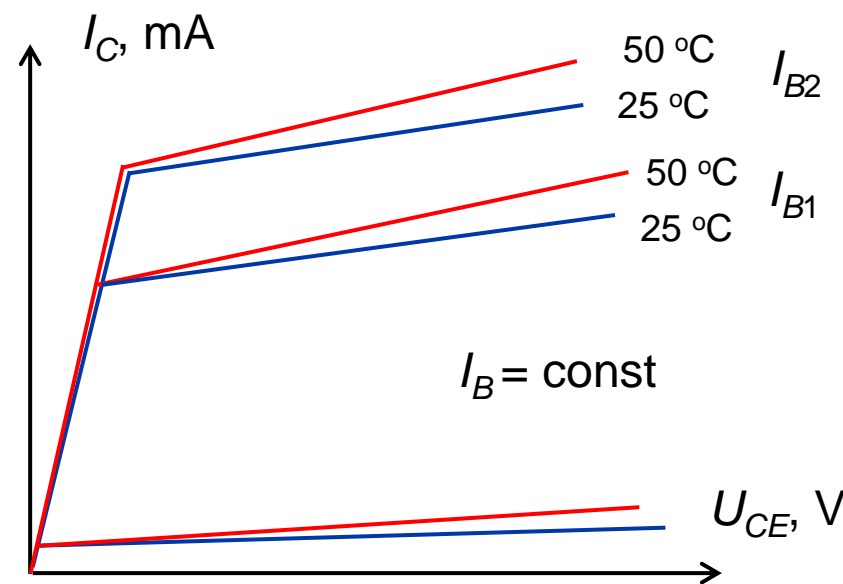
Влияние на температурата

$$TKU_{BE} < 1$$



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

$$\beta = f(T)$$



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 $T_{C\max}$

Мах мощност в колектора $P_{C\max}$

$$P = U_{CE} I_C$$

Мощност, отделена в колекторния преход

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

Мощност, разсеяна в околната среда

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

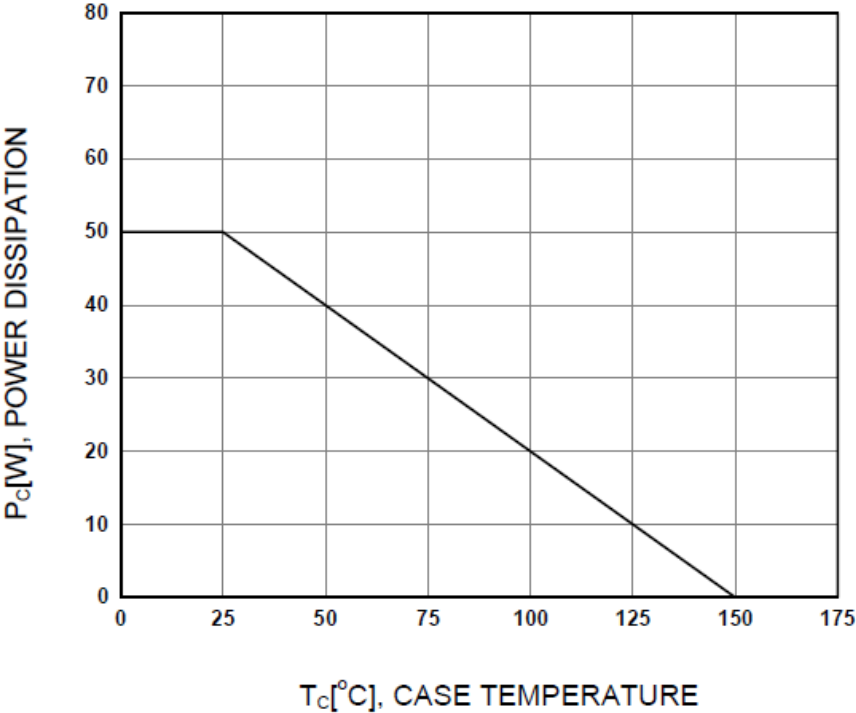
Отделената мощност трябва винаги да е по-малка от мах допустимата $P_{C\max}$. В противен случай транзисторът изгаря.

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted

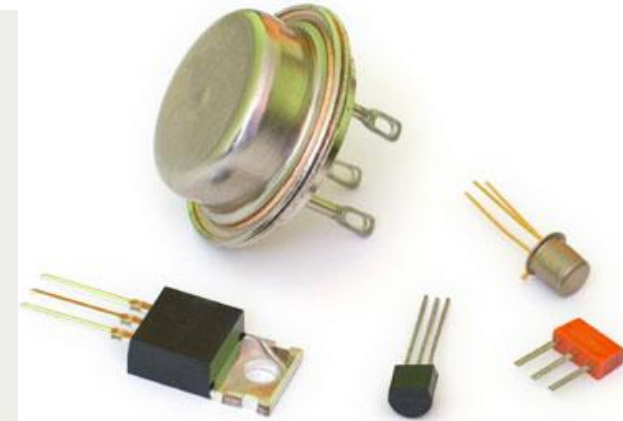
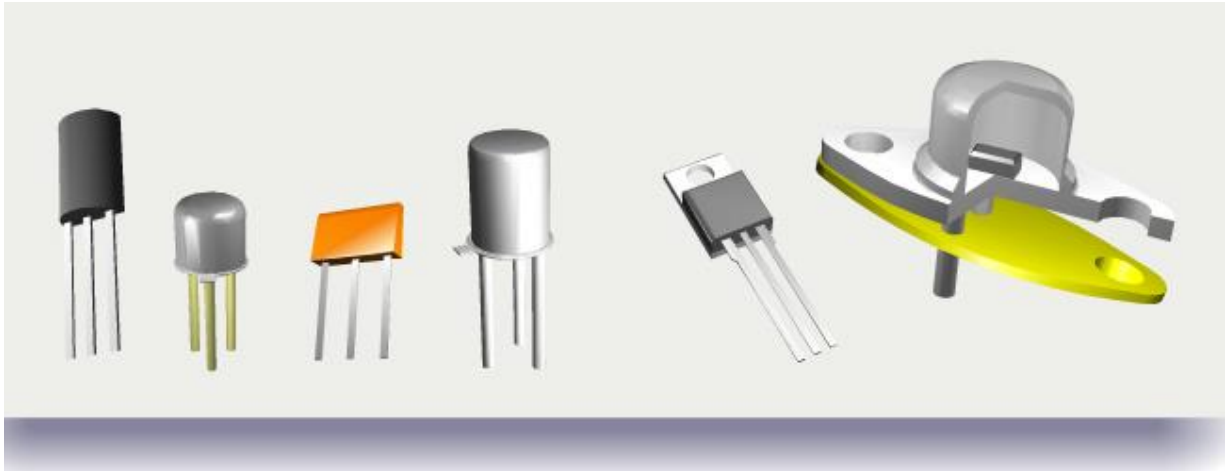
Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	1100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	800	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	7	V
I_C	Collector Current (DC)	3	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I_B	Base Current	1.5	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^{\circ}\text{C}$)	50	W
T_J	Junction Temperature	150	$^{\circ}\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 55 ~ 150	$^{\circ}\text{C}$

$$P = U_{CE}I_C$$

Мощност, отделена в колекторния преход



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

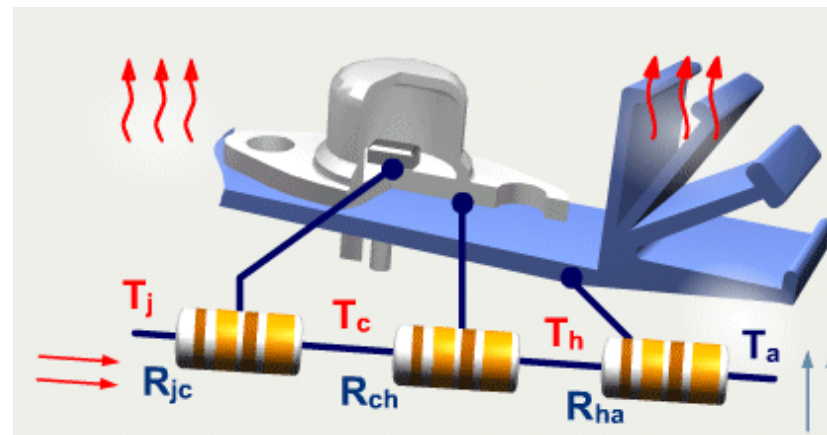
Топлинното съпротивление R_{th} показва ефективността при отделяне на топлината от транзистора и се измерва в K/W или в $^{\circ}C/W$.

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

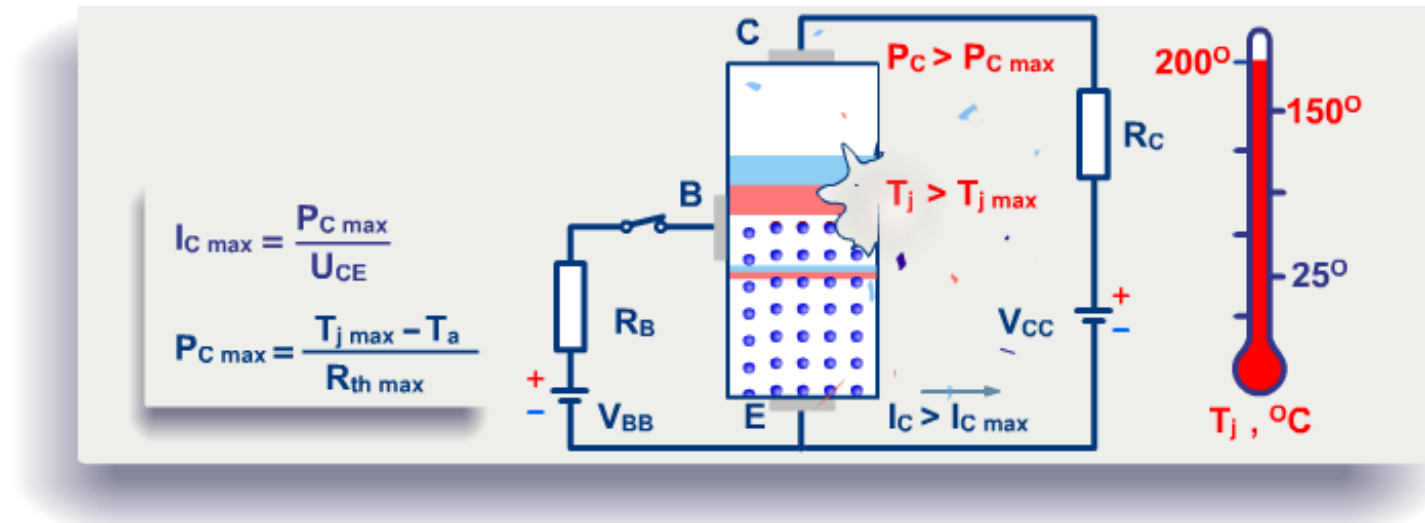
Колкото **по-малко е топлинното съпротивление** толкова **по-голяма** е максимално допустимата мощност.

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

Радиатор



Максимален колекторен ток



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

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

Област на безопасна работа (Safe operating area)

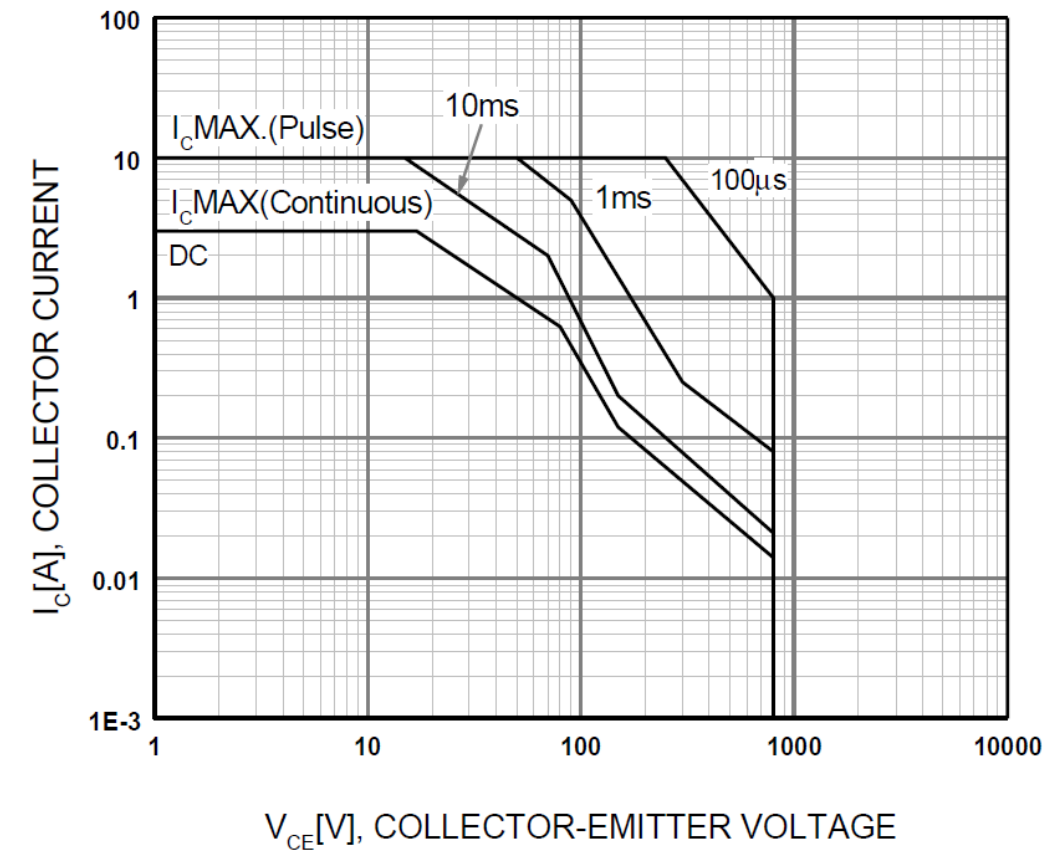
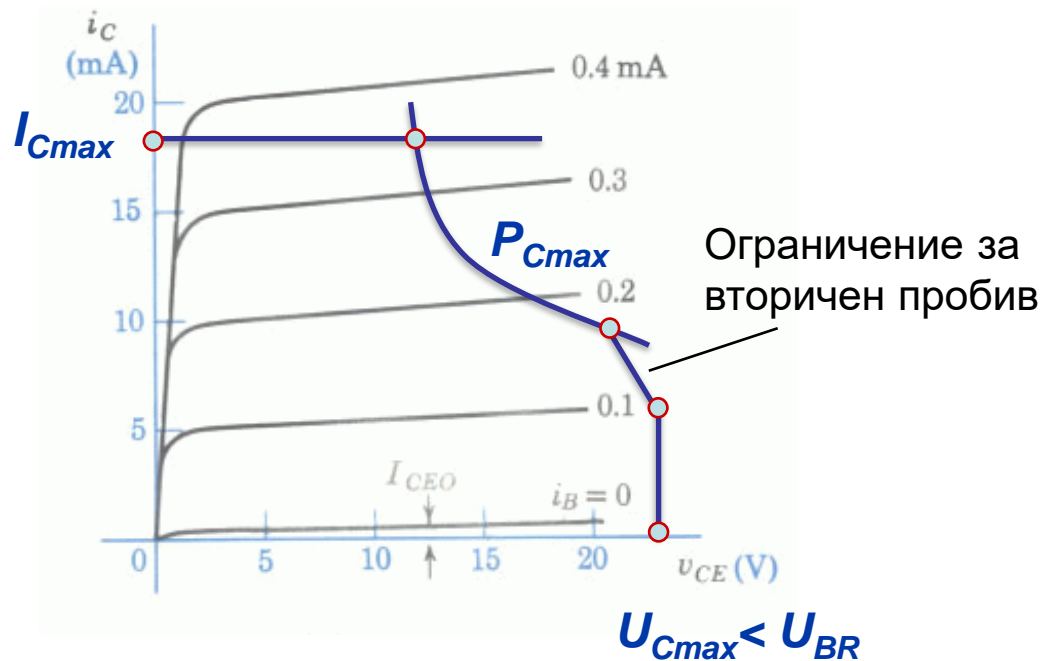
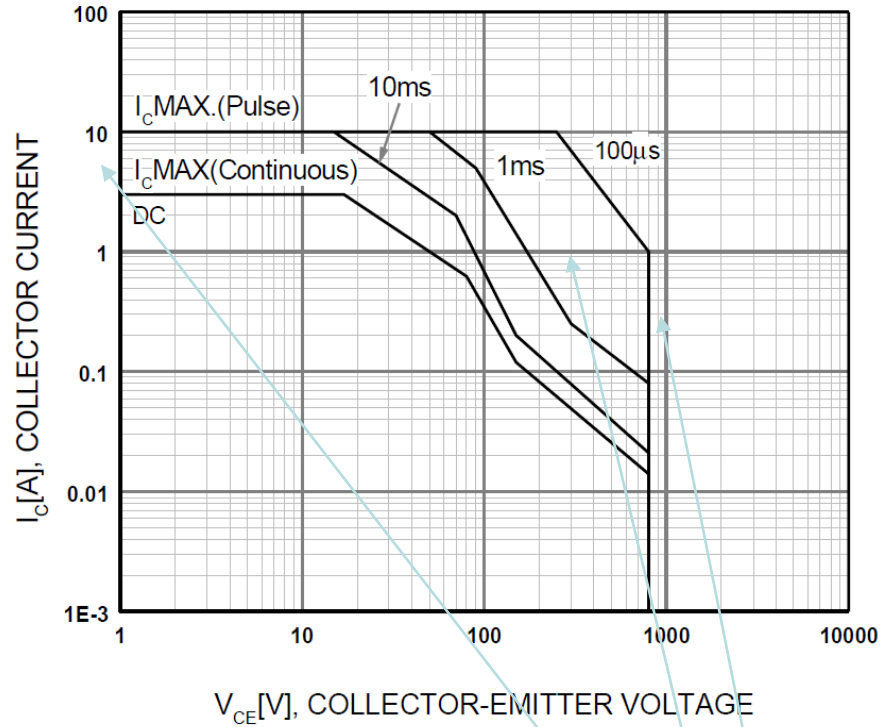


Figure 6. Safe Operating Area

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

Област на безопасна работа (Safe operating area)



Absolute Maximum Ratings $T_C=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	1100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	800	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	7	V
I_C	Collector Current (DC)	3	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I_B	Base Current	1.5	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^{\circ}\text{C}$)	50	W
T_J	Junction Temperature	150	$^{\circ}\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 55 ~ 150	$^{\circ}\text{C}$

Област на безопасна работа (Safe operating area)

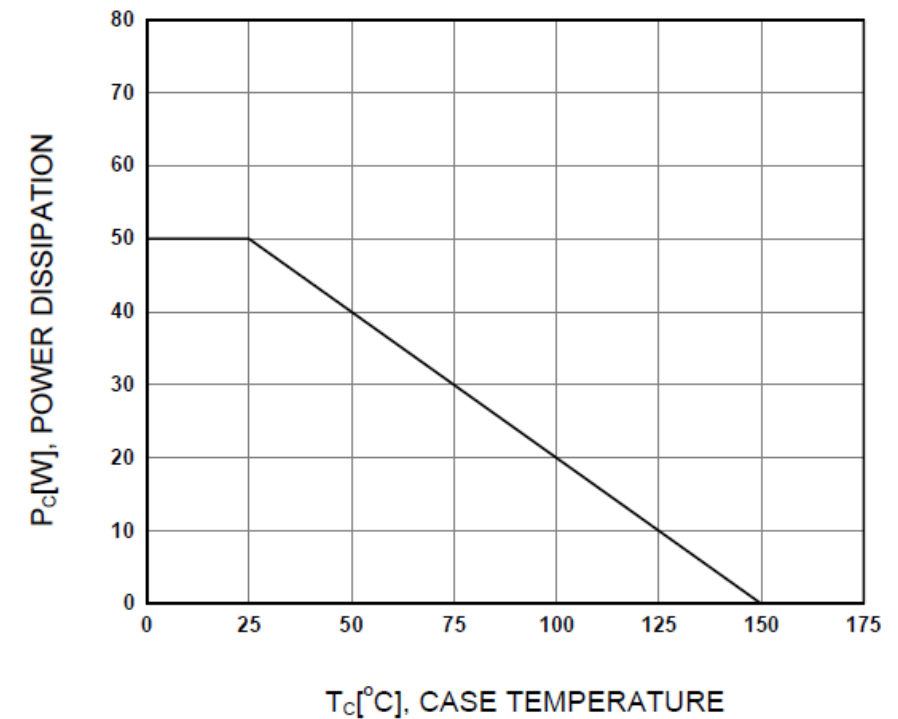
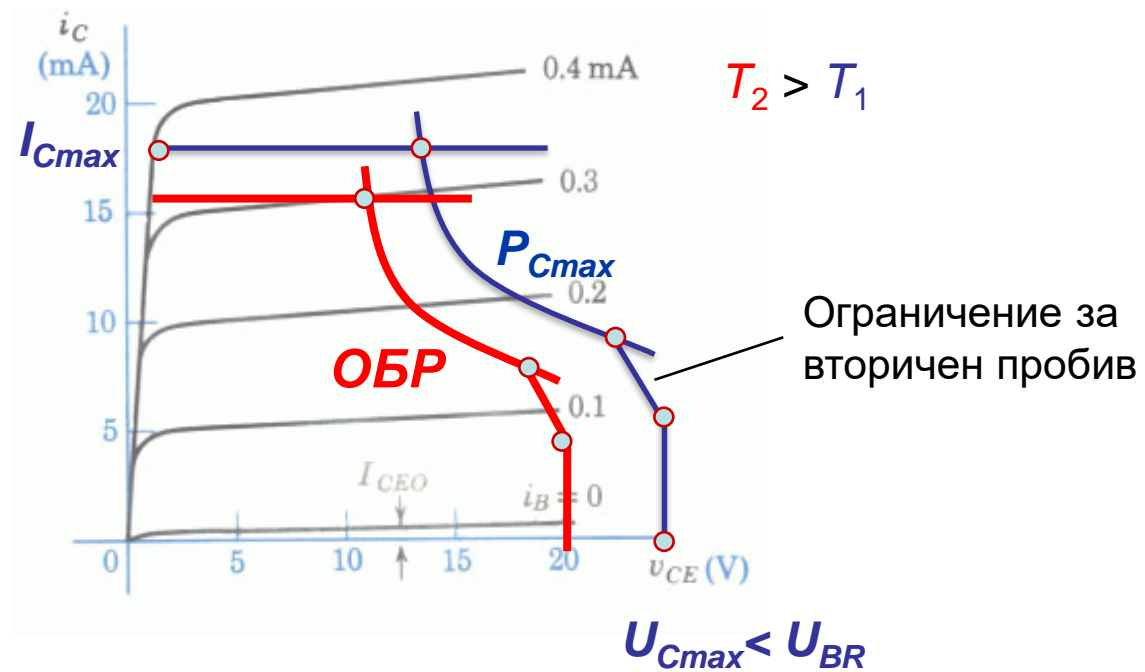
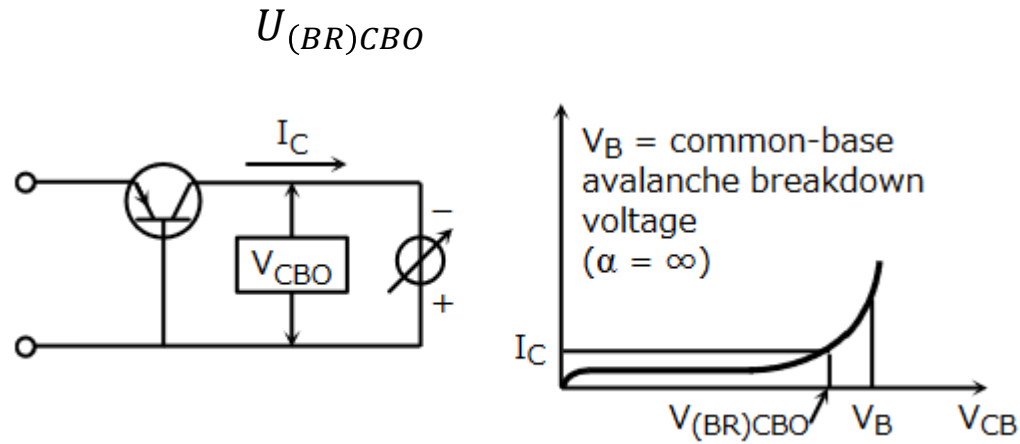


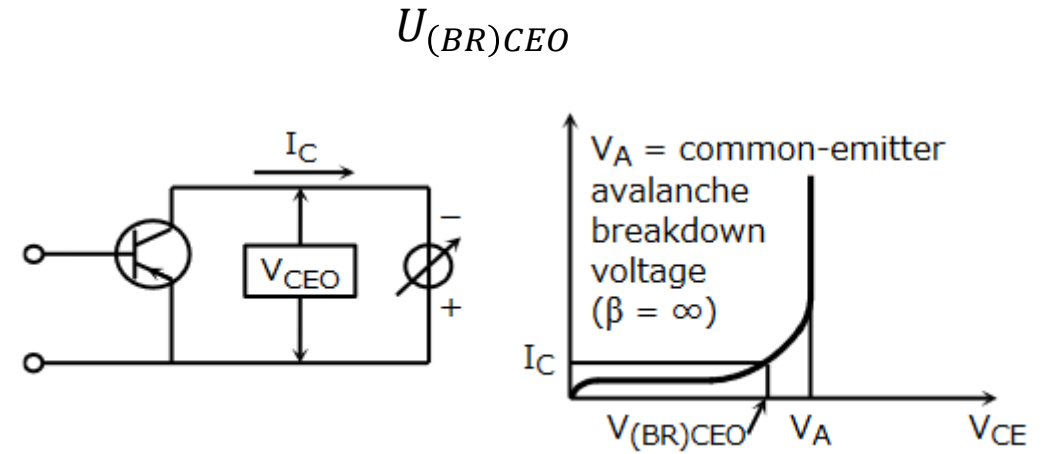
Figure 8. Power Derating

С увеличаване на температурата областта на безопасна работа се “свива”.

Пробиви в транзистора



Collector-base breakdown voltage with emitter open - Това е пробивното напрежение в схема обща база



Collector-emitter breakdown voltage with base open - Това е пробивното напрежение в схема общ емитер

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector – Emitter Voltage	V_{CEO}	40	Vdc
Collector – Base Voltage	V_{CBO}	60	Vdc
Emitter – Base Voltage	V_{EBO}	6.0	Vdc

OFF CHARACTERISTICS

Collector – Emitter Breakdown Voltage (Note 2) ($I_C = 1.0 \text{ mAdc}$, $I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	40	–	Vdc
Collector – Base Breakdown Voltage ($I_C = 10 \text{ }\mu\text{Adc}$, $I_E = 0$)	$V_{(BR)CBO}$	60	–	Vdc
Emitter – Base Breakdown Voltage ($I_E = 10 \text{ }\mu\text{Adc}$, $I_C = 0$)	$V_{(BR)EBO}$	6.0	–	Vdc