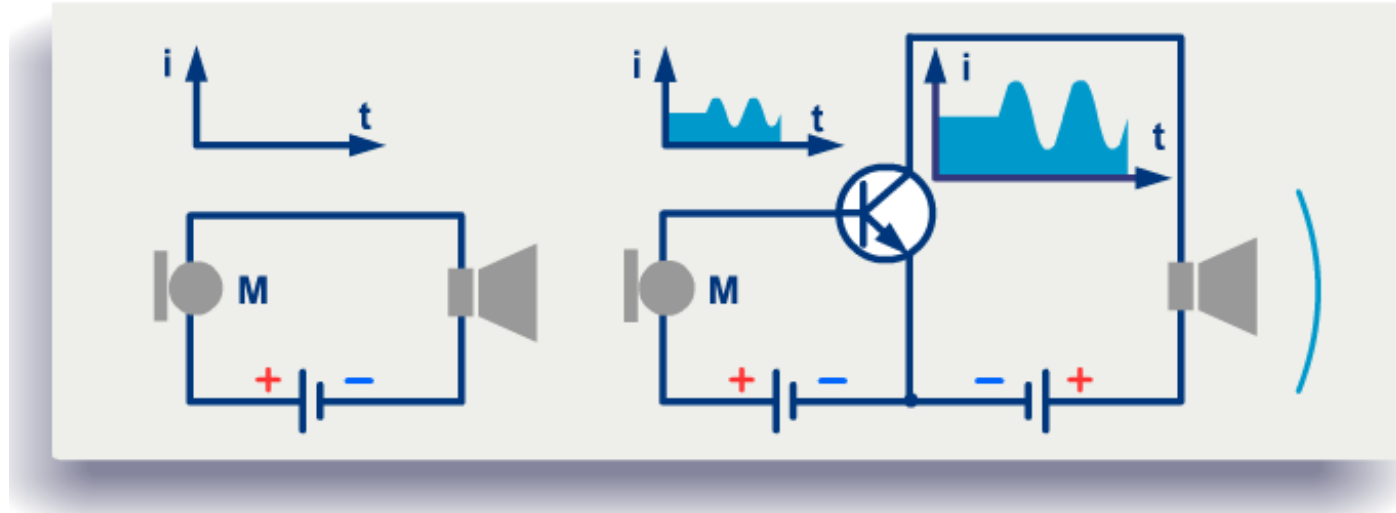




Биполярни Транзистори

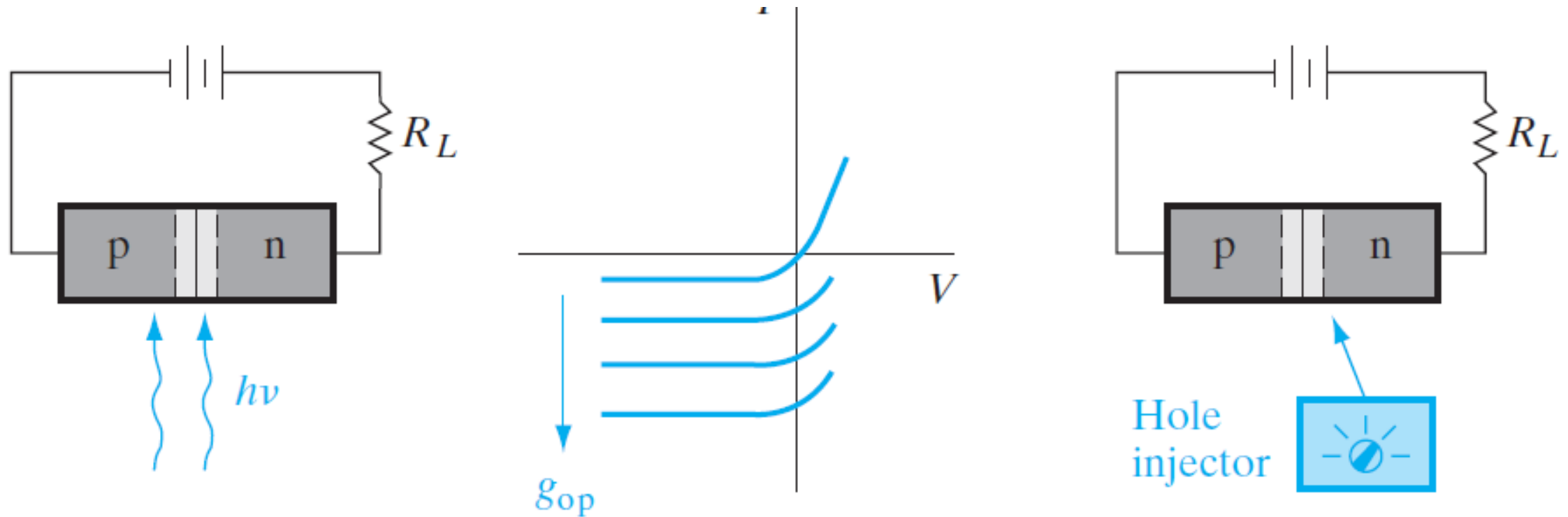
Основни свойства



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

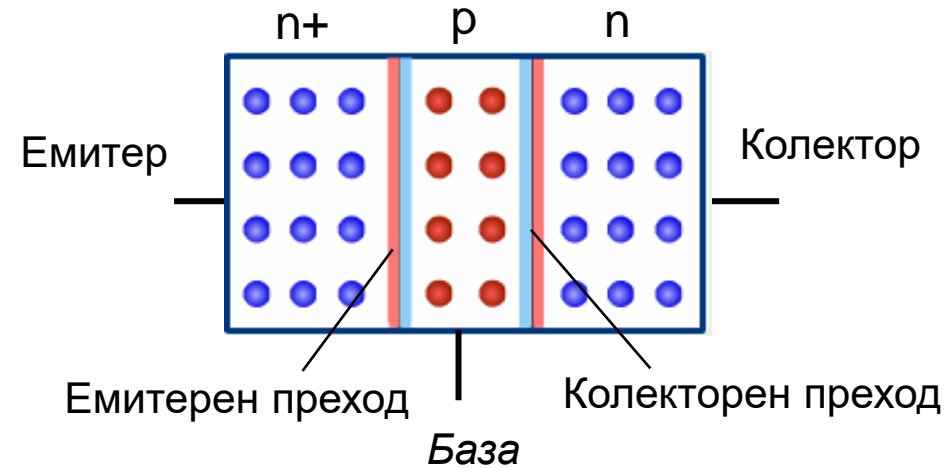
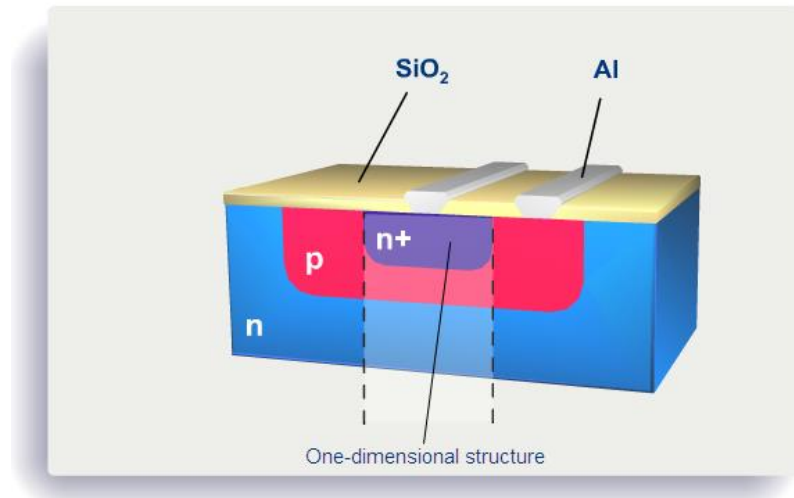


Обратният ток през p-n прехода зависи от генерирането на двойки електрон-дупка, но не и от приложеното напрежение.

Възможно ли е инжектиране на неосновни токоносители в близост до прехода електрически вместо оптически?

Ако е така, бихме могли да контролираме обратния ток на прехода просто чрез промяна скоростта на инжектиране на неосновни носители.

Структура на транзистора



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

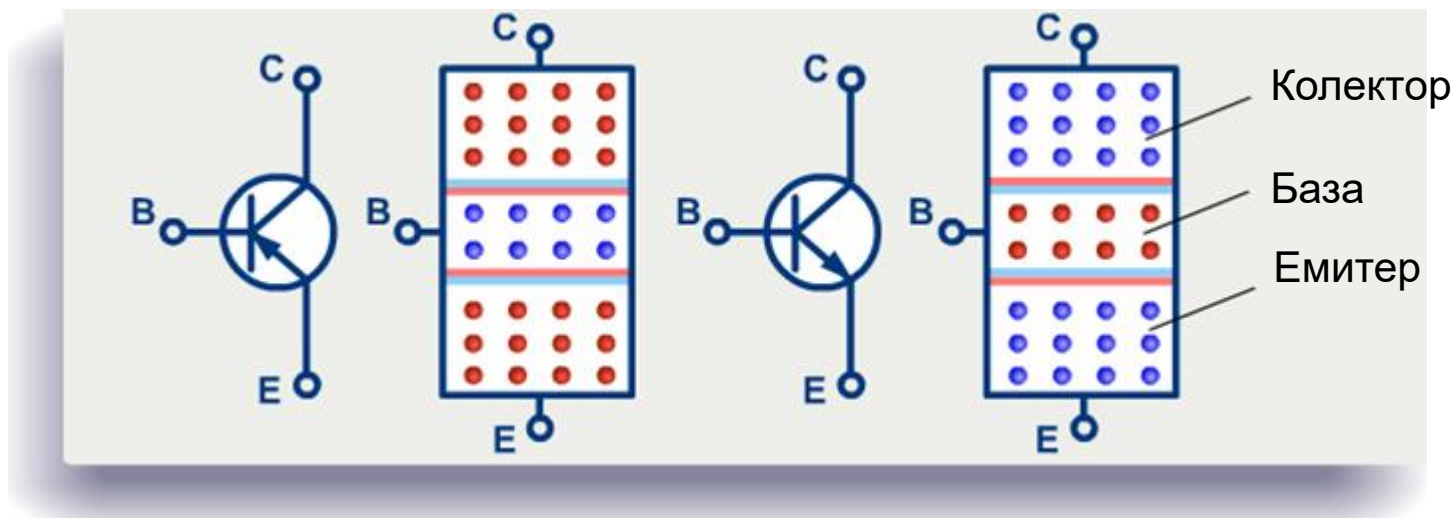
Емитерът е силно легиран и инжектира токоносители.

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

Колекторът събира токоносителите преминали през базата.

Вследствие на дифузията на свободни токоносители, в p-n преходите се образуват обеднени област с бариерен потенциал от около 0.7V при 25°C за Si.

Типове и символи



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 режим

- емитерен преход – право включване
- колекторен преход – обратно включване

Режим на отсечка

- емитерен преход – обратно включване
- колекторен преход – обратно включване

Режим на насищане

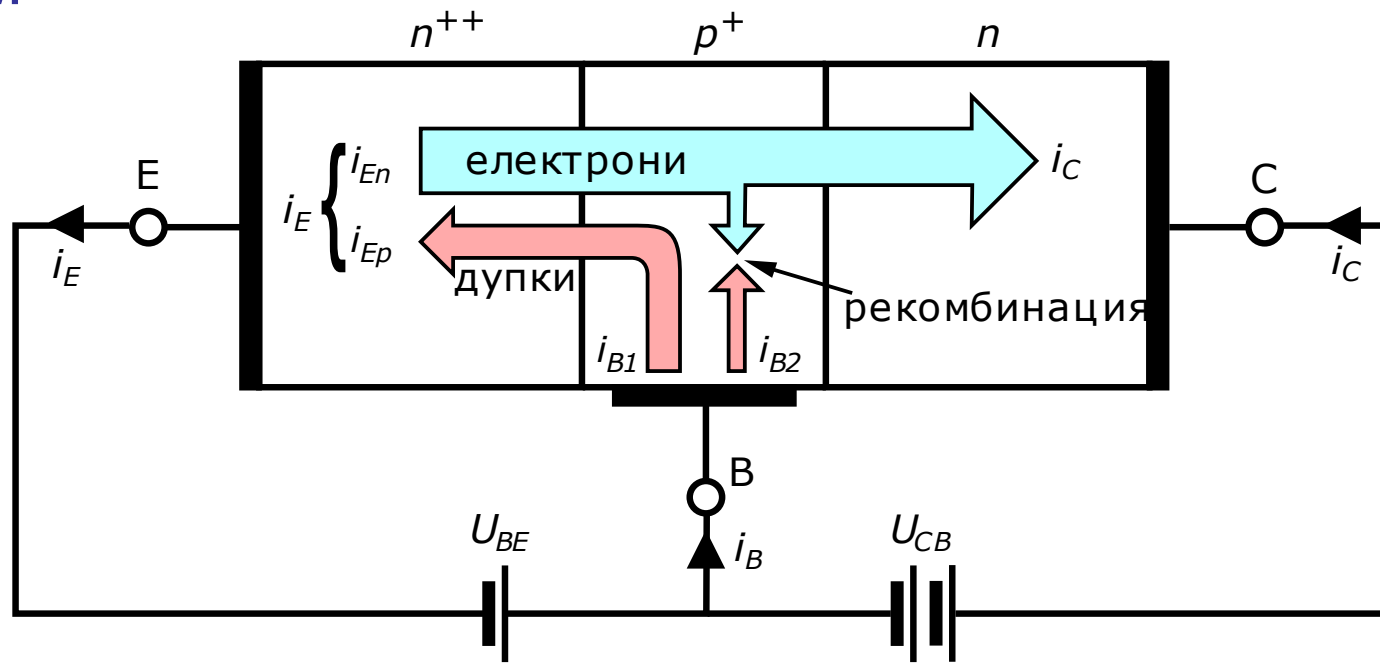
- емитерен преход – право включване
- колекторен преход – право включване

Инверсен

- емитерен преход – обратно включване
- колекторен преход – право включване



Активен режим

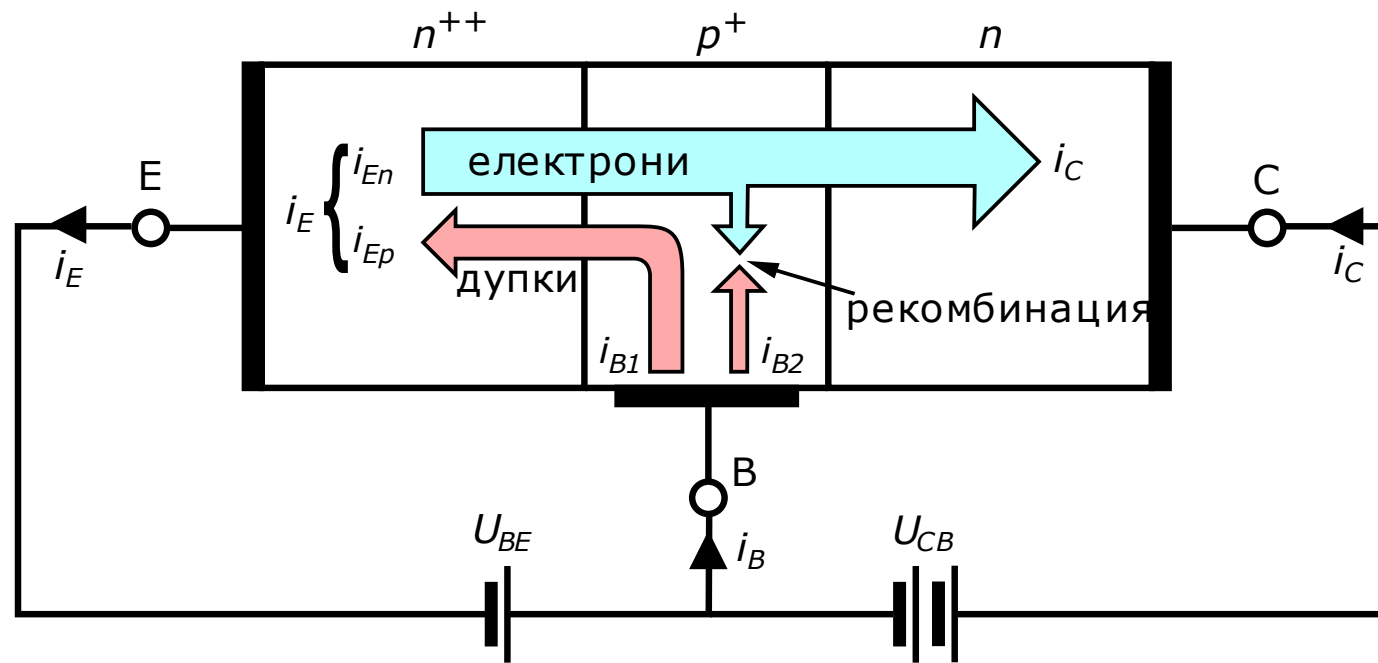


Биполярният транзистор нормално е запушен. За да започне да провежда ток, трябва на двата р-п прехода да се подадат постоянни напрежения.

В **активен режим** р-п 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

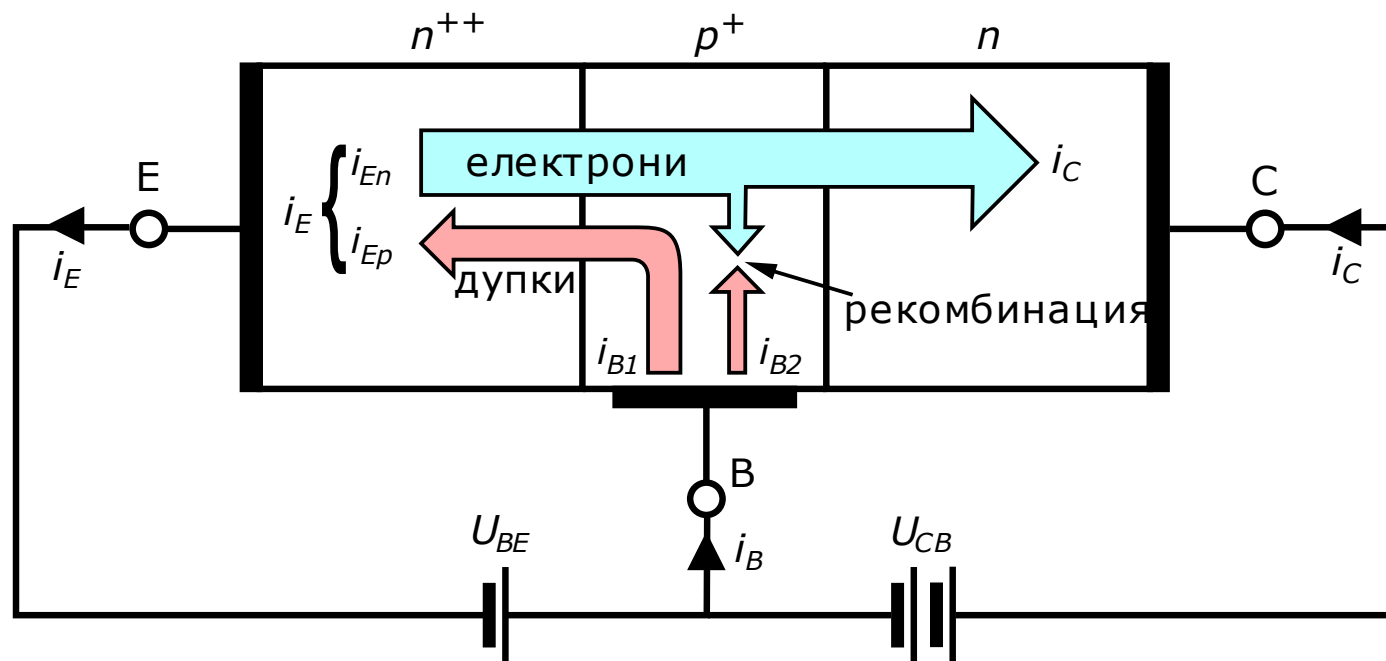


Ако U_{BE} е по-голям от потенциалната бариера на емитерния преход, започва явлението **инжекция**.

Тъй като емитерът е по-силно легиран от базата, инжекцията е едностранен процес и токът през прехода се състои **предимно от електрони**.

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

Физически процеси в базата

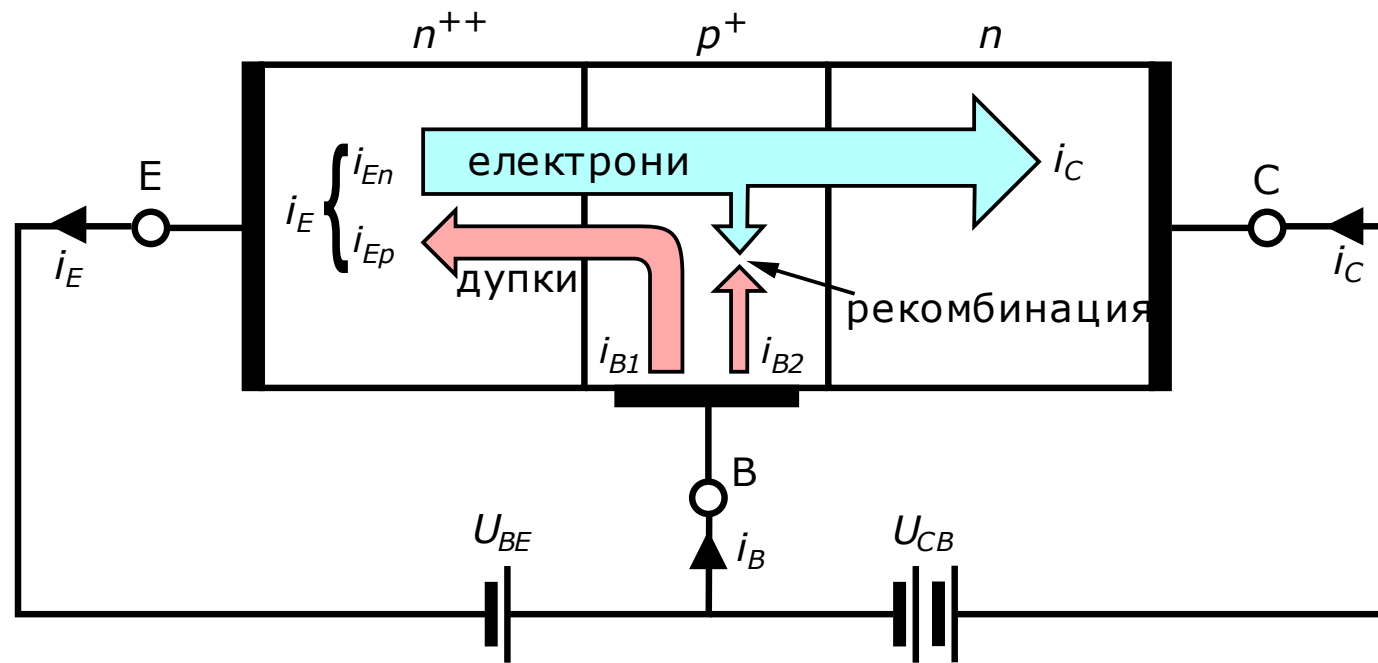


Електроните, навлизайки в P базата, са неосновни токоносители там. Тъй като базата е много тънка, незначителен брой електрони **рекомбинират** с дупки в базата и **по-голяма част** от тях достигат до колекторния преход.

$$\chi = \frac{I_{Cn}}{I_{En}} < 1$$

Коефициент на пренасяне

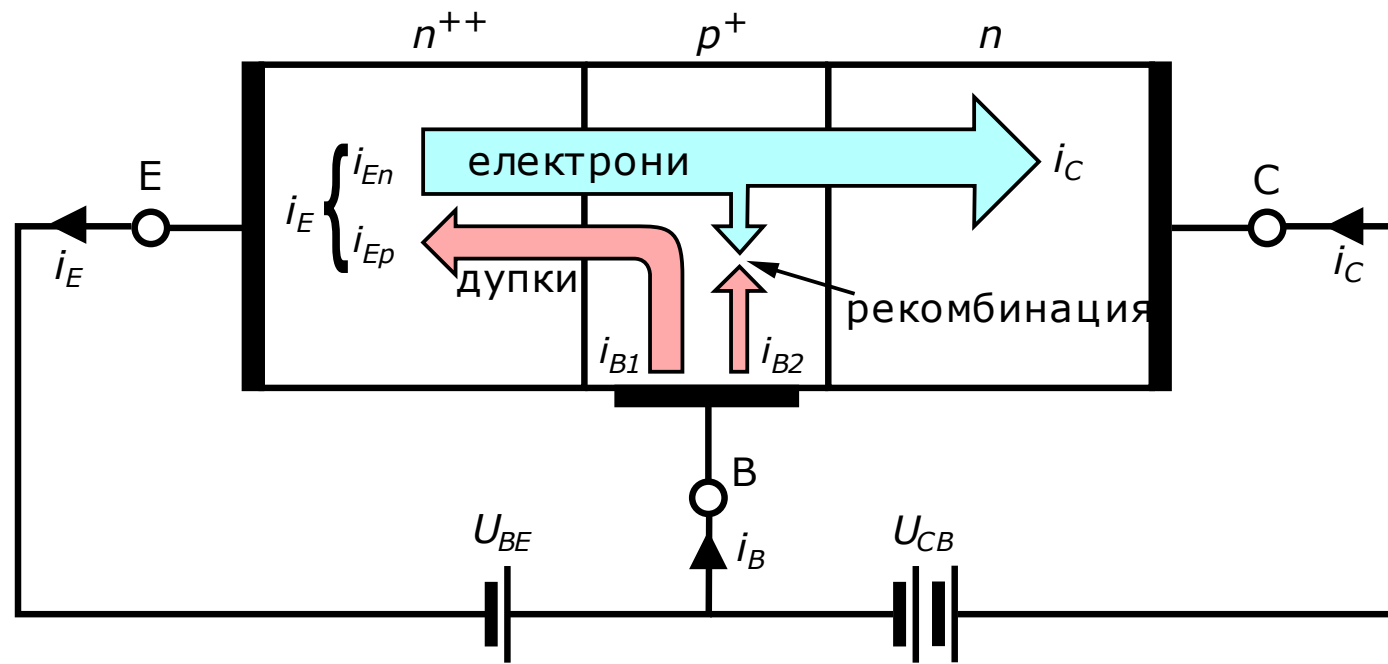
Физически процеси в колектора



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

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

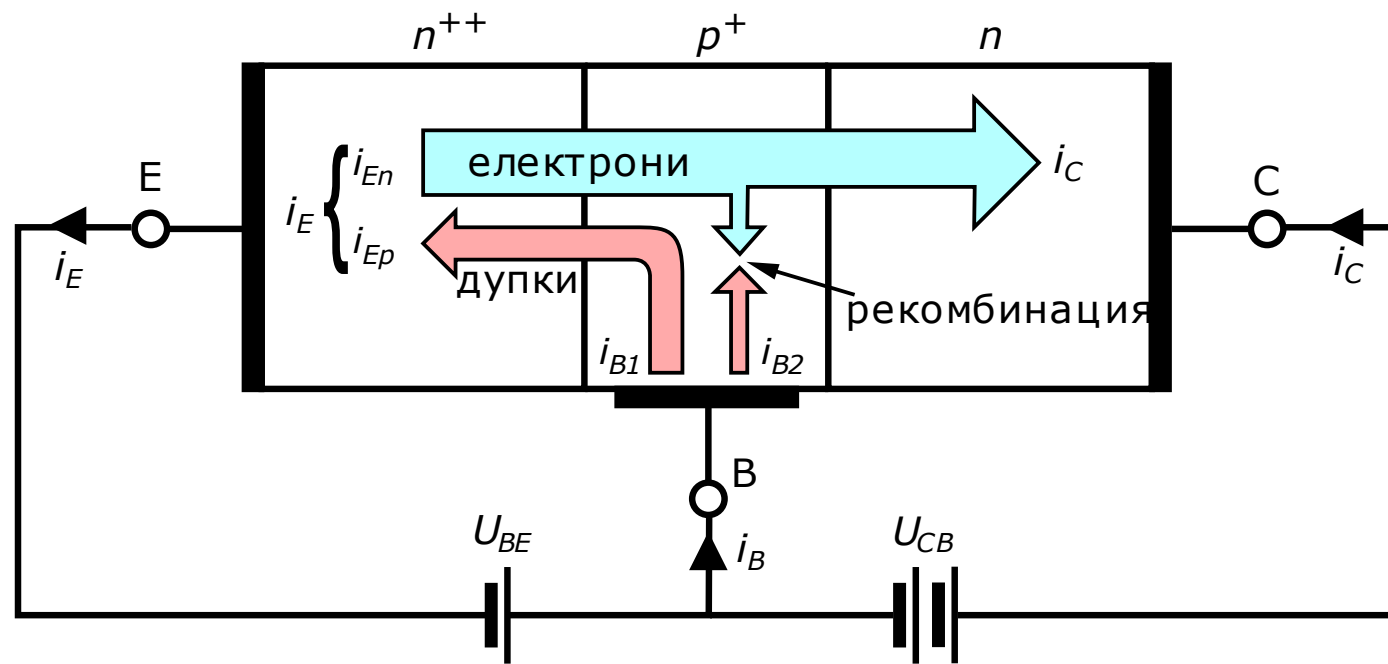
Колекторен ток



$$I_C = M\chi\gamma I_E = \alpha I_E$$

α - Коефициент на предаване по ток в схема обща база

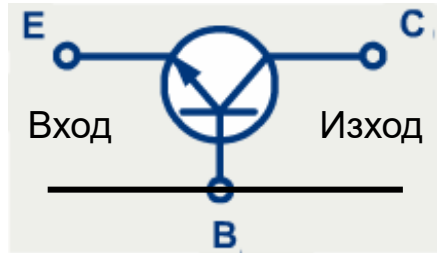
Токове в транзистора



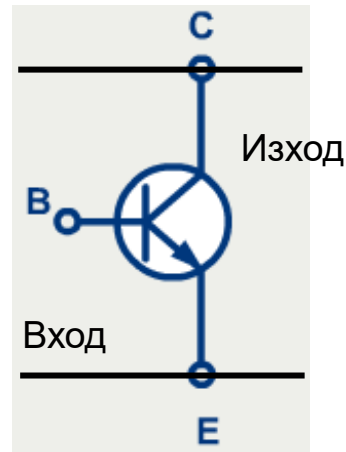
$$I_E = I_C + I_B \quad I_E > I_C \gg I_B$$

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.
Токът на базата е най-малък.

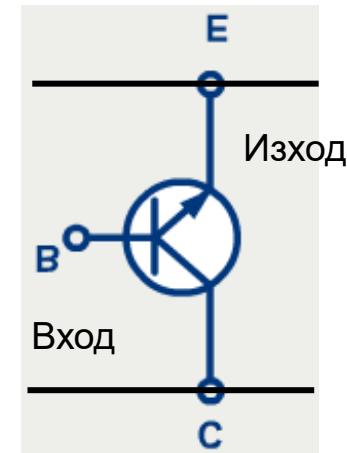
Схеми на включване



Обща база



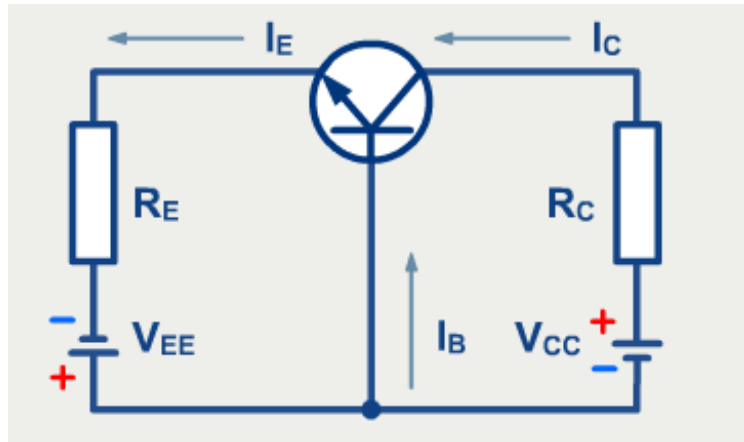
Общ емитер



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).

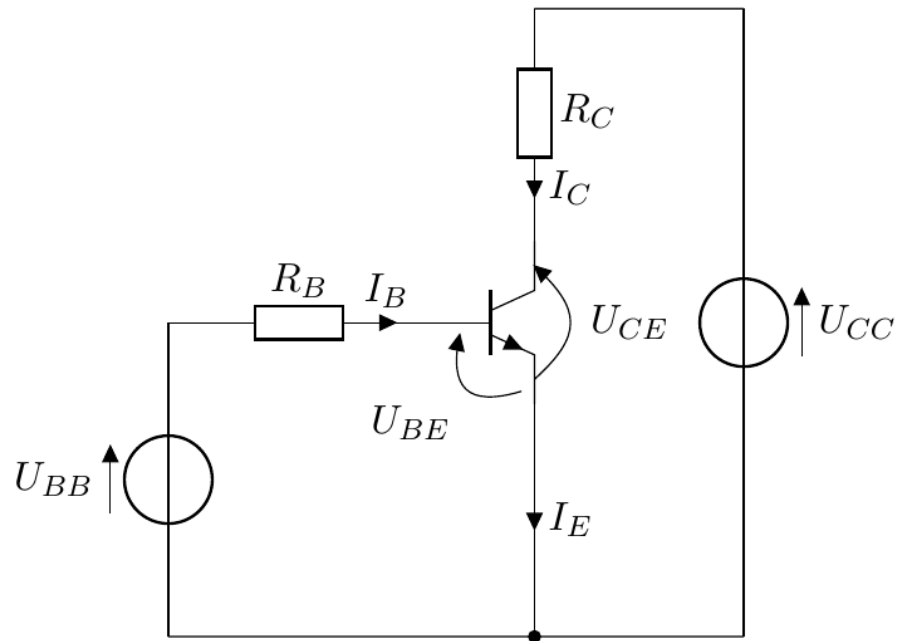
Токове в транзистора – връзка между колекторен и емитерен ток



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

α - коэффициент на усиление по ток за схема “обща база”

Токове в транзистора – връзка между колекторен и базов ток



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

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha(I_C + I_B) = \alpha I_C + \alpha I_B$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B$$

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

$$I_C = \beta I_B$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \gg 1$$

β - коефициент на усилване по ток за схема “общ емитер”.

Други означения: h_{21}, h_{FE}

Коефициент на усилване по ток β

MIN

MAX

DC Current Gain

 $(I_C = -0.1 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ Vdc})$ $(I_C = -1.0 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ Vdc})$ $(I_C = -10 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ Vdc})$ $(I_C = -150 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ Vdc})$ (Note 1) $(I_C = -500 \text{ mA}, V_{CE} = -10 \text{ Vdc})$ (Note 1) h_{FE}

75

—

100

—

100

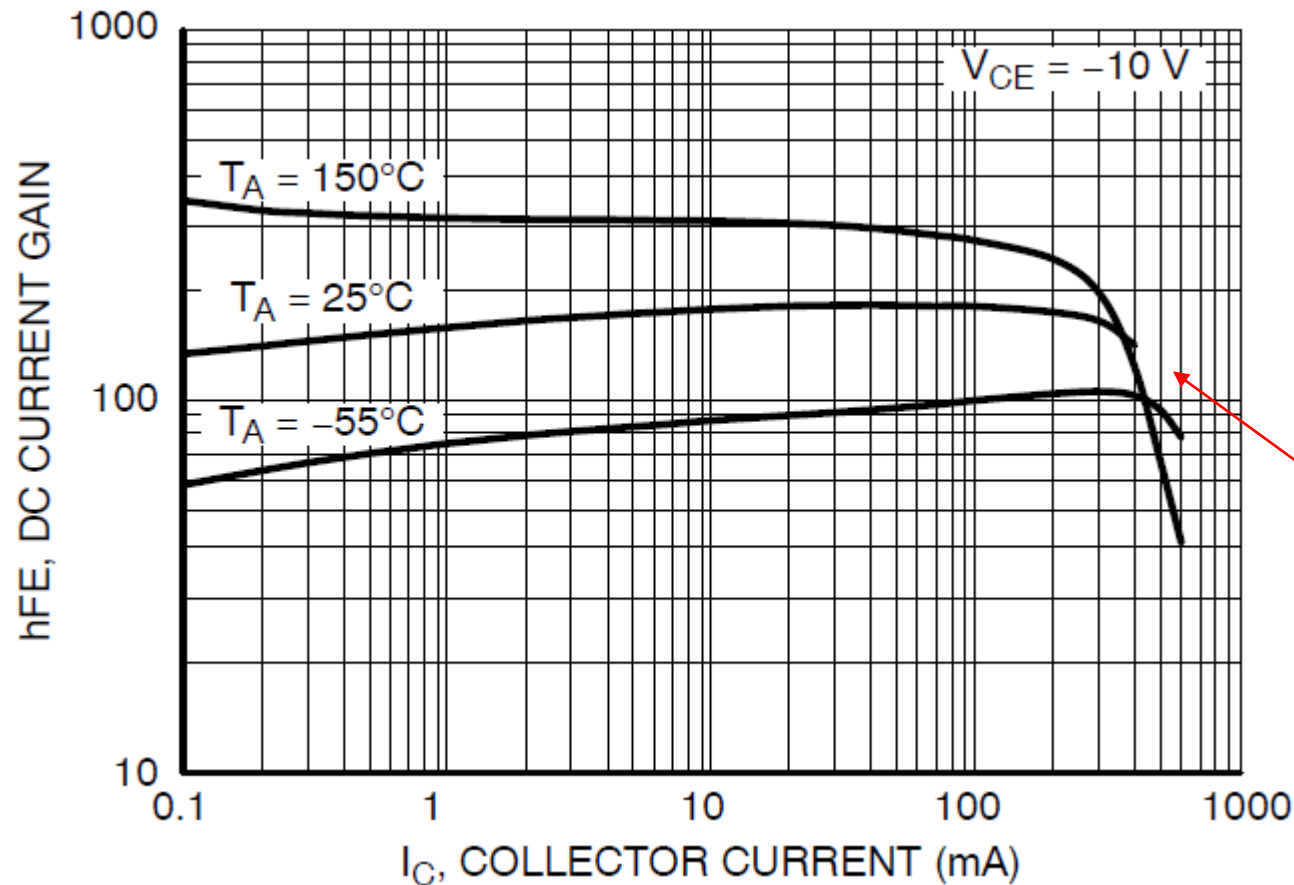
—

100

300

50

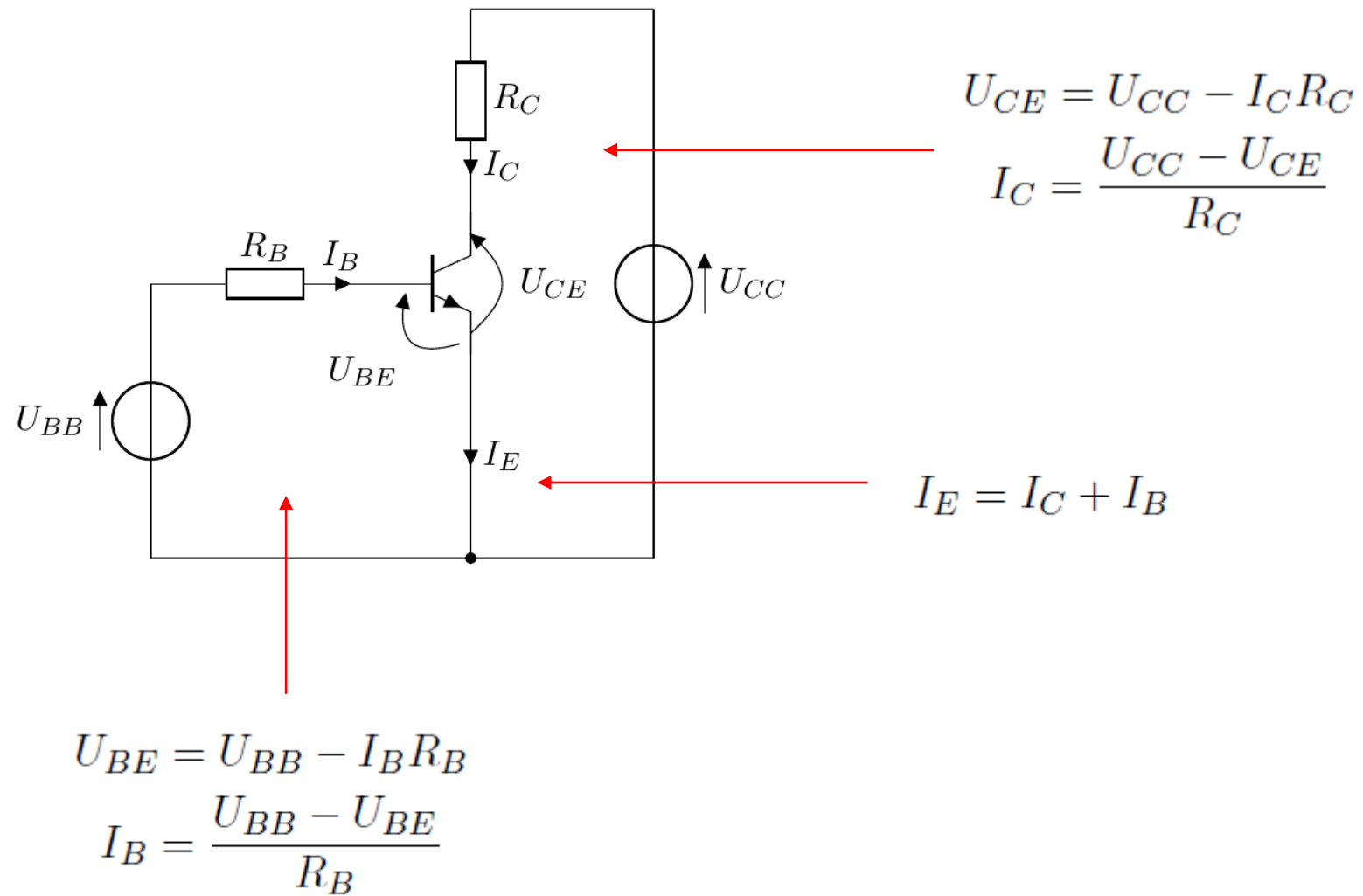
—



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

Kirk effect

Постоянно-токов режим

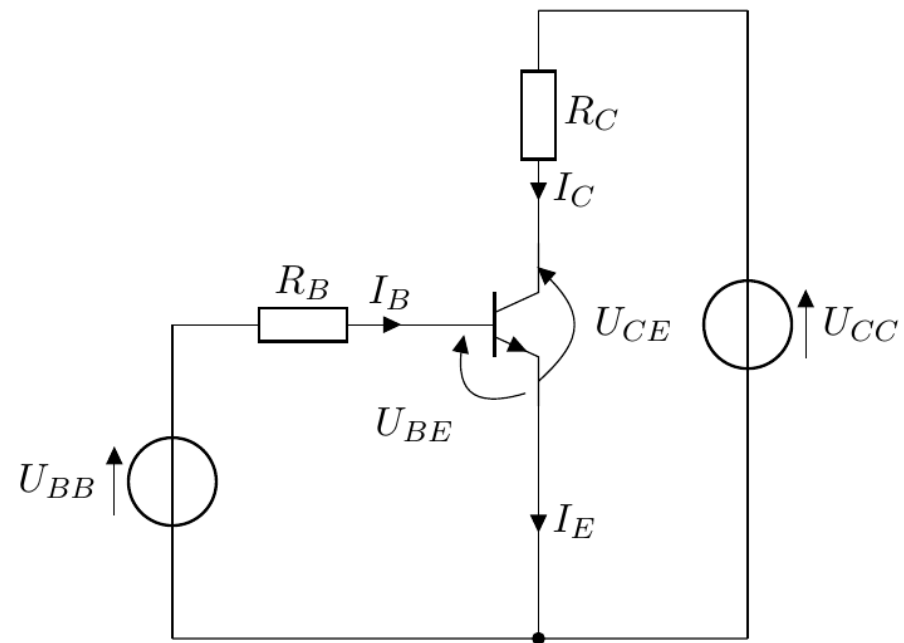


Примери

$$U_{BB} = 5V$$

$$R_B = 100k\Omega$$

$$I_B = ?$$



$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \\ &= \frac{5V - 0,7V}{100k\Omega} \\ &= 4,3V \cdot 1 \times 10^{-5} A = 43\mu A \end{aligned}$$

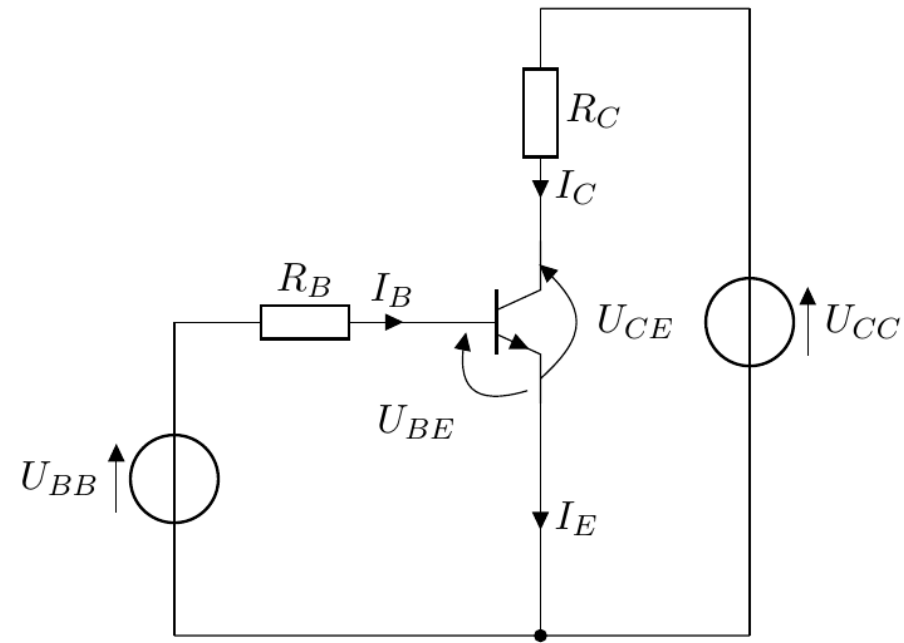
Примери

$$U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 3k\Omega$$

$$I_C = 1mA$$

$$U_{CE} = ?$$



$$\begin{aligned} U_{CE} &= U_{CC} - I_C R_C \\ &= 12V - 1mA \cdot 3k\Omega \\ &= 12V - 1 \times 10^{-3}A \cdot 3 \times 10^3\Omega \\ &= 12V - 3V = 9V \end{aligned}$$

Примери

$$U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 1,5k\Omega$$

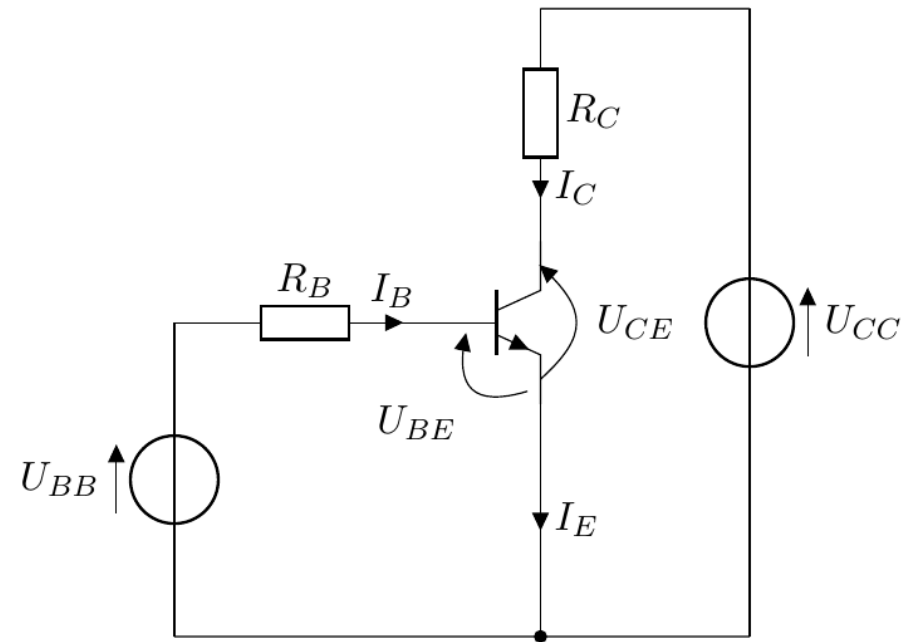
$$R_B = 330k\Omega$$

$$I_B = 25\mu A$$

$$\beta = 200$$

$$U_{CE} = ?$$

$$P_C = ?$$



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

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

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$= 200 \cdot 25 \times 10^{-6} A$$

$$= 5000 \times 10^{-6} A$$

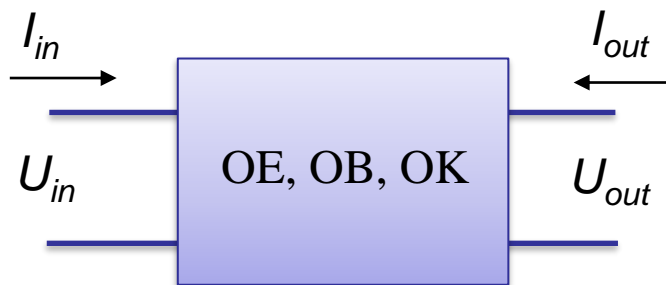
$$= 5 \times 10^{-3} A = 5mA$$

$$U_{CE} = 12V - 5 \times 10^{-3} A \cdot 1,5 \times 10^3 \Omega$$

$$= 12V - 7,5V = 4,5V$$

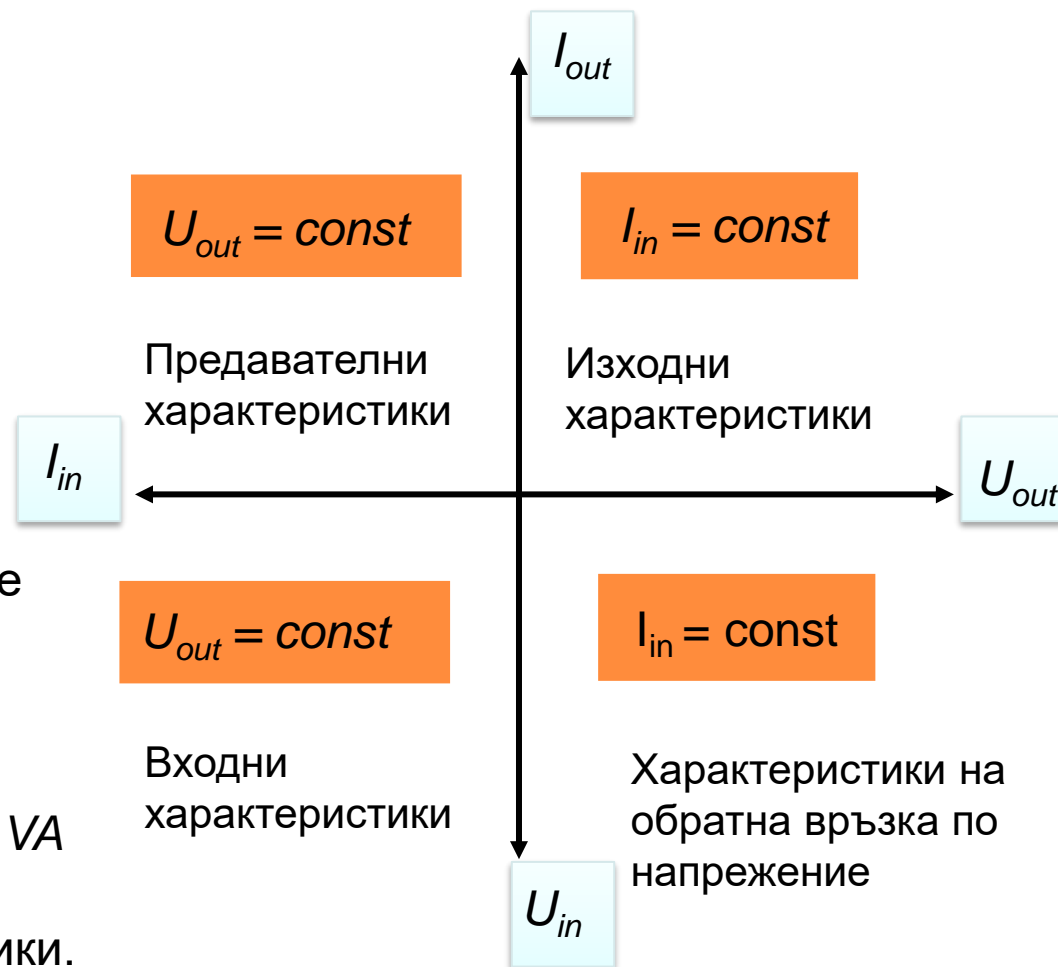
$$P_C = 4,5V \cdot 5mA = 22,5mW$$

Волт-Амперни Характеристики

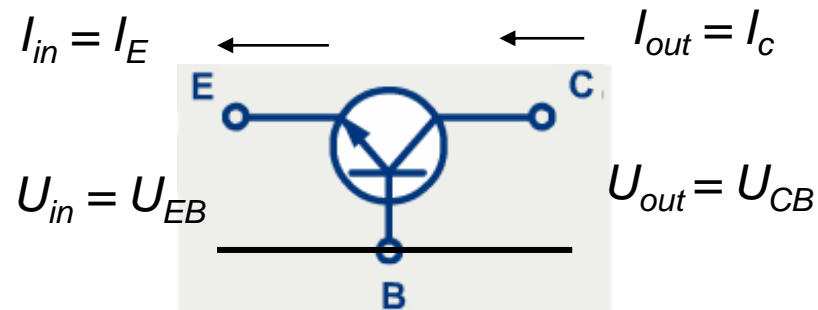


Съществува взаимна връзка между входните и изходни токове и напрежения в транзистора.

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

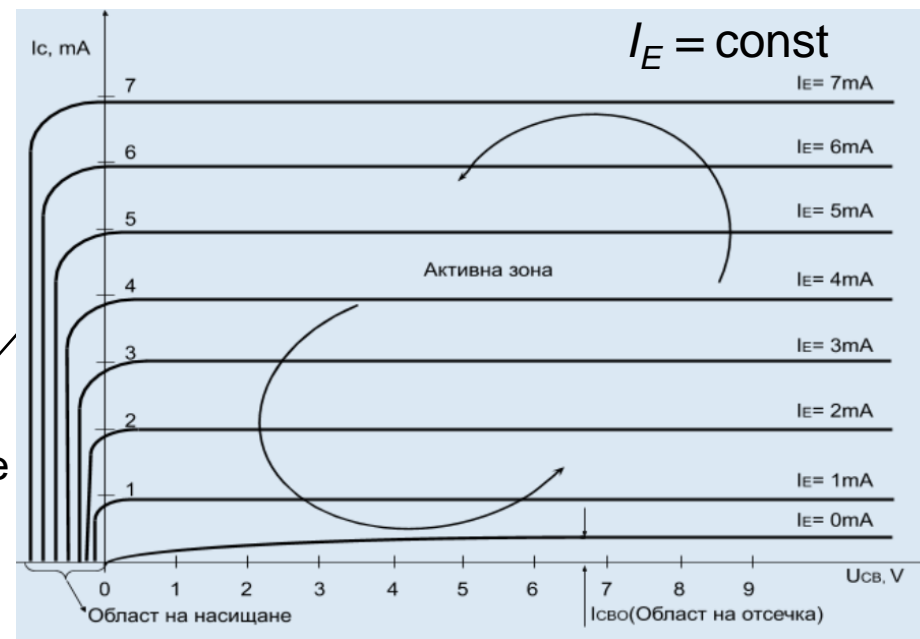


Обща База – Изходни Характеристики



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

Насищане



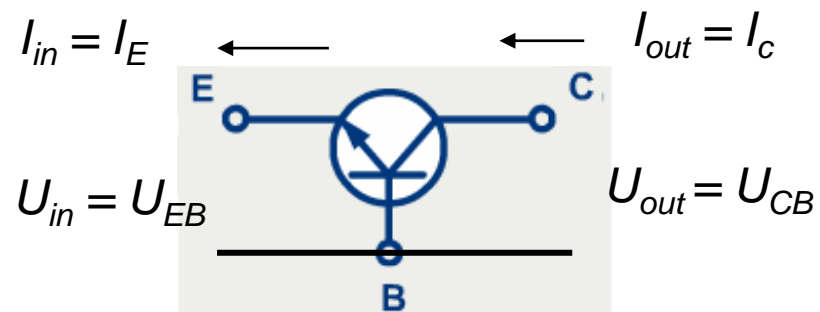
Отсечка ($I_E = 0$, $I_C = I_{CB0}$)

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

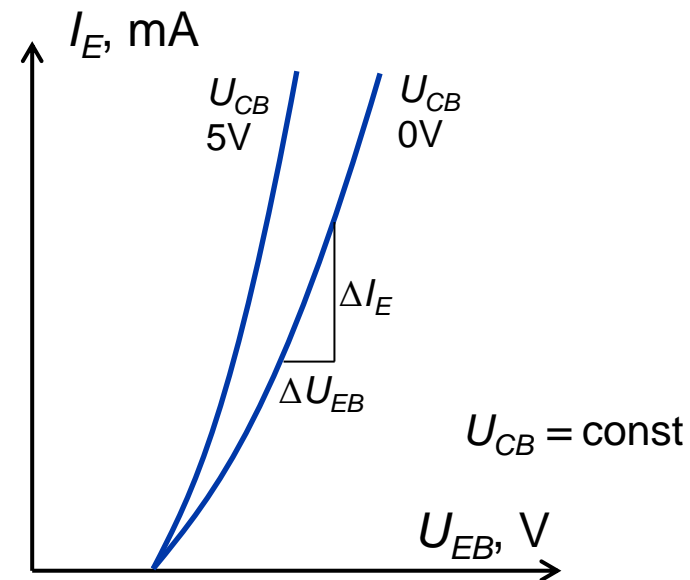
$$\alpha = f(I_E) \quad r_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} \Big|_{I_E = \text{const}}$$

Изходно диференциално
съпротивление в ОБ

Обща База – Входни Характеристики



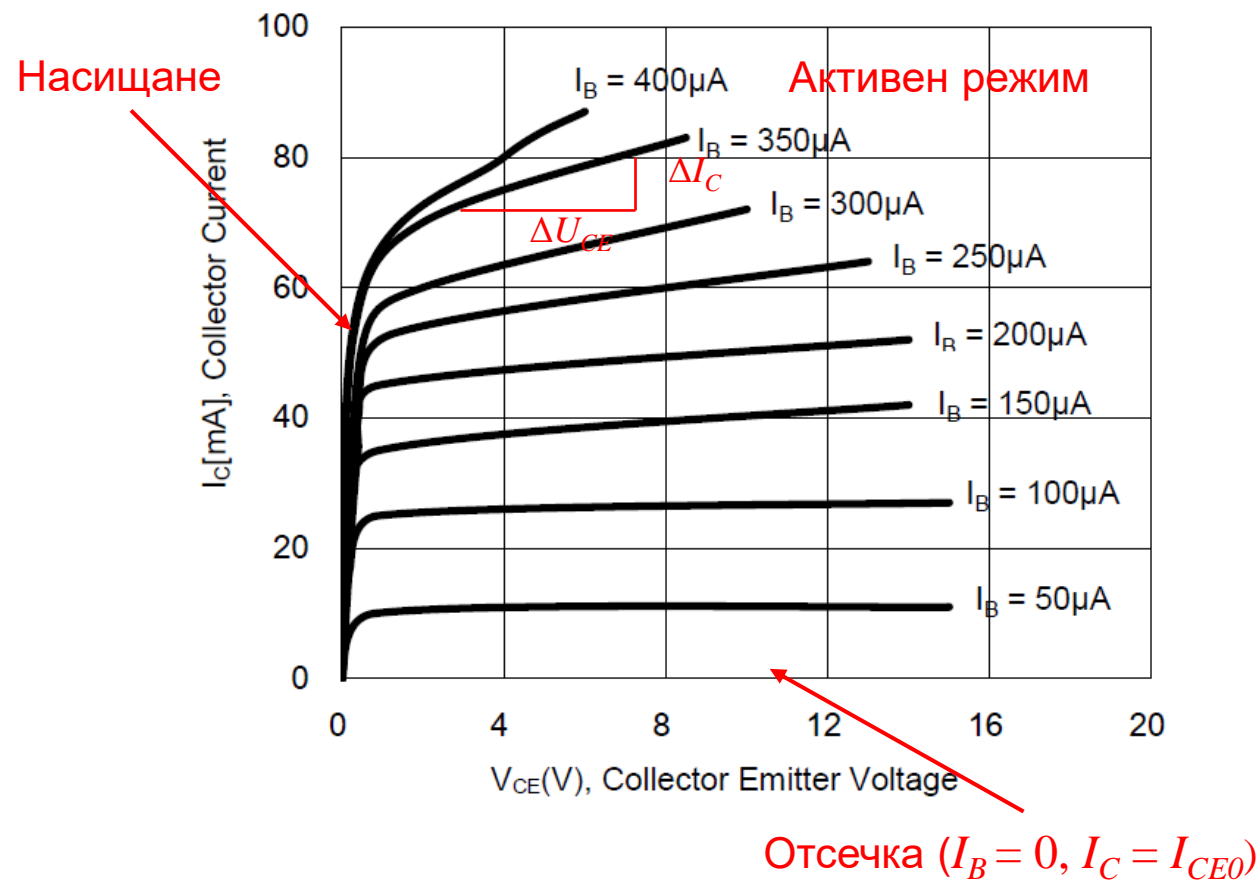
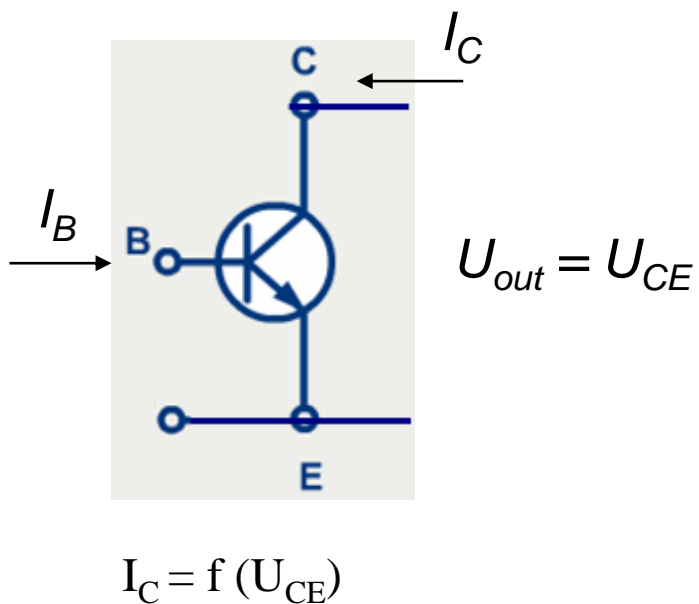
$$I_E = f(U_{EB}) \Big|_{U_{CB} = \text{const}}$$



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

Входно диференциално
съпротивление в ОБ

Общ Емитер – Изходни Характеристики



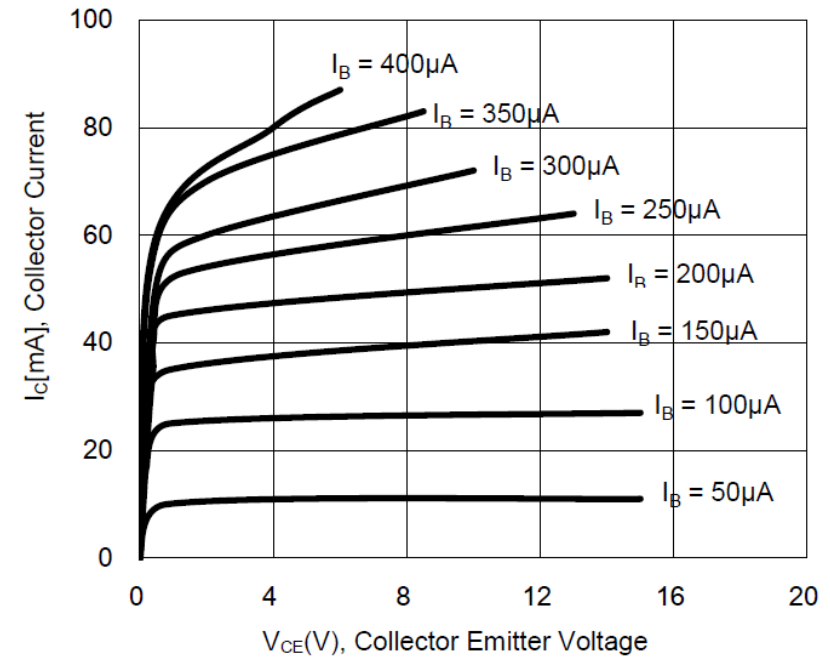
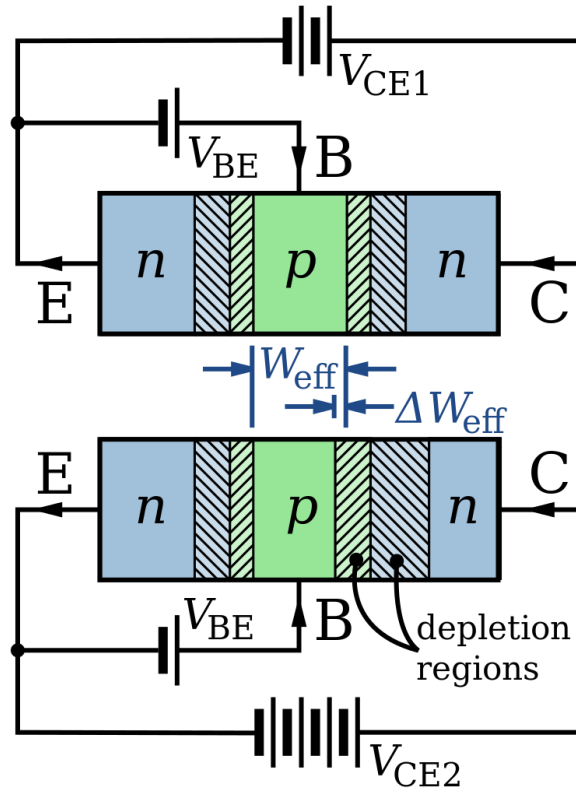
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} + \frac{U_{CE}}{r_C^*}$$

$$\beta = f(I_C)$$

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

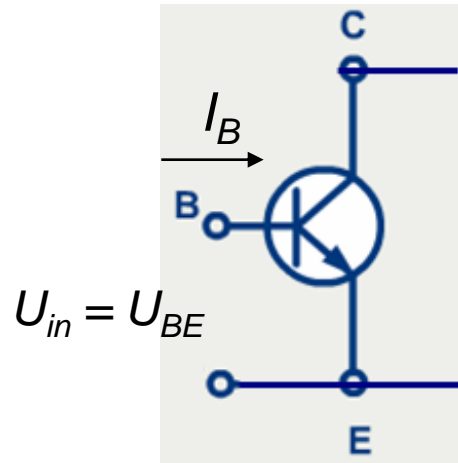
Изходно диференциално
съпротивление в ОЕ

Модулиране на Широчината на Базата

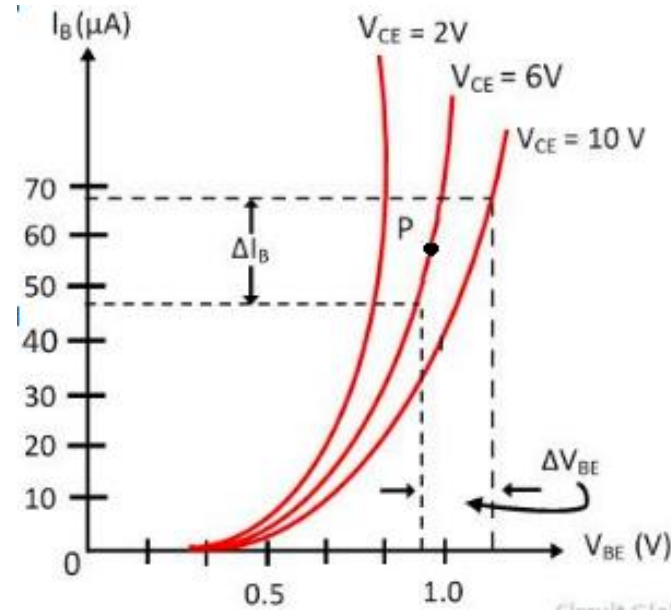


С увеличаване на U_{ce} се увеличава коефициента на усилване по ток h_{FE}
Early effect

Общ Емитер – Входни Характеристики



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

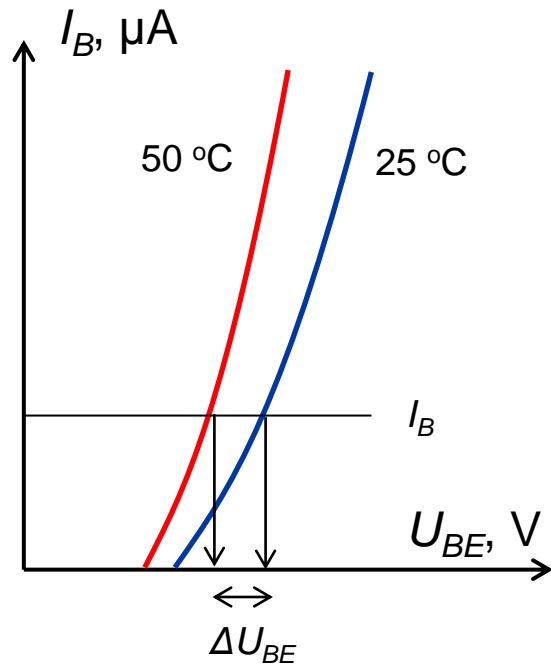


$$r_{in} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

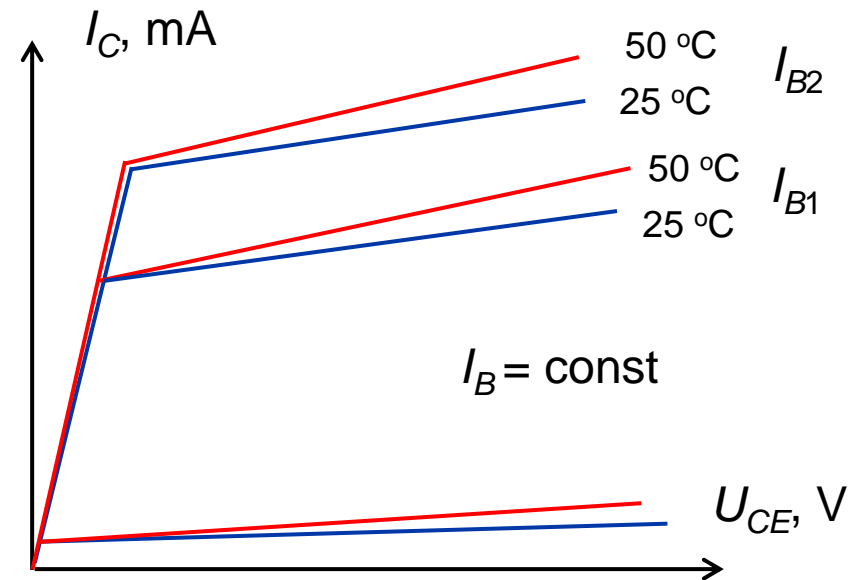
Входно диференциално
съпротивление в ОЕ

Влияние на температурата

$$TKU_{BE} < 1$$



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



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}

Мах мощност в колектора P_{Cmax}

$$P = U_{CE} I_C$$

Мощност, отделена в колекторния преход

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

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

Мощност, разсеяна в околната среда

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

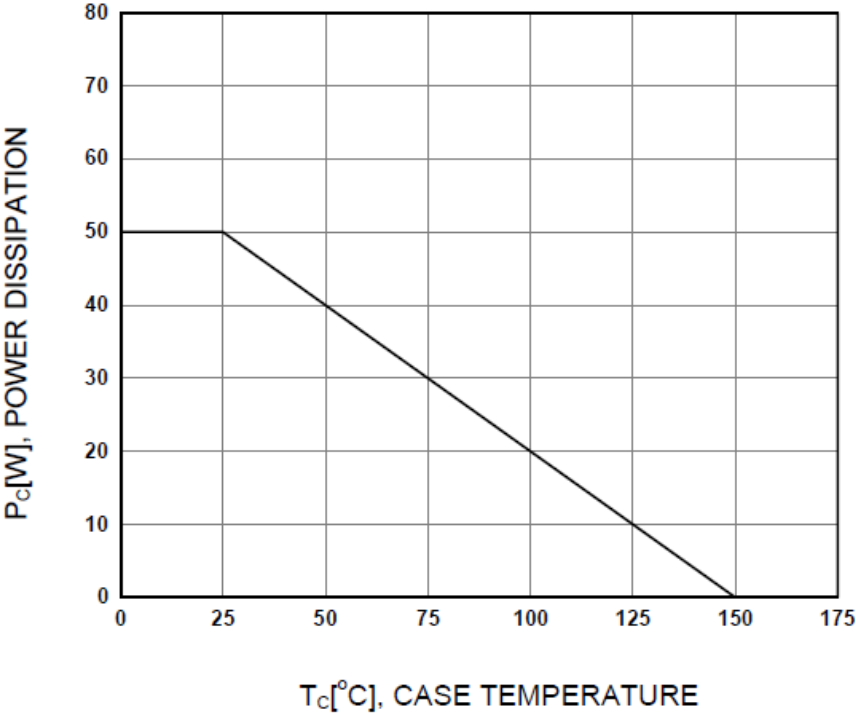
Максимална Мощност

Absolute Maximum Ratings T_C=25°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°C)	50	W
T _J	Junction Temperature	150	°C
T _{STG}	Storage Temperature	- 55 ~ 150	°C

$$P = U_{CE} I_C$$

Мощност, отделена в колекторния преход



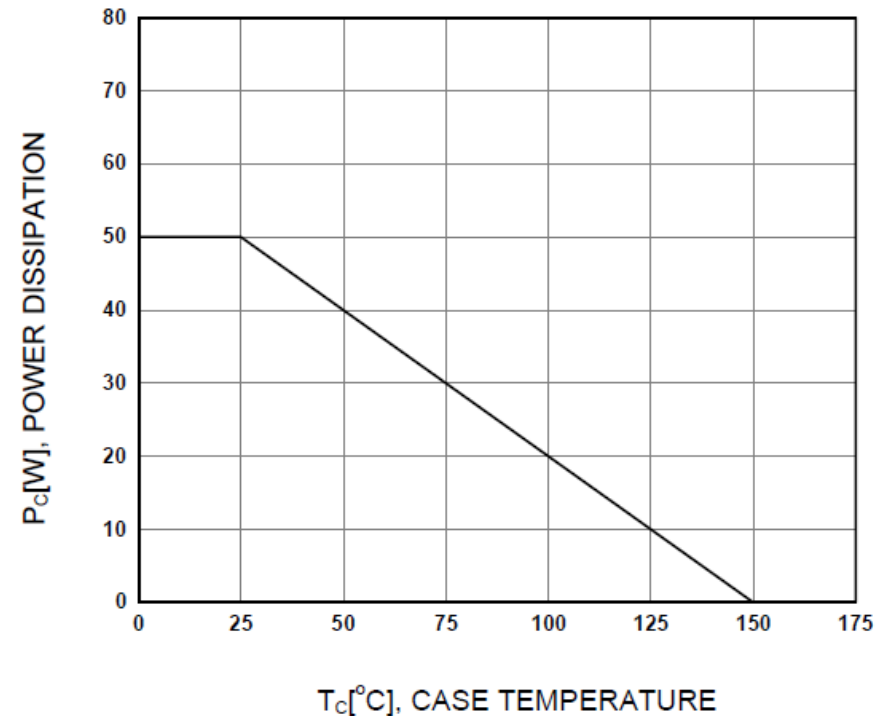
Максимална Температура

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

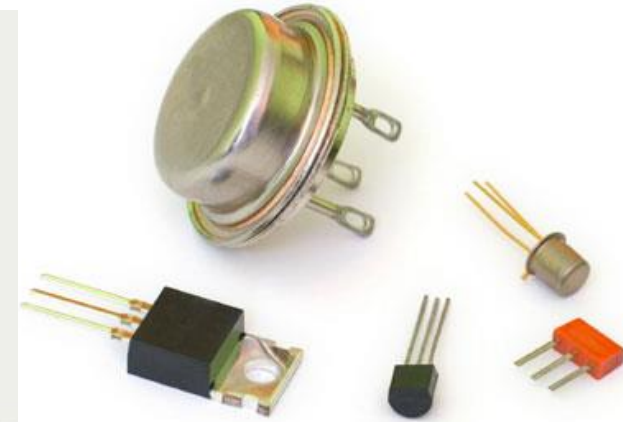
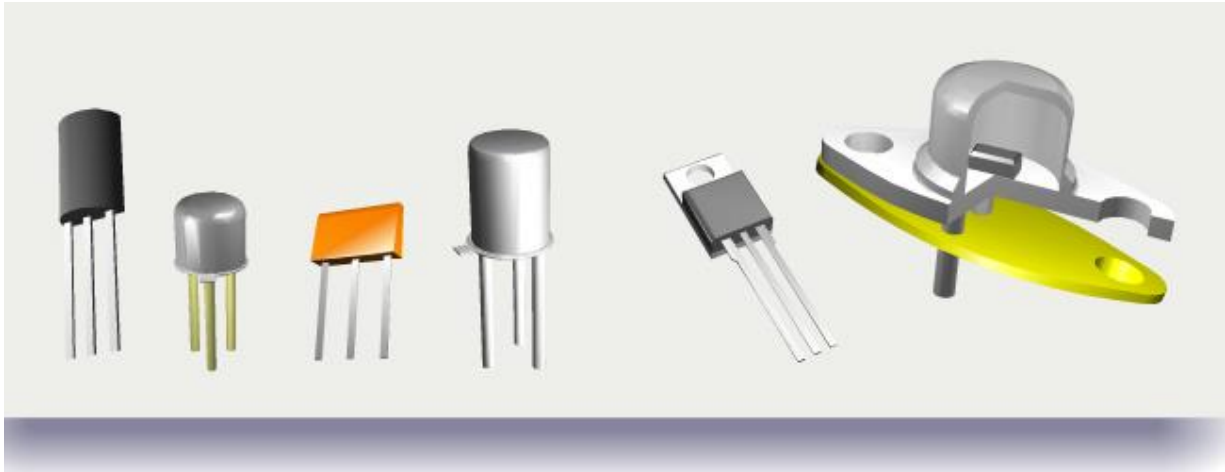
Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	1100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	800	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	7	V
I_{C}	Collector Current (DC)	3	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I_{B}	Base Current	1.5	A
P_{C}	Collector Dissipation ($T_C=25^{\circ}\text{C}$)	50	W
T_{J}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

$$P_{\text{C max}} (T_{\text{a}}) = \frac{T_{\text{j max}} - T_{\text{a}}}{R_{\text{th}} (\text{j} - \text{a})} , \quad P_{\text{C max}} (T_{\text{c}}) = \frac{T_{\text{j max}} - T_{\text{c}}}{R_{\text{th}} (\text{j} - \text{c})}$$

Максимално допустимата мощност намалява с увеличаване на температурата.



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

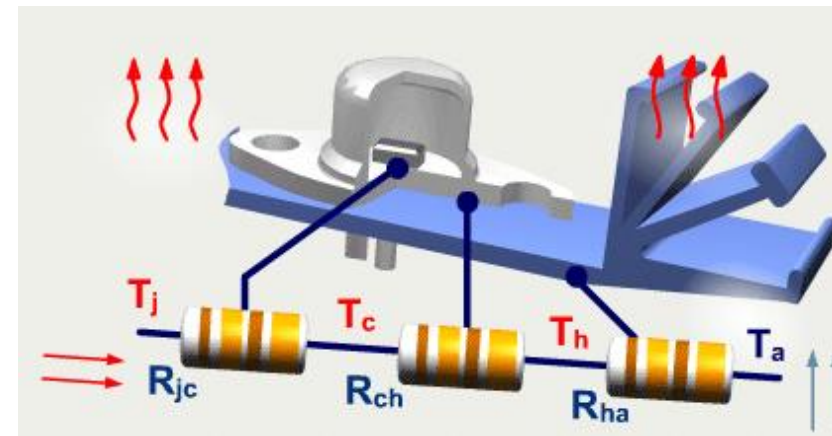
Топлинното съпротивление R_{th} показва ефективността при отделяне на топлината от транзистора и се измерва в K/W или в $^{\circ}C/W$.

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

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

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

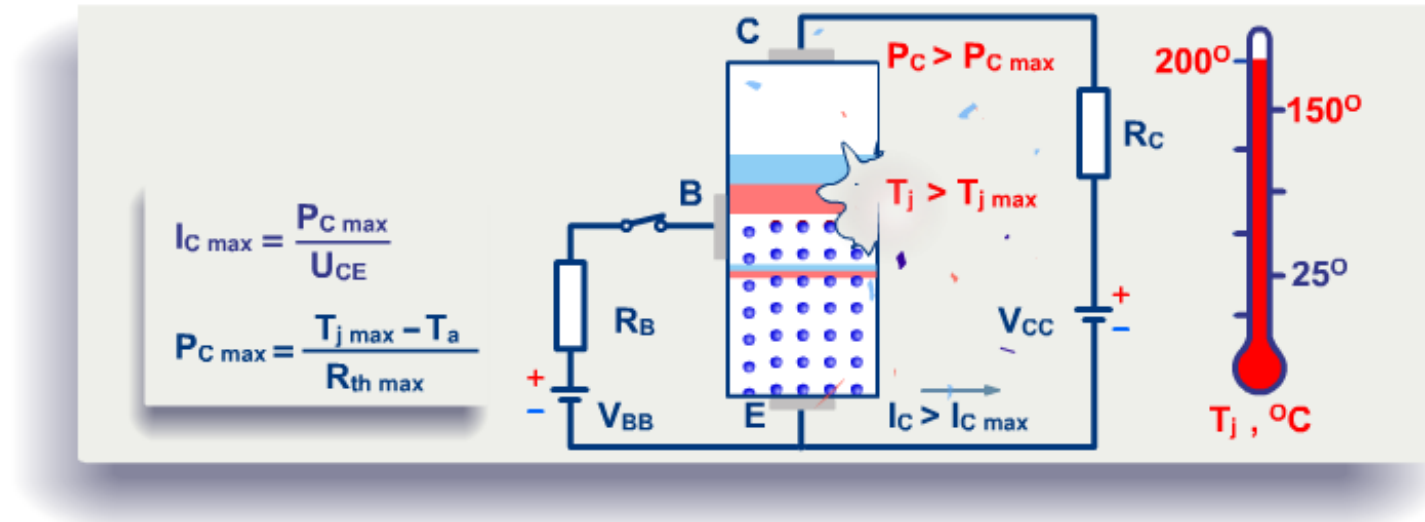
Радиатор



THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	θ_{JC}	0.584	$^{\circ}C/W$

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

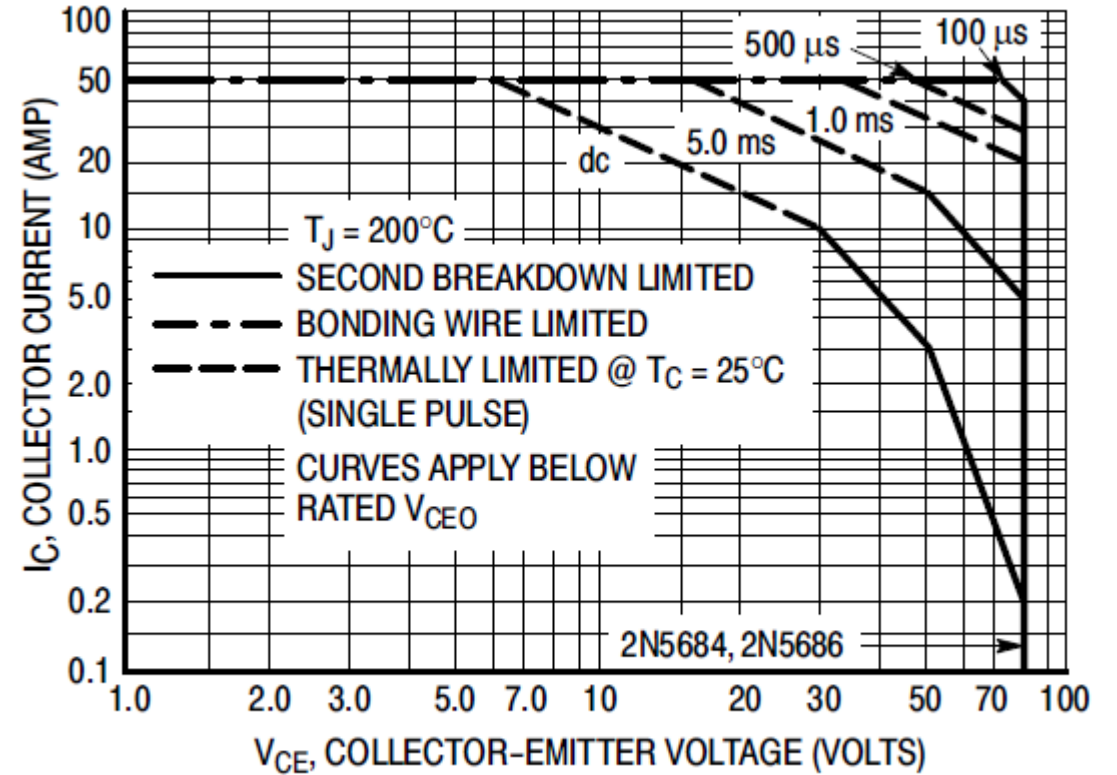
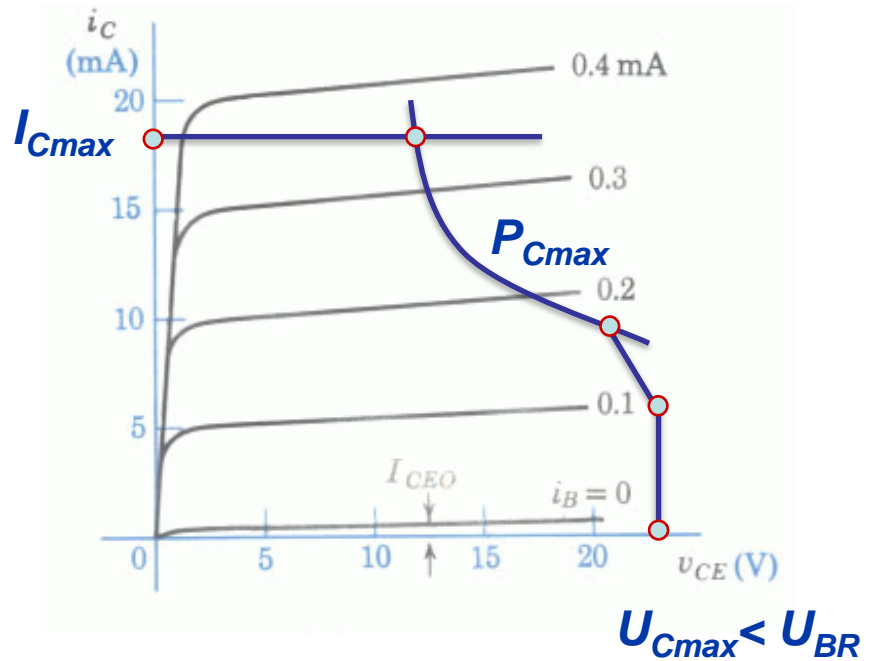
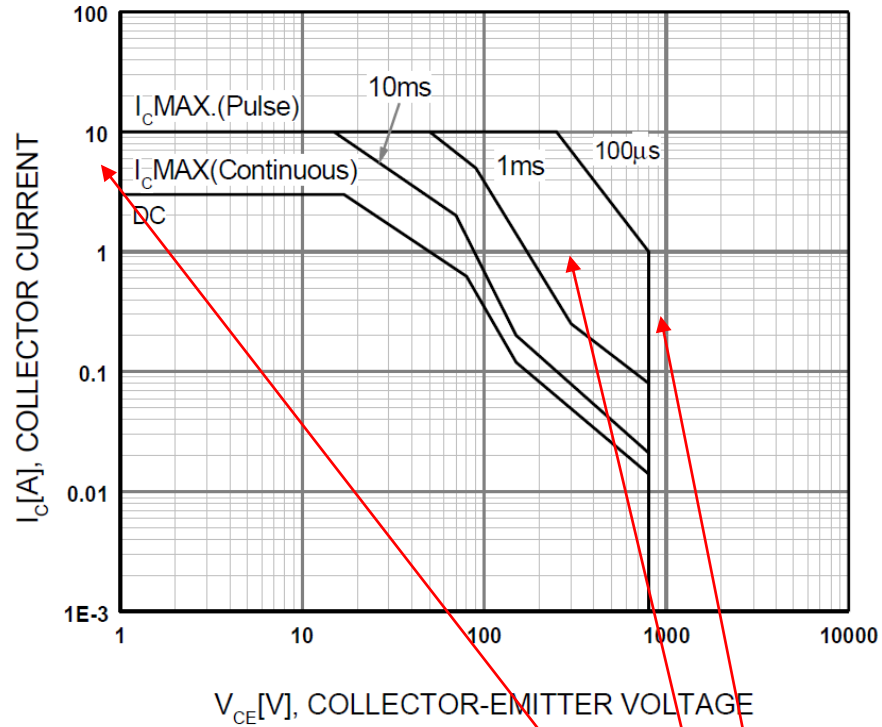


Figure 5. Active-Region Safe Operating Area

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)

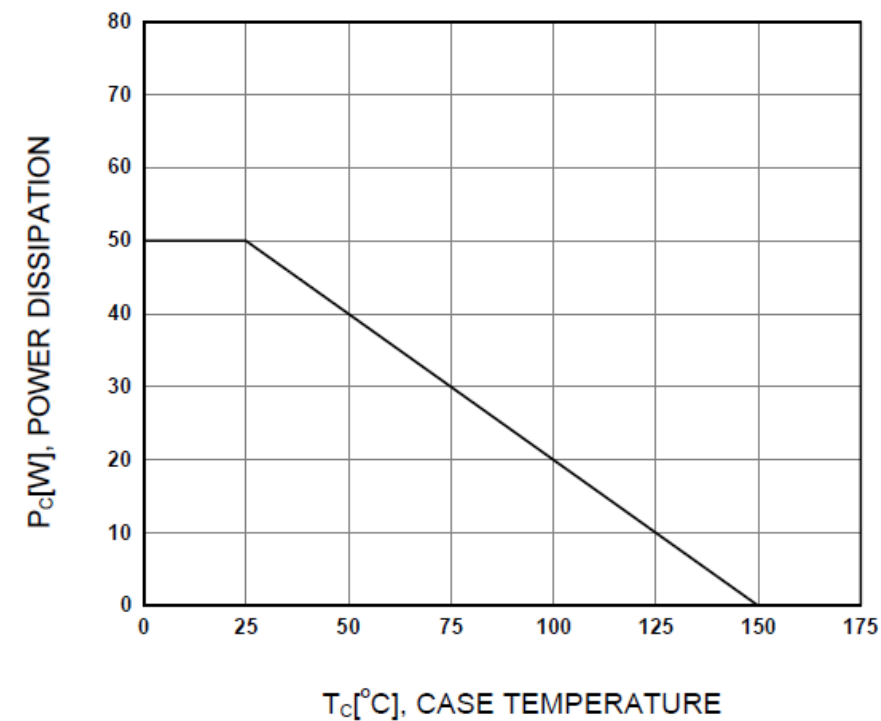
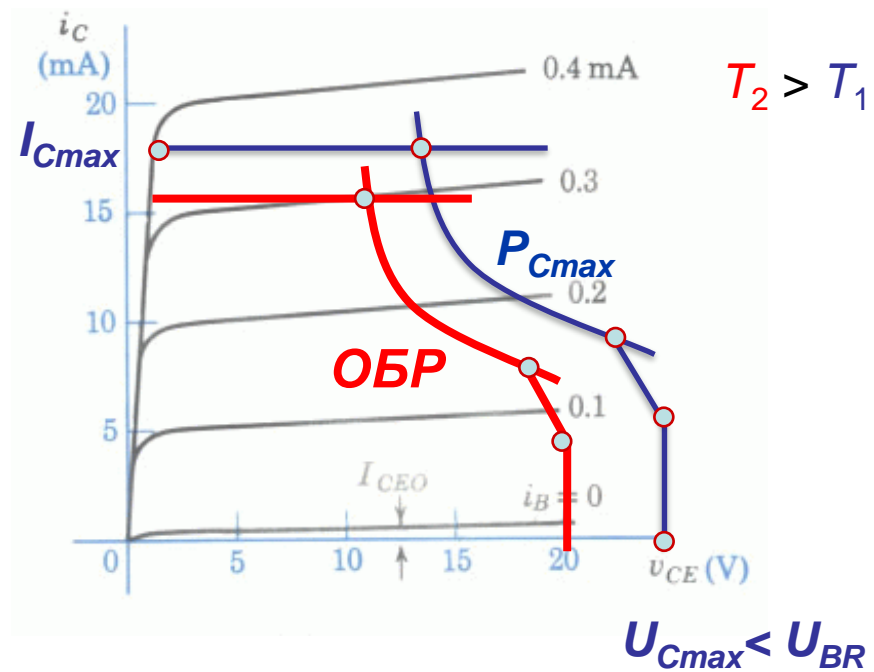
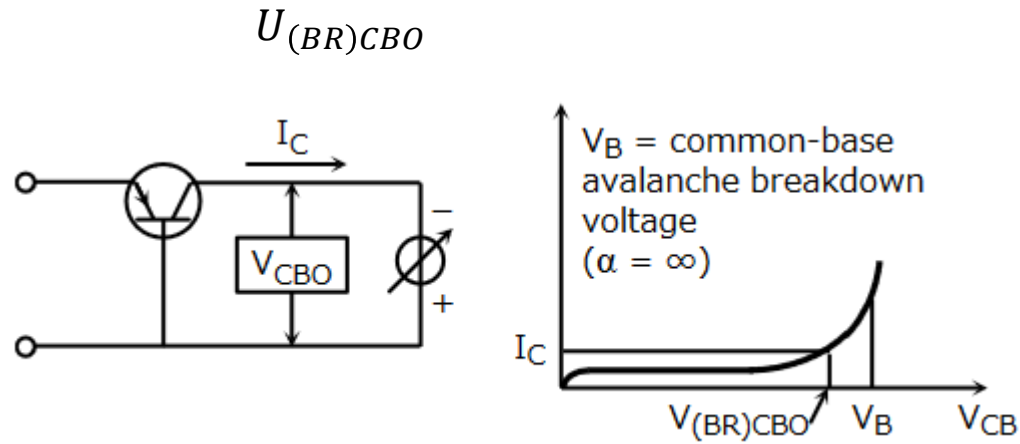


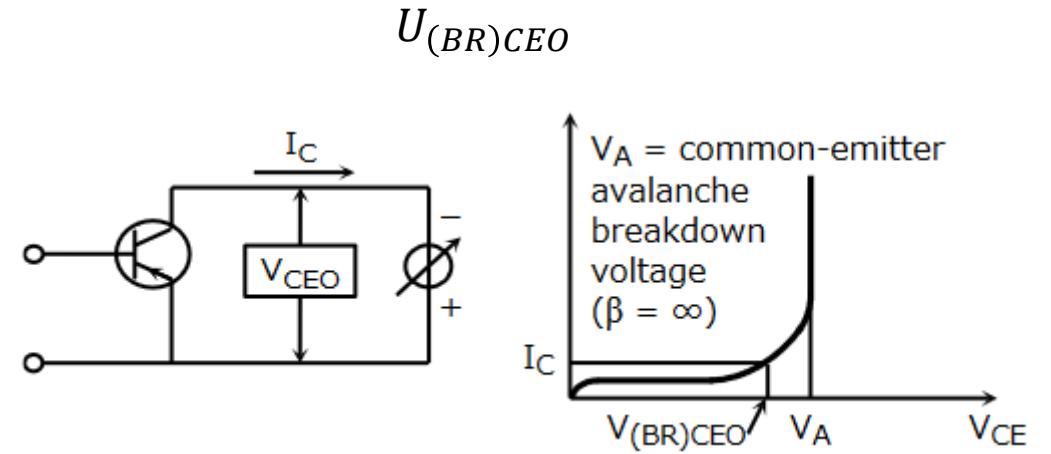
Figure 8. Power Derating

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