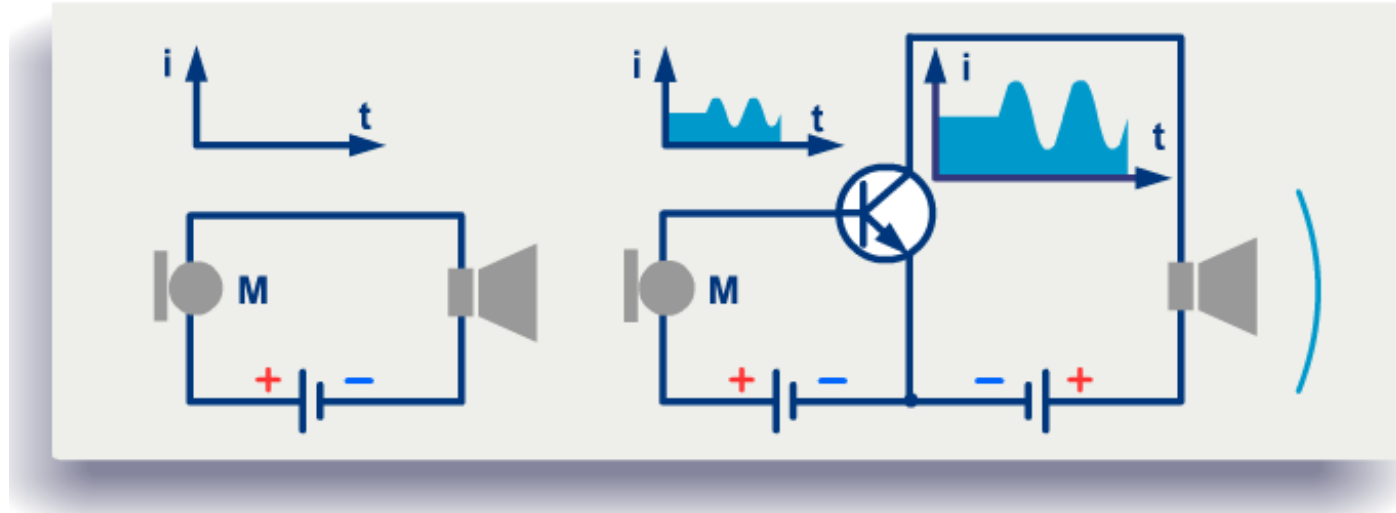




Биполярни Транзистори

Основни свойства



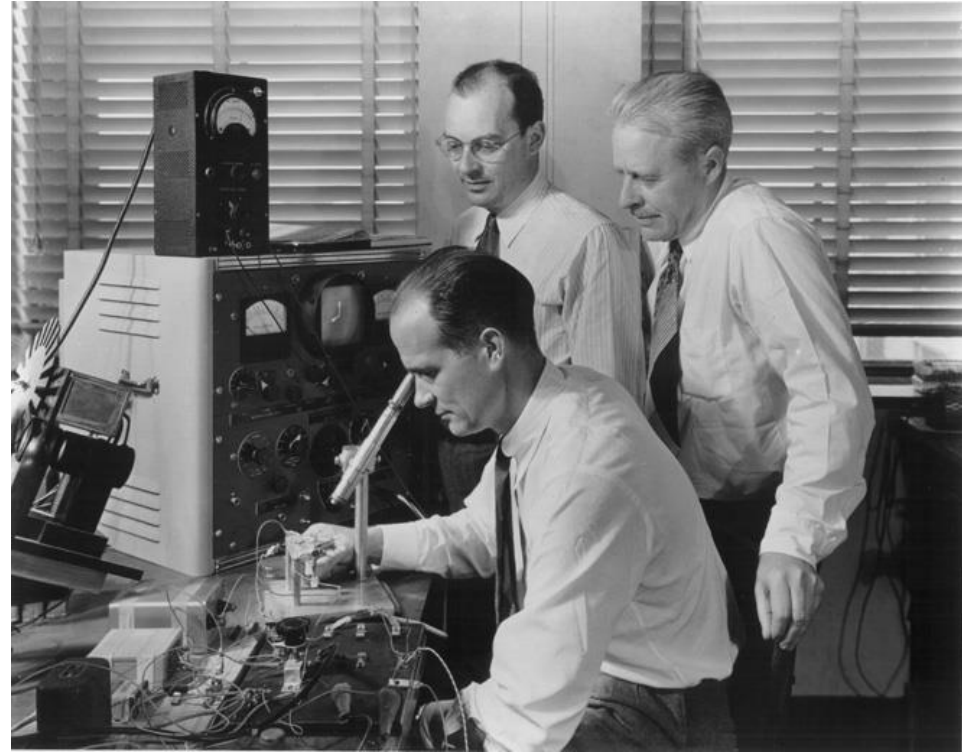
Транзисторът е **активен** полупроводников елемент. Той позволява с много **малък входен сигнал** да се управлява значително **по-голям по амплитуда и мощност изходен сигнал**.

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

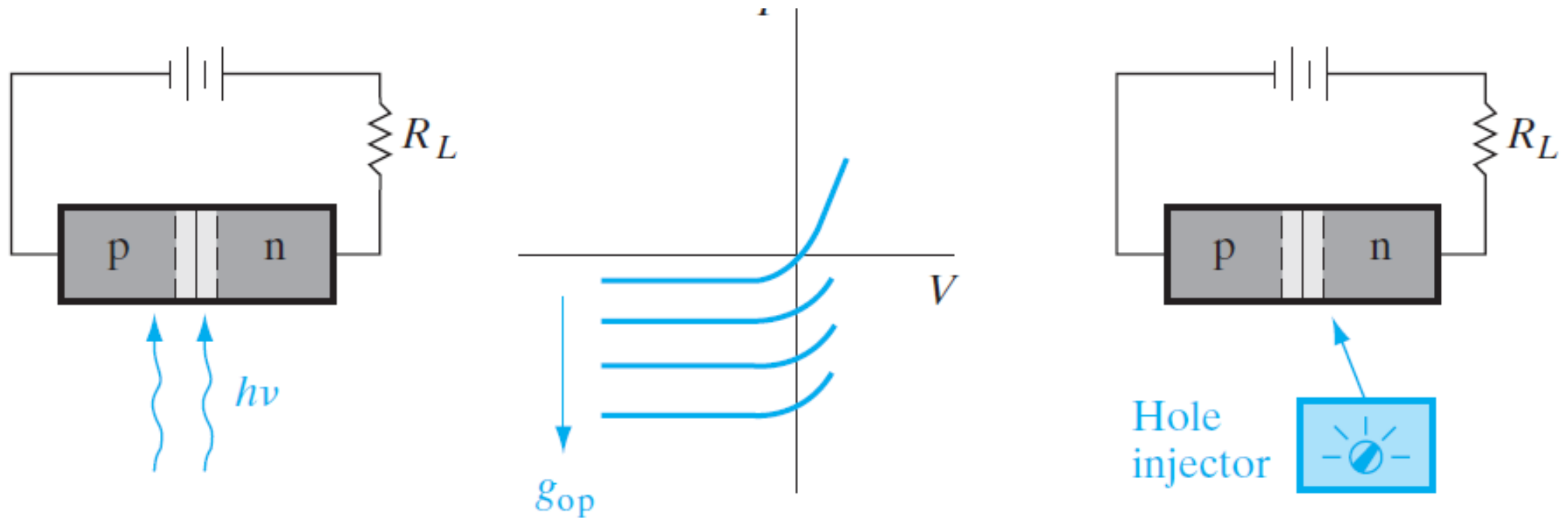
Откриване на транзистора



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."

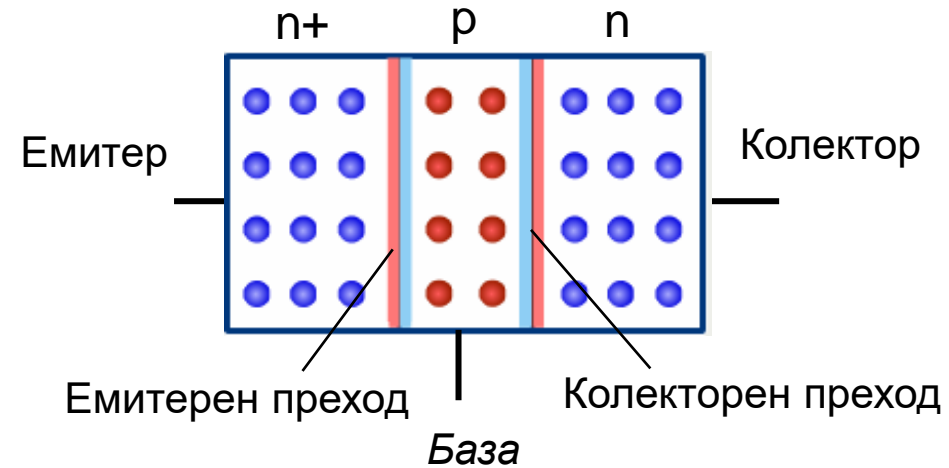
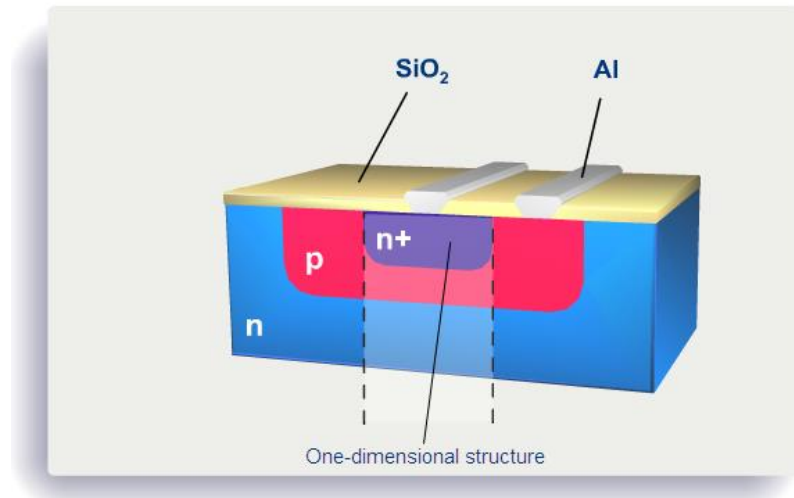


Обратният ток през p-n прехода зависи от генерирането на двойки електрон-дупка, но не и от приложеното напрежение.

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.

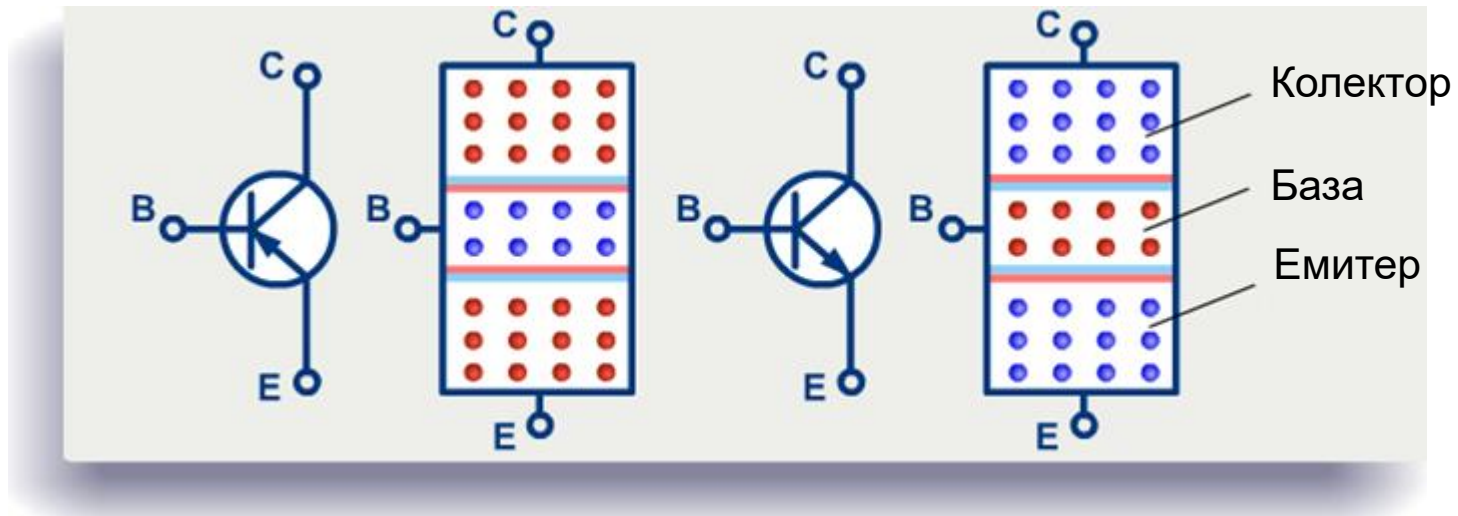
Емитерът е силно легиран и инжектира токоносители.

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

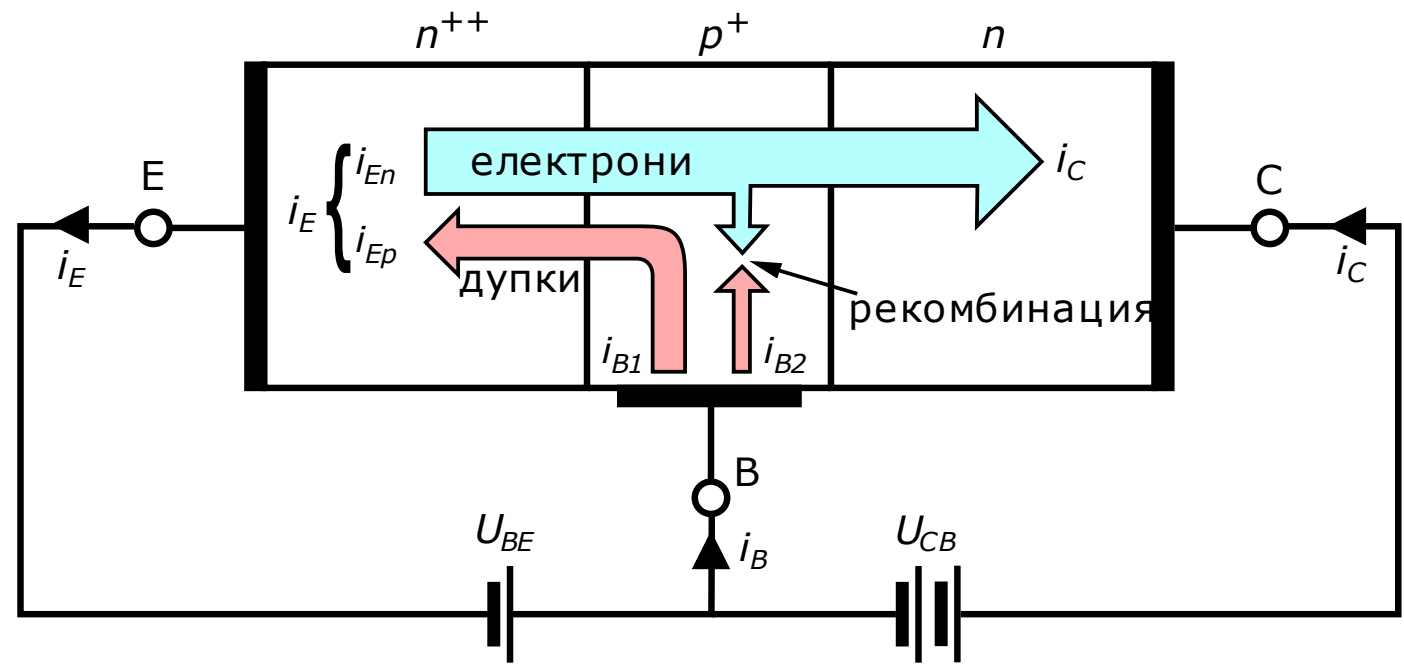
- емитерен преход – право включване
- колекторен преход – право включване

Инверсен

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



Активен режим

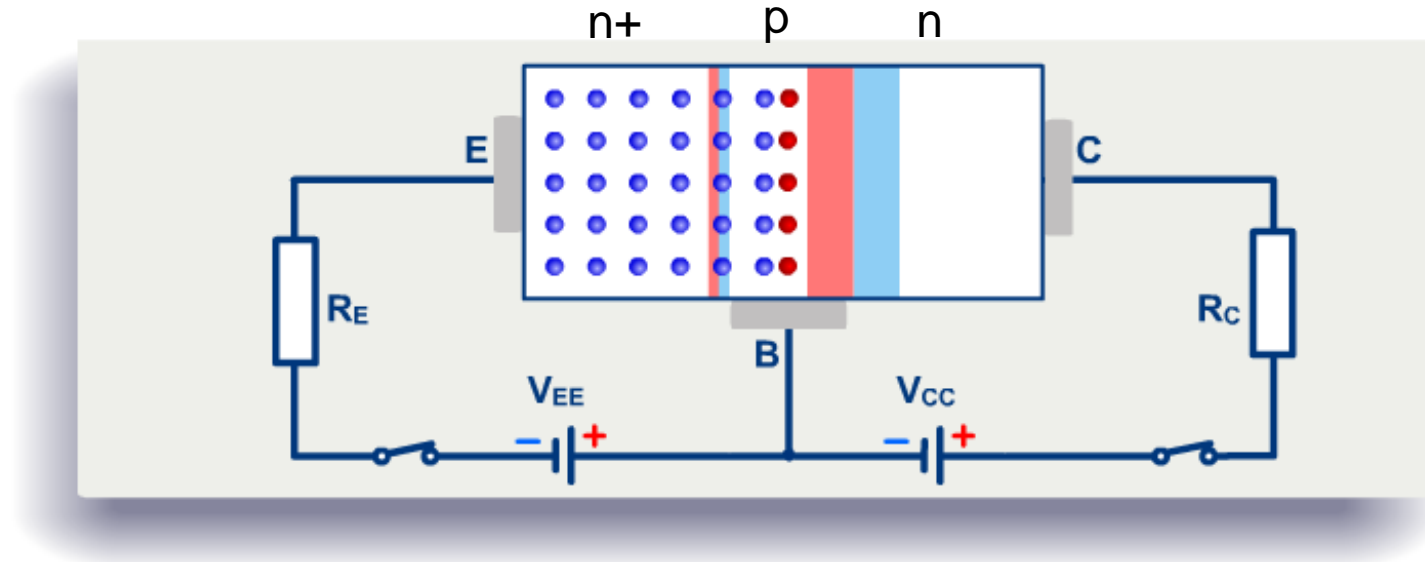


Биполярният транзистор нормално е запушен. За да започне да провежда ток, трябва на двата р-п прехода да се подадат постоянни напрежения.

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

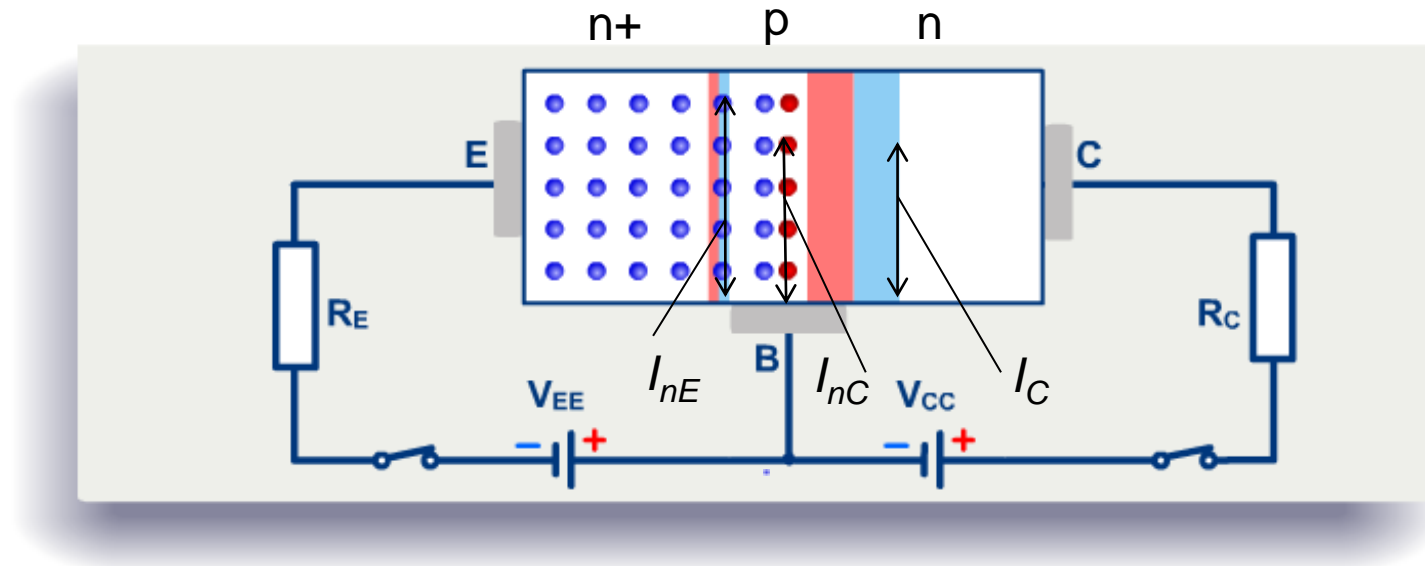


Ако V_{EE} е по-голям от потенциалната бариера на емитерния преход, започва явлението **инжекция**.

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

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

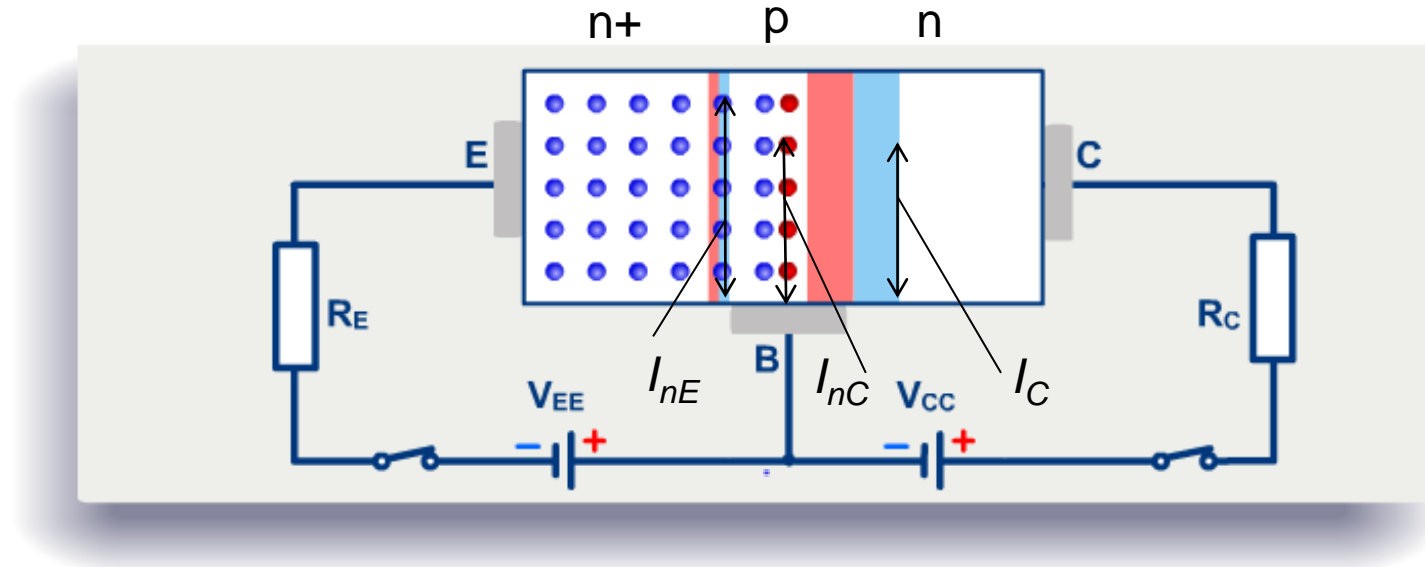
Физически процеси в базата



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.

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

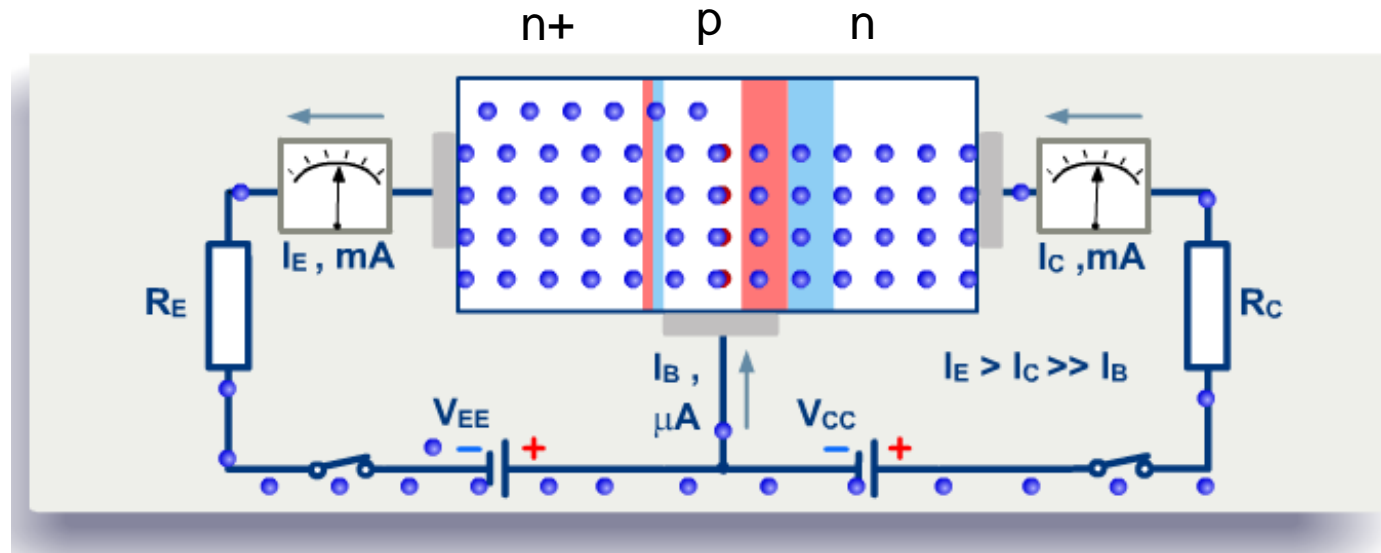
Физически процеси в колектора



Електроните, достигнали до колектора, се **екстрахират** от обратно включения колекторен 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 $M = 1$.

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

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

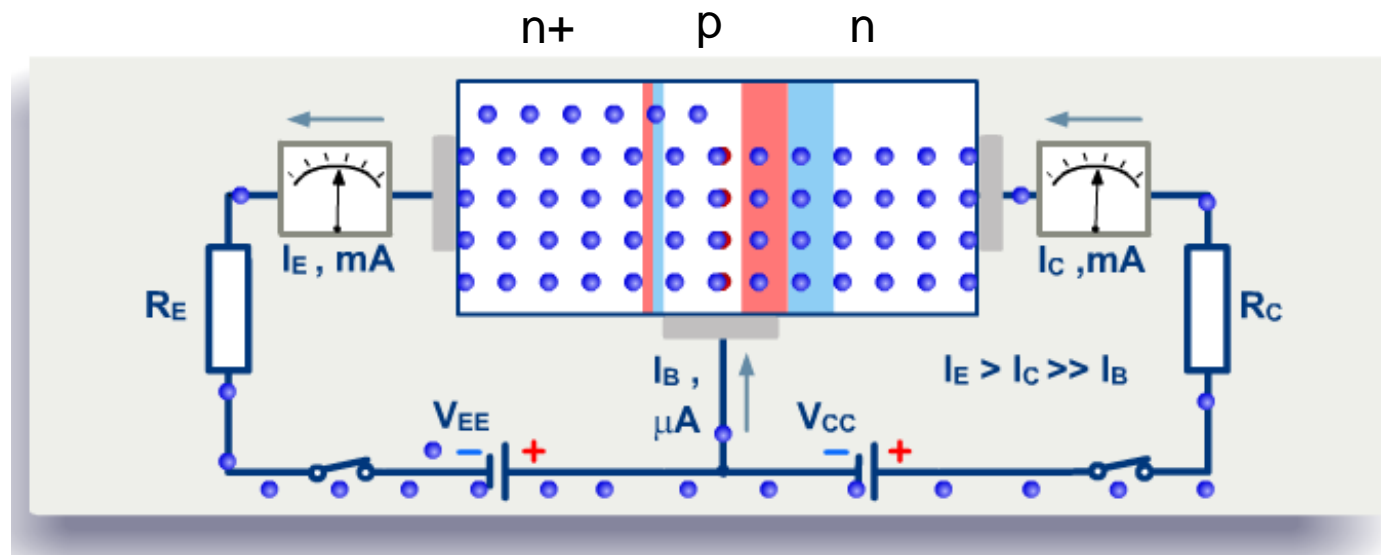
$$I_C = \alpha I_E$$

/

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:

$$I_E > I_C \gg I_B$$

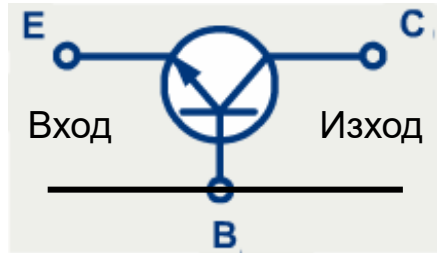
$$I_E = I_C + I_B$$

Емитерният ток е **най-големият** ток, защото емитерът е източник на свободни електрони.

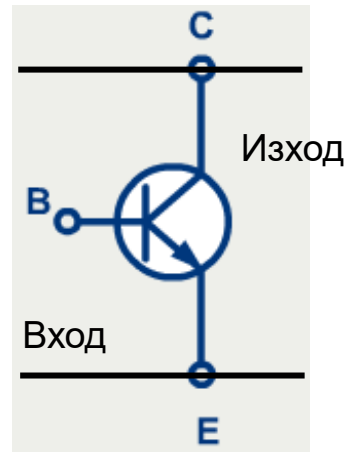
Колекторният ток е приблизително равен на емитерния, но **по-малък** от него.

Базисният ток е **най-малкият**. I_B се измерва в микроампери.

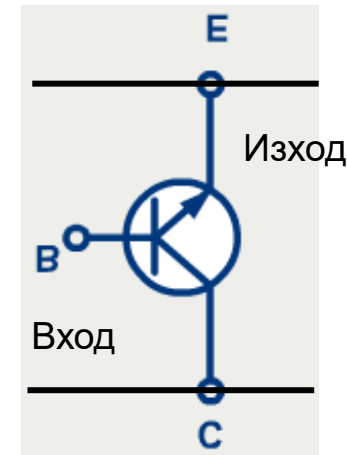
Схеми на включване



Обща база



Общ емитер

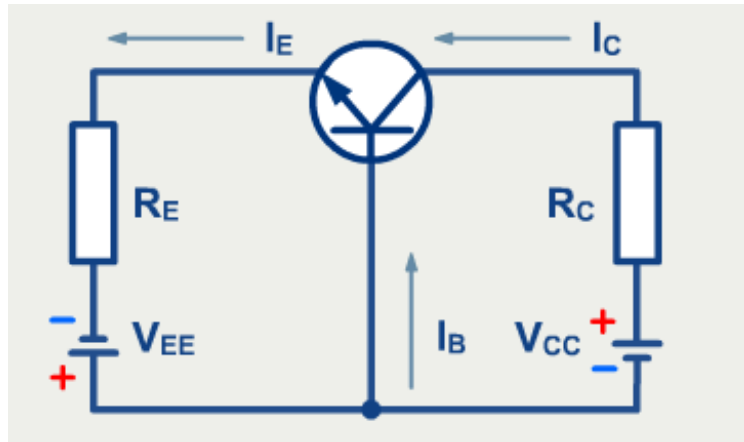


Общ колектор

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).

28.10.2022 до тук

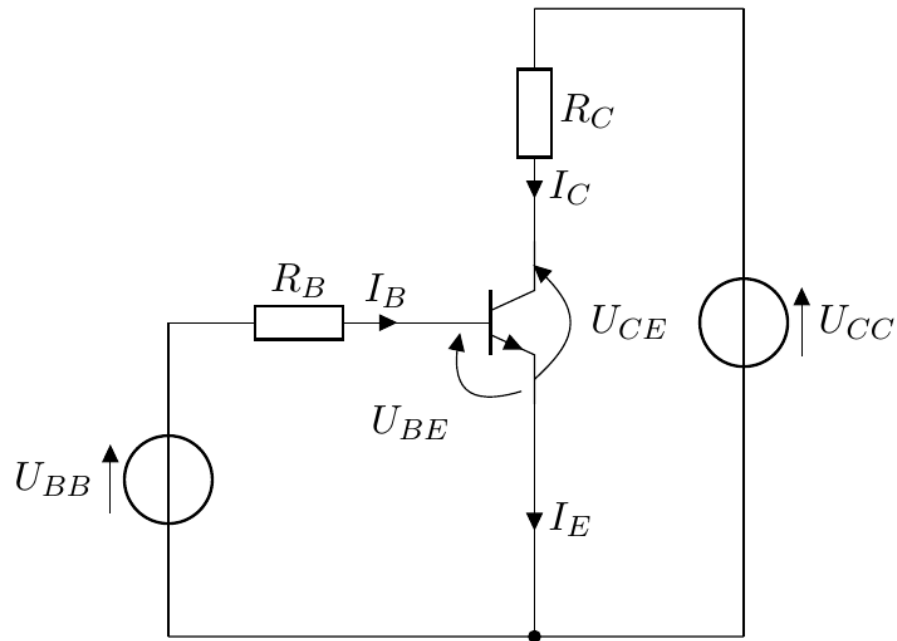
Токове в транзистора – връзка между колекторен и емитерен ток



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

α - коефициент на усилване 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

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

75

—

100

—

100

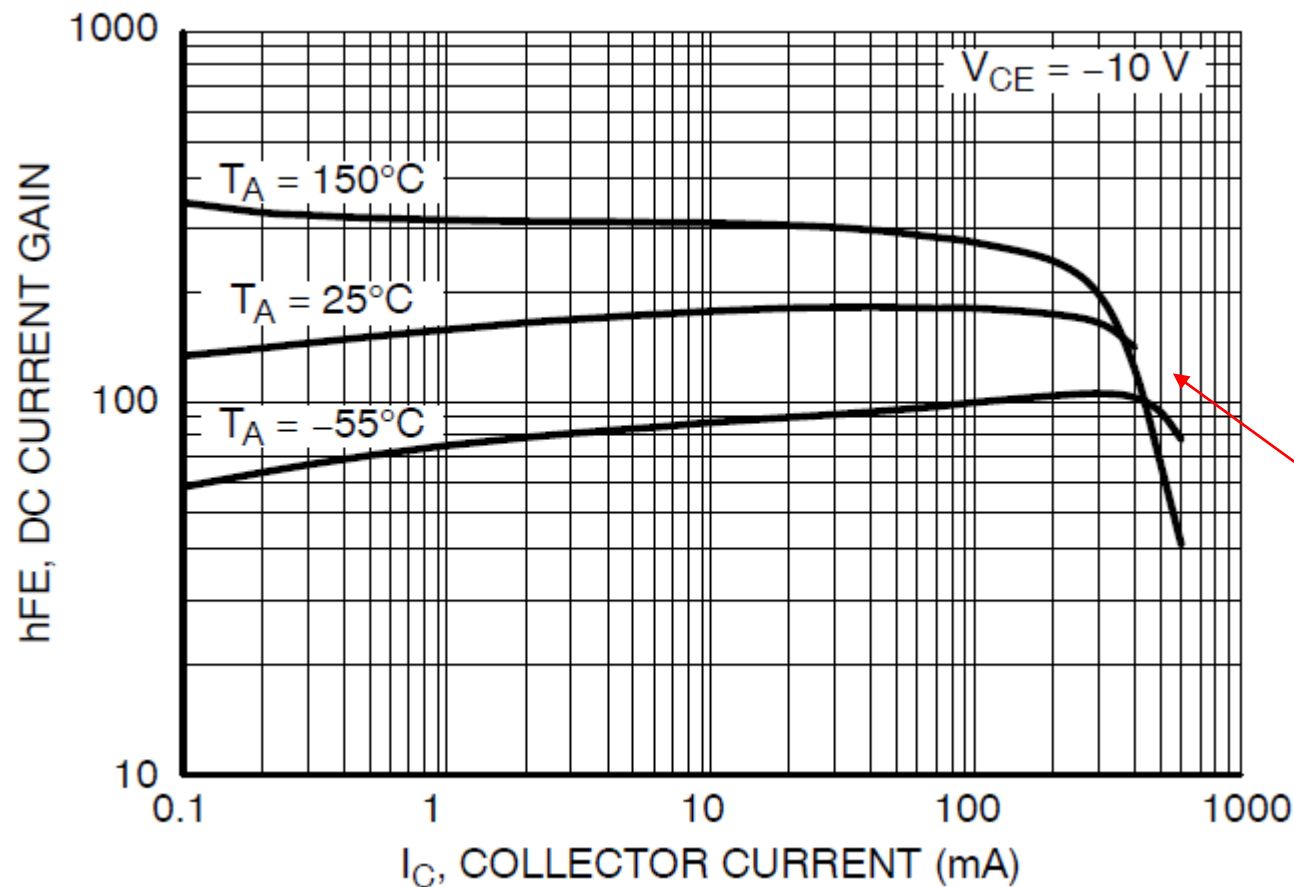
—

100

300

50

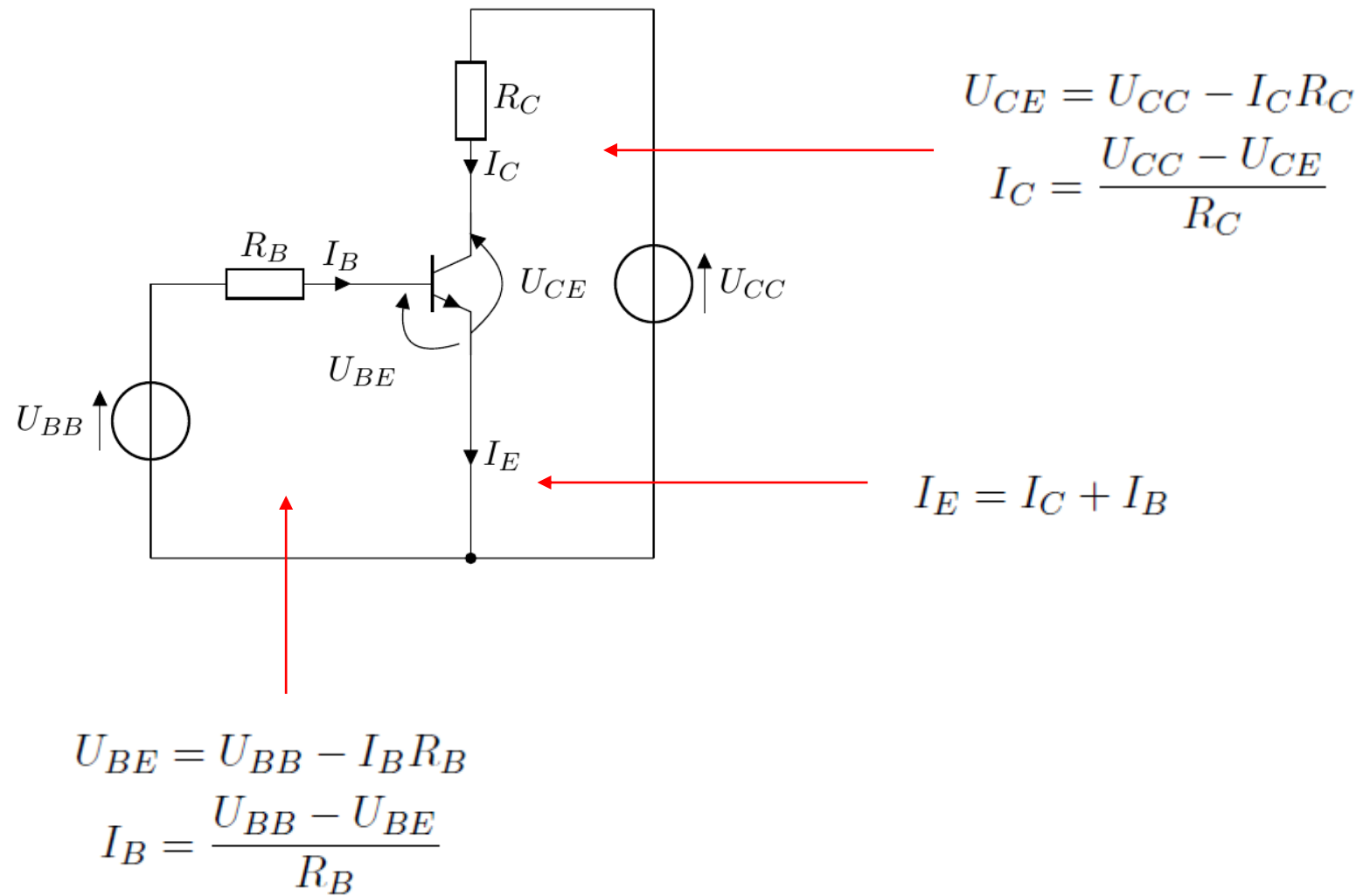
—



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

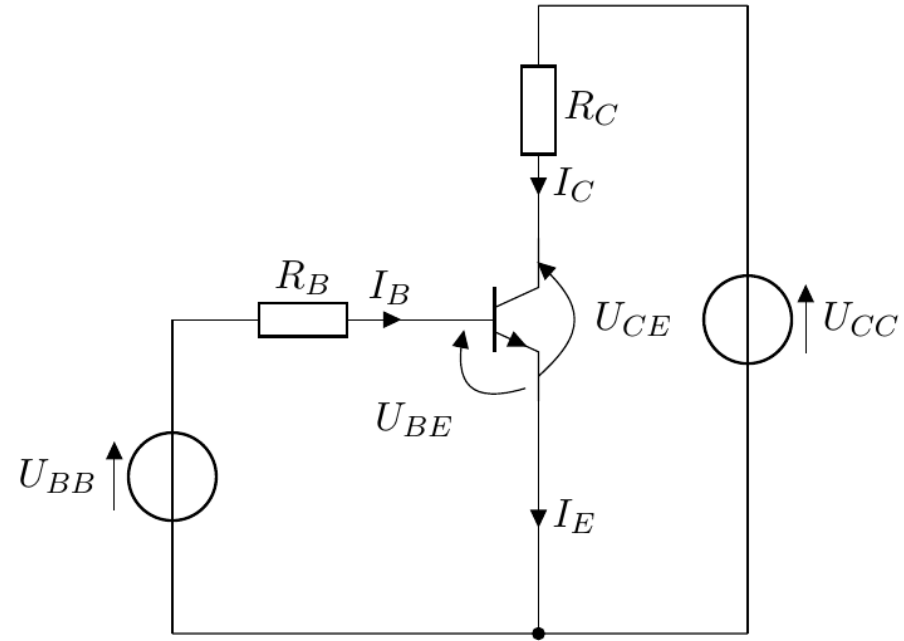


Примери

$$U_{BB} = 5V$$

$$R_B = 100k\Omega$$

$$I_B = ?$$



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

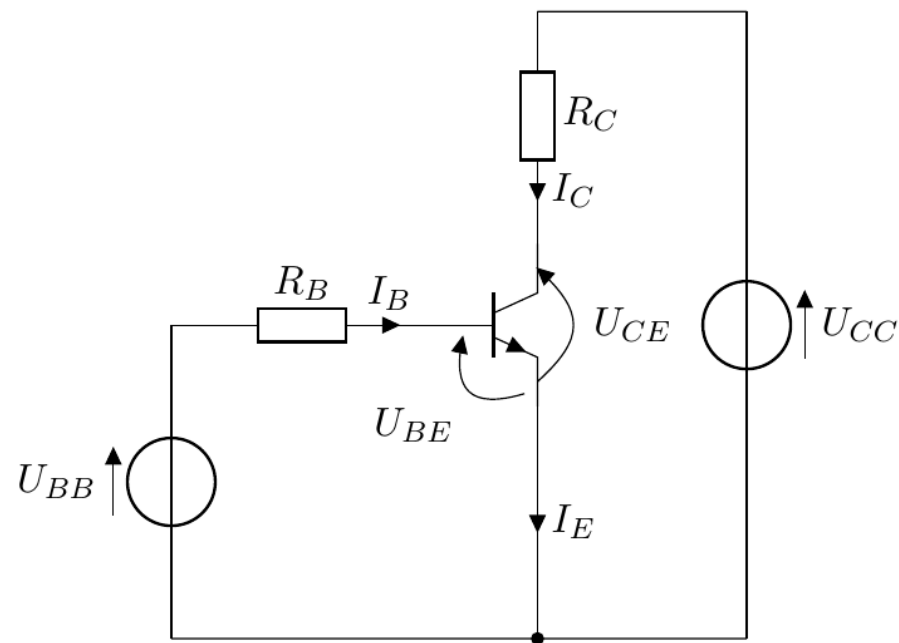
Примери

$$U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 3k\Omega$$

$$I_C = 1mA$$

$$U_{CE} = ?$$



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

Примери

$$U_{CC} = 12V$$

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

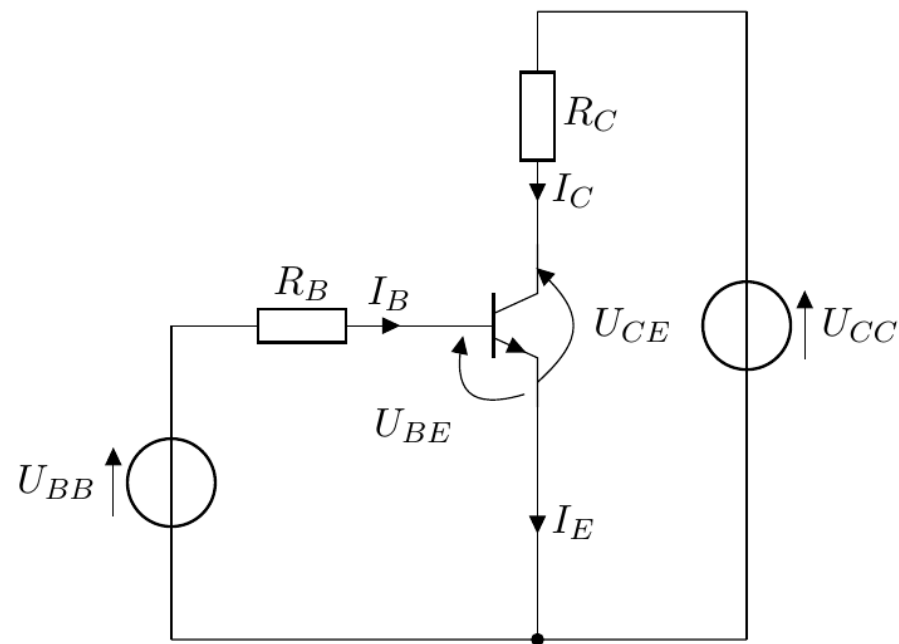
$$R_B = 330k\Omega$$

$$I_B = 25\mu A$$

$$\beta = 200$$

$$U_{CE} = ?$$

$$P_C = ?$$



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

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

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

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

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

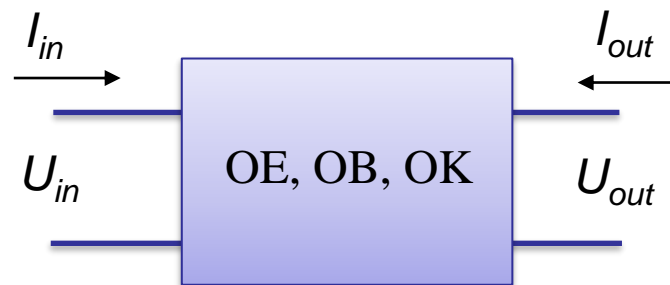
$$= 5 \times 10^{-3} A = 5mA$$

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

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

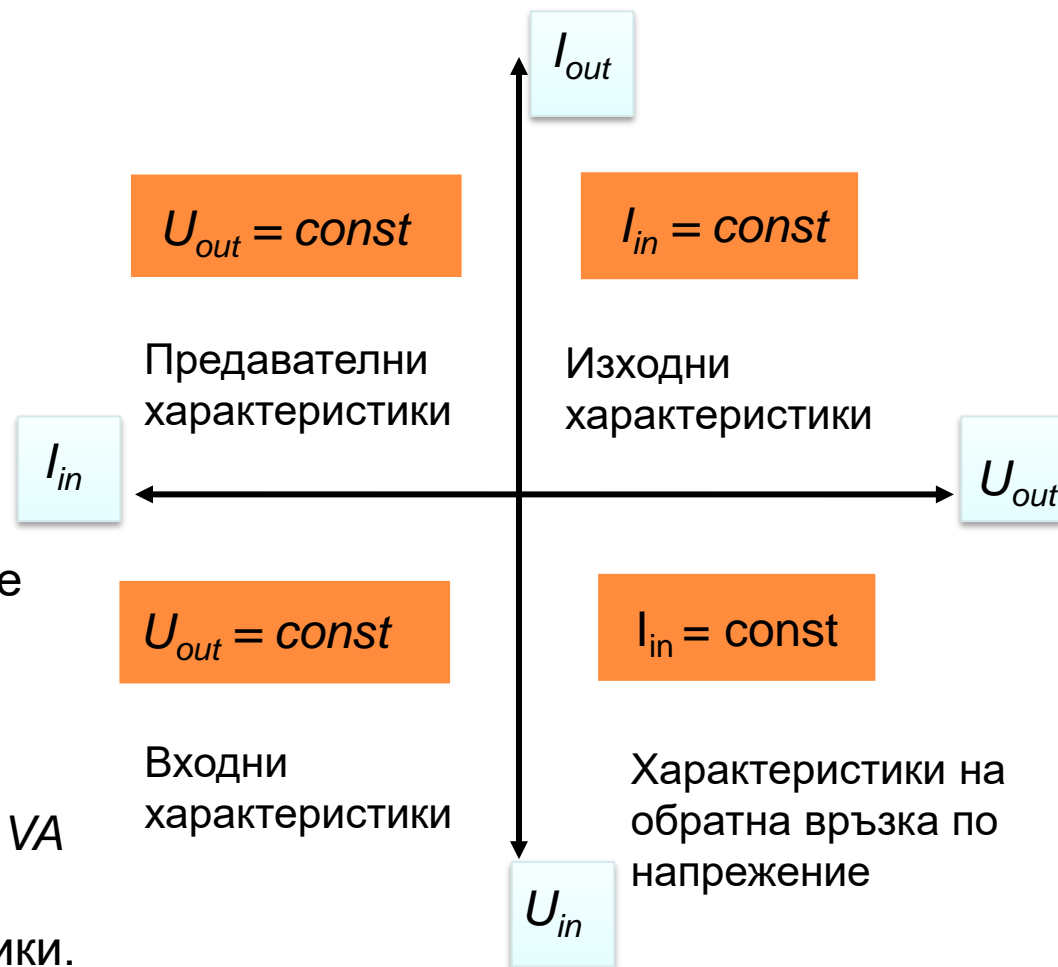
$$P_C = 4,5V \cdot 5mA = 22,5mW$$

Волт-Амперни Характеристики

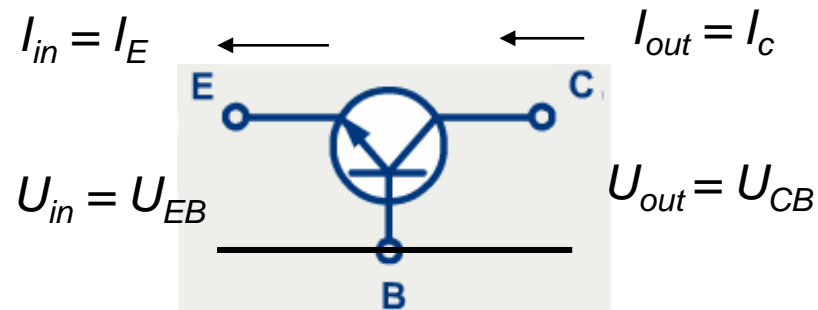


Съществува взаимна връзка между входните и изходни токове и напрежения в транзистора.

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

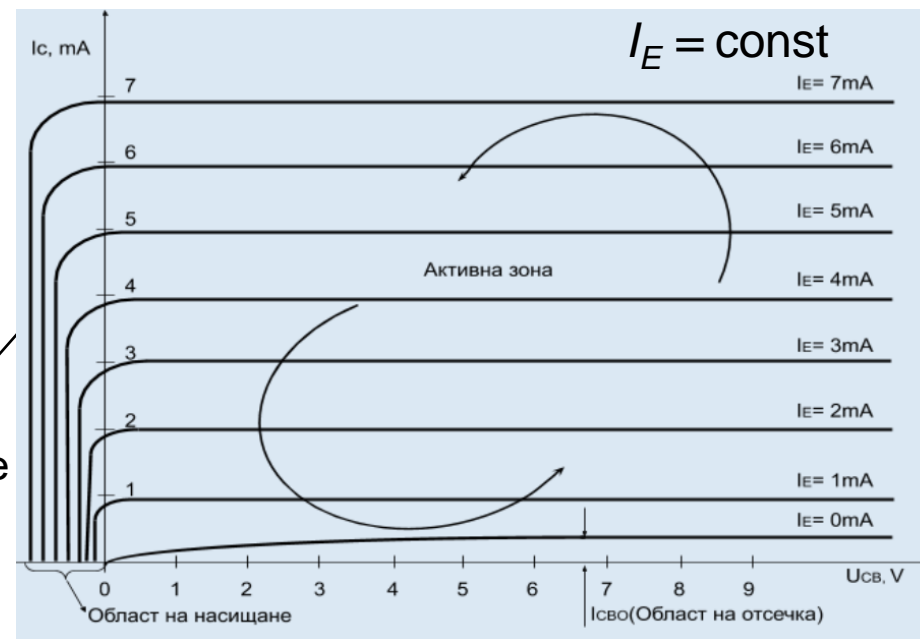


Обща База – Изходни Характеристики



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

Насищане



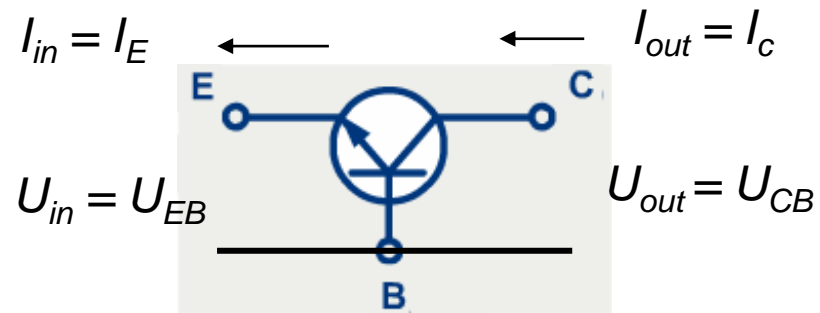
Отсечка ($I_E = 0$, $I_C = I_{CB0}$)

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

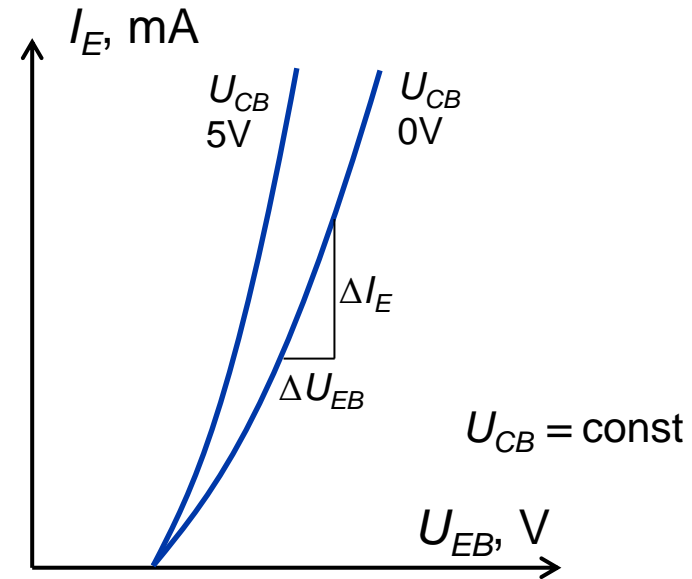
$$\alpha = f(I_E) \quad r_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} \Big|_{I_E = \text{const}}$$

Изходно диференциално
съпротивление в ОБ

Обща База – Входни Характеристики



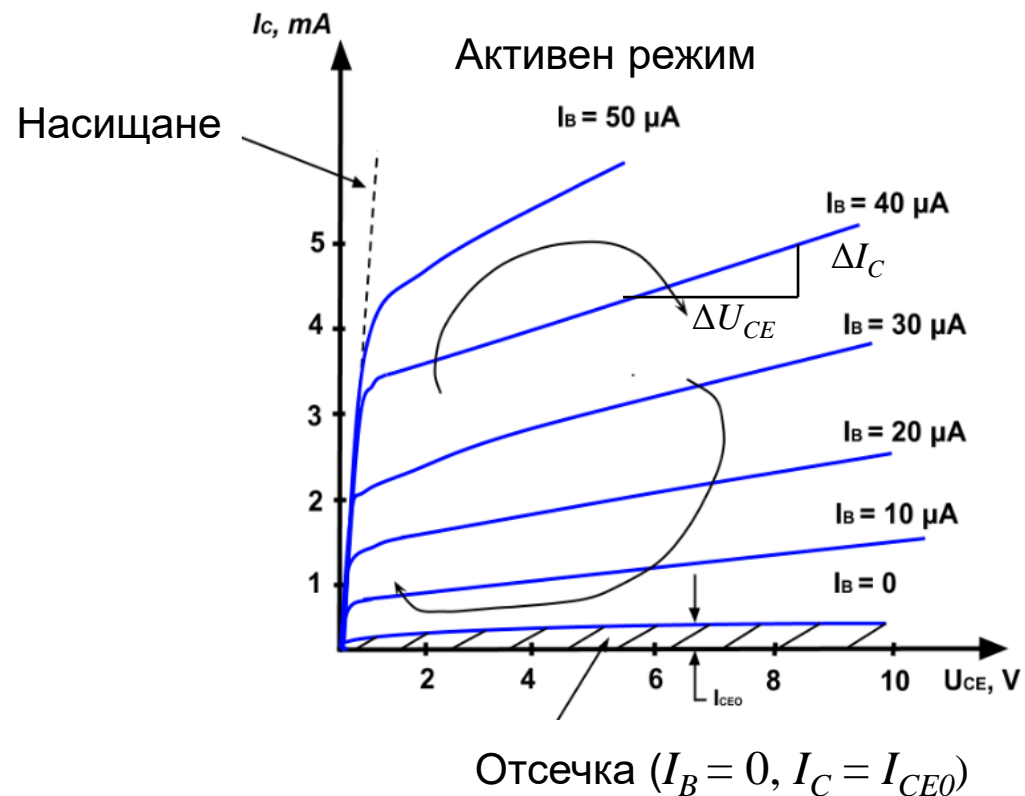
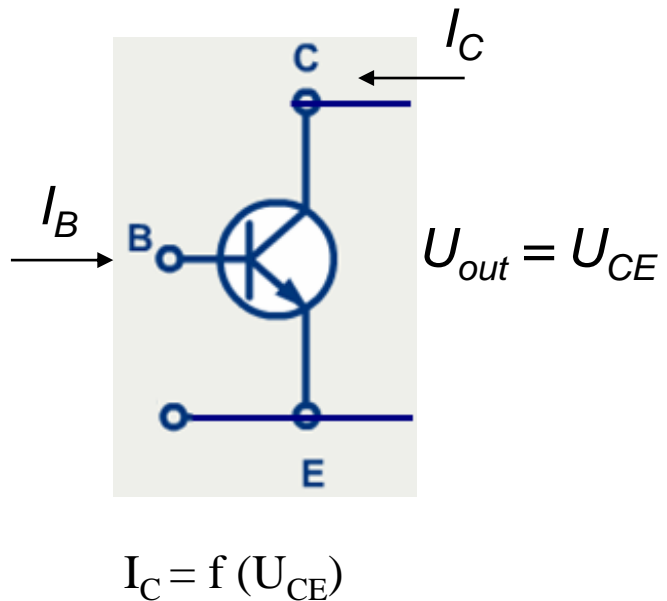
$$I_E = f(U_{EB}) \Big|_{U_{CB} = \text{const}}$$



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

Входно диференциално
съпротивление в ОБ

Общ Емитер – Изходни Характеристики



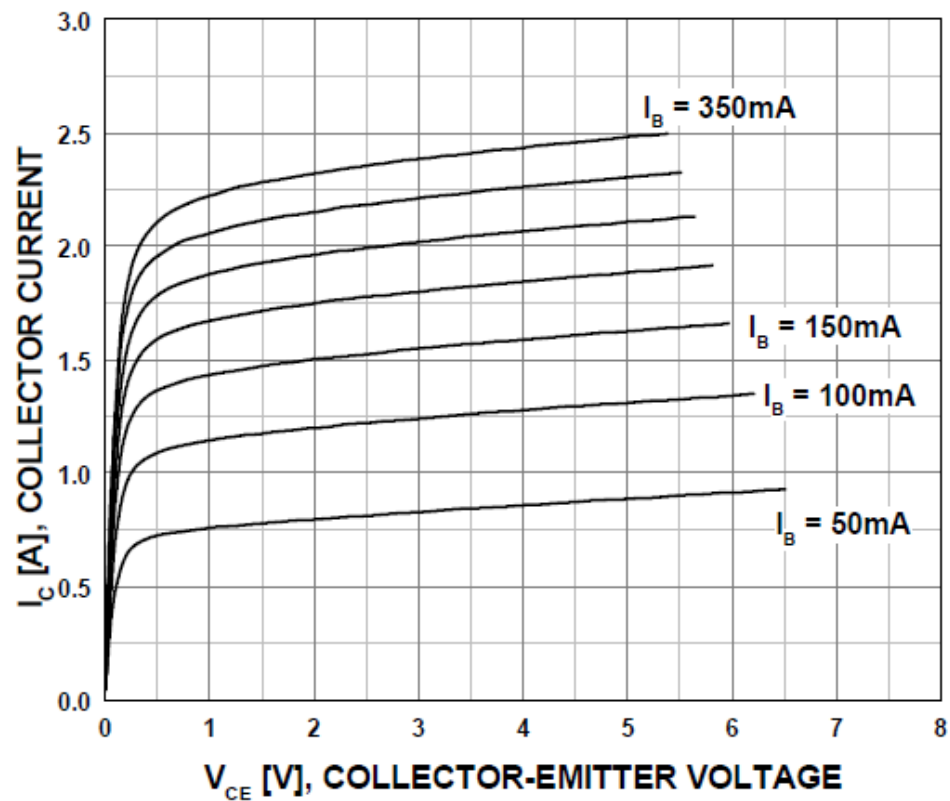
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} + \frac{U_{CE}}{r_C^*}$$

$$\beta = f(I_C)$$

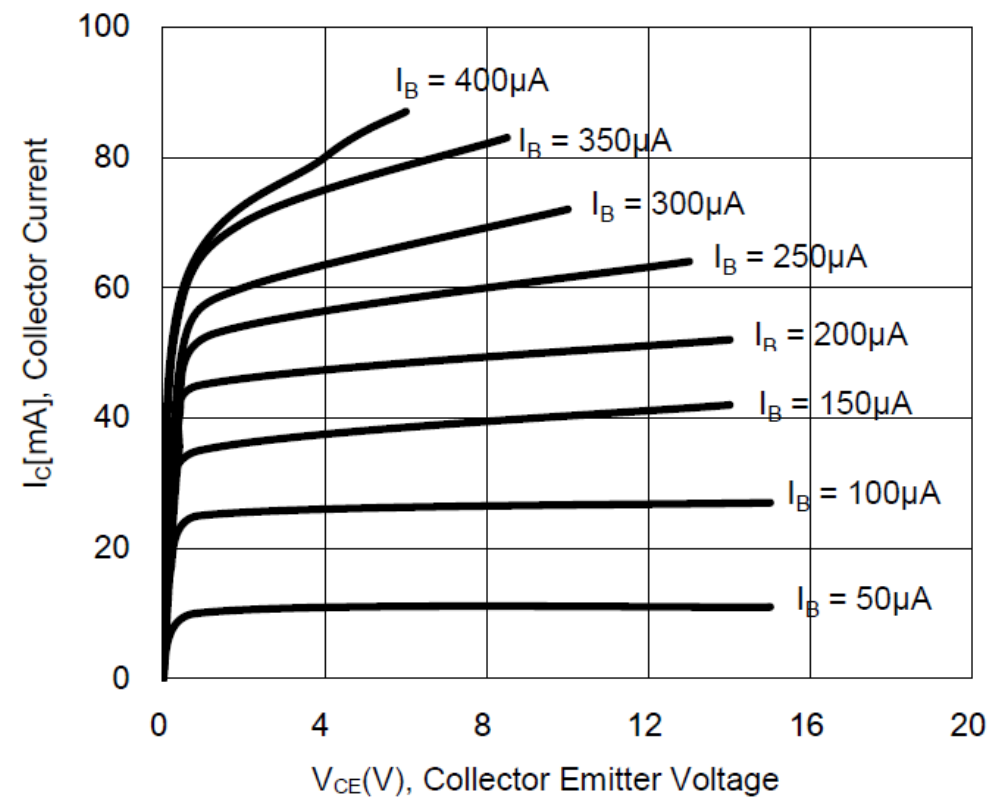
$$r_C^* = \frac{dU_{CE}}{dI_C} = \frac{r_C}{1 + \beta}$$

Изходно диференциално
съпротивление в ОЕ

Общ Емитер – Изходни Характеристики

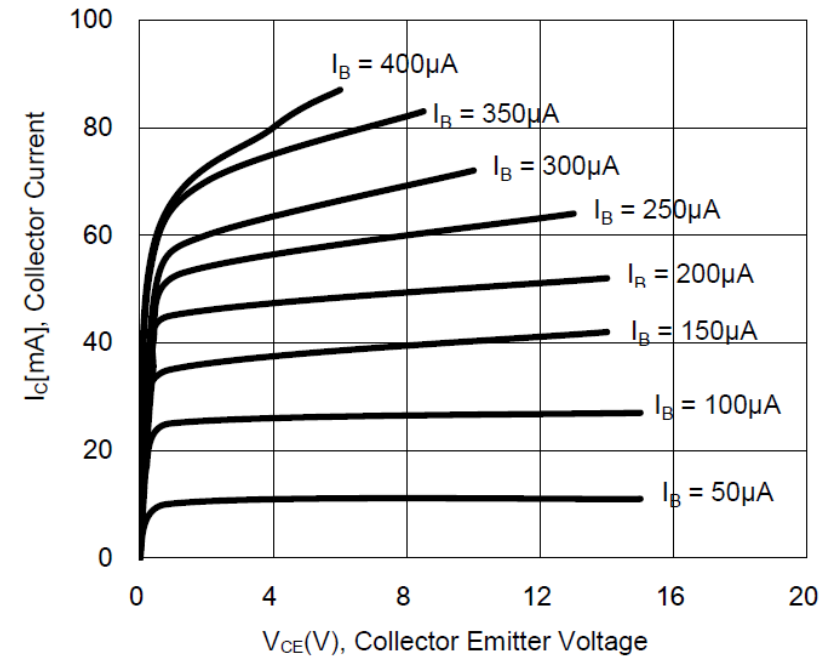
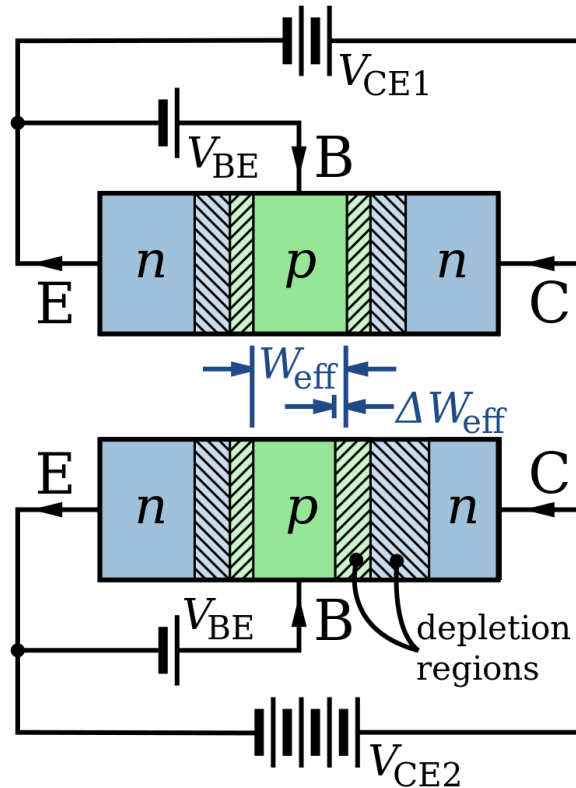


FJP5027



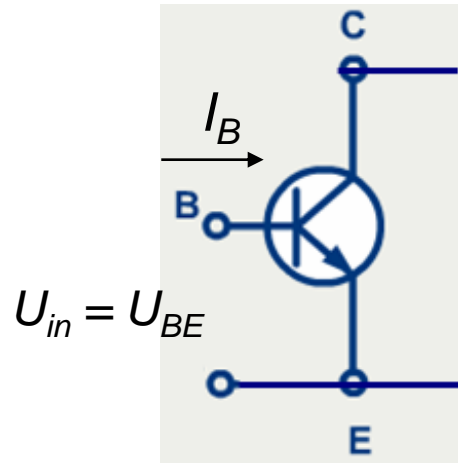
BC546

Модулиране на Широчината на Базата

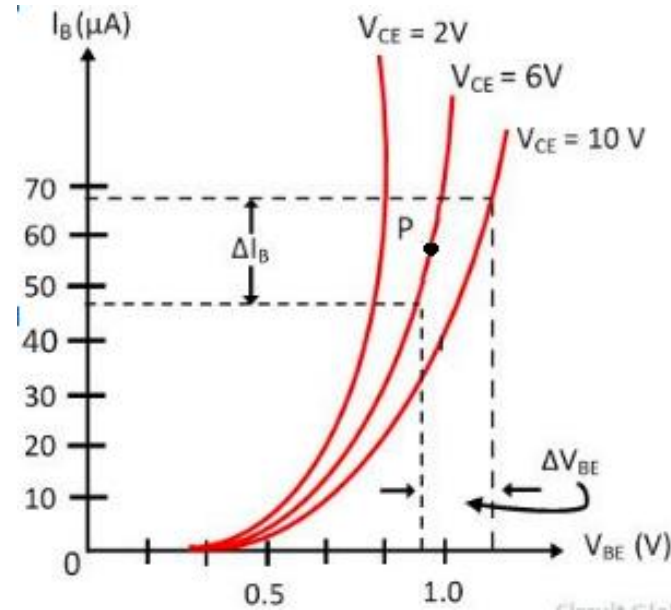


С увеличаване на U_{ce} се увеличава коефициента на усилване по ток h_{FE}
Early effect

Общ Емитер – Входни Характеристики



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

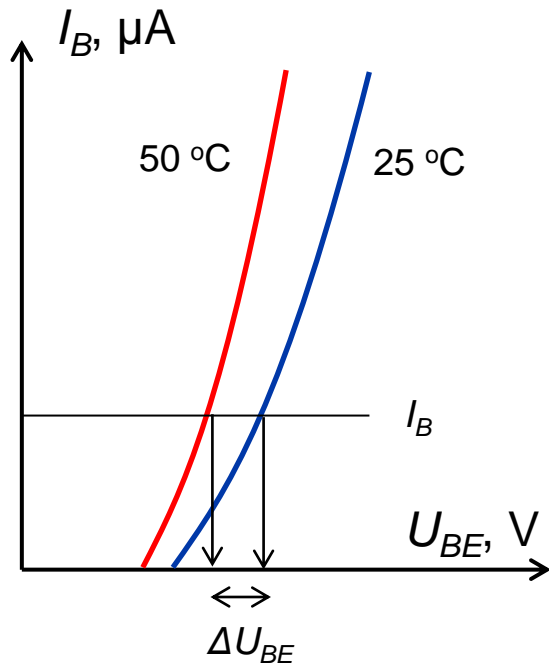


$$r_{in} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

Входно диференциално
съпротивление в ОЕ

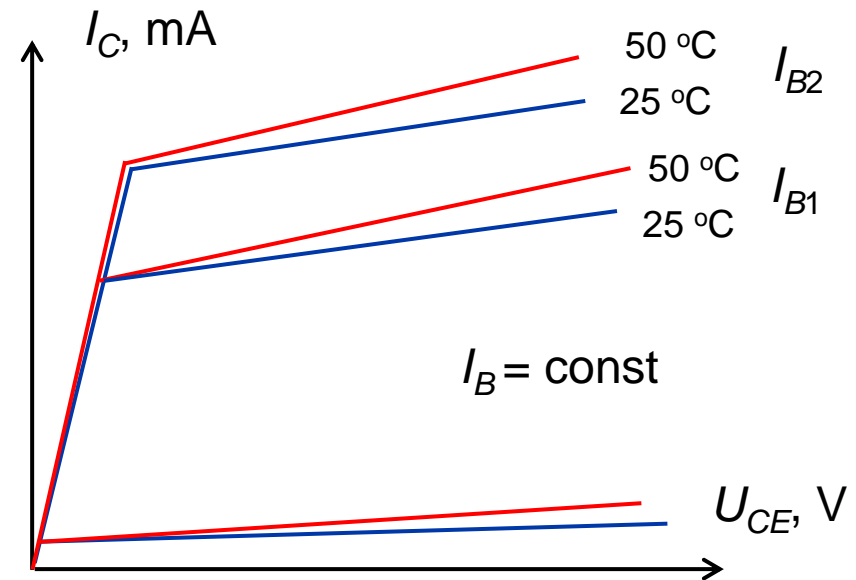
Влияние на температурата

$$TKU_{BE} < 1$$



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

$$\beta = f(T)$$



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

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

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

Мощност, разсеяна в околната среда

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

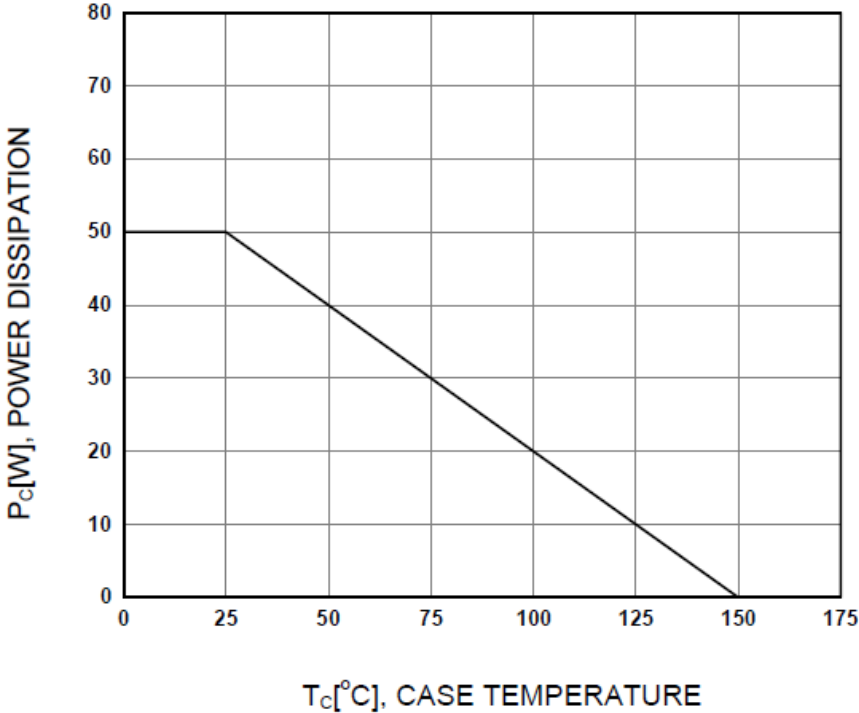
Максимална Мощност

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



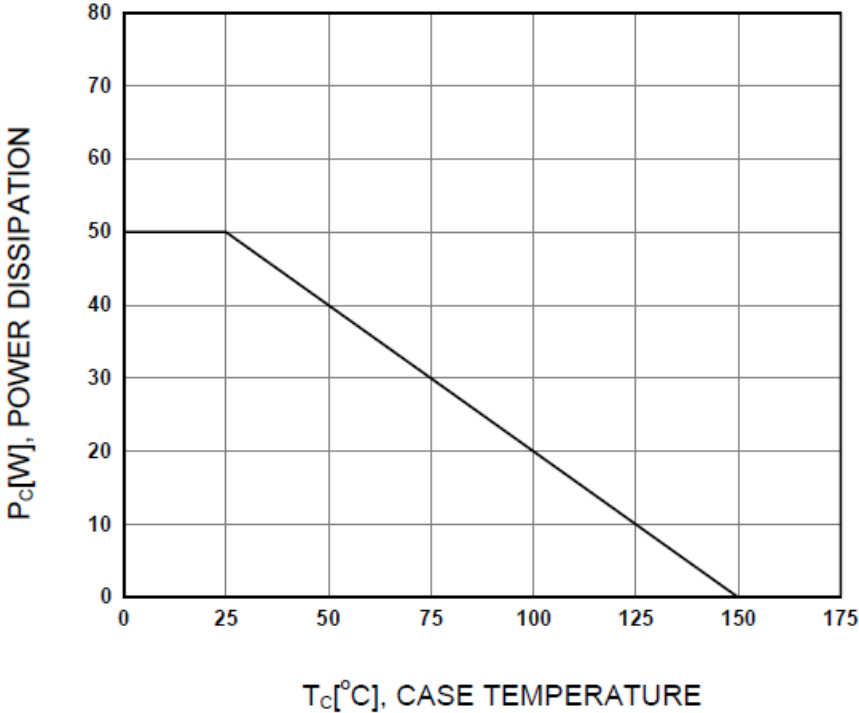
Максимална Температура

Absolute Maximum Ratings T_C=25°C unless otherwise noted

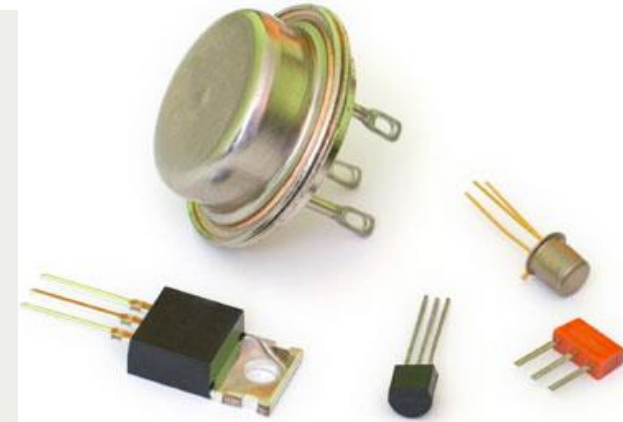
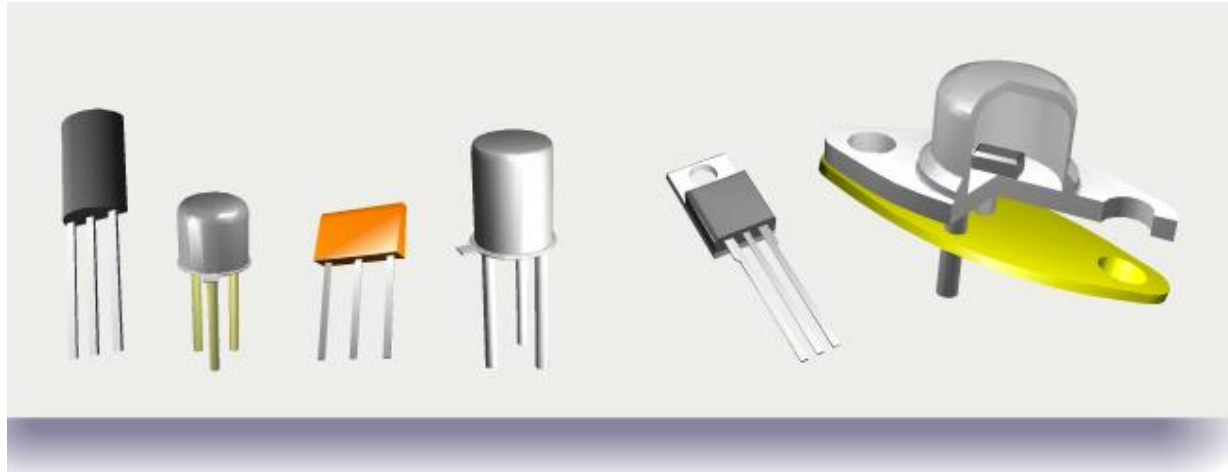
Symbol	Parameter	Value	Units
V _{CBO}	Collector-Base Voltage	1100	V
V _{CEO}	Collector-Emitter Voltage	800	V
V _{EBO}	Emitter-Base Voltage	7	V
I _C	Collector Current (DC)	3	A
I _{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I _B	Base Current	1.5	A
P _C	Collector Dissipation (T _C =25°C)	50	W
T _J	Junction Temperature	150	°C
T _{STG}	Storage Temperature	- 55 ~ 150	°C

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

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

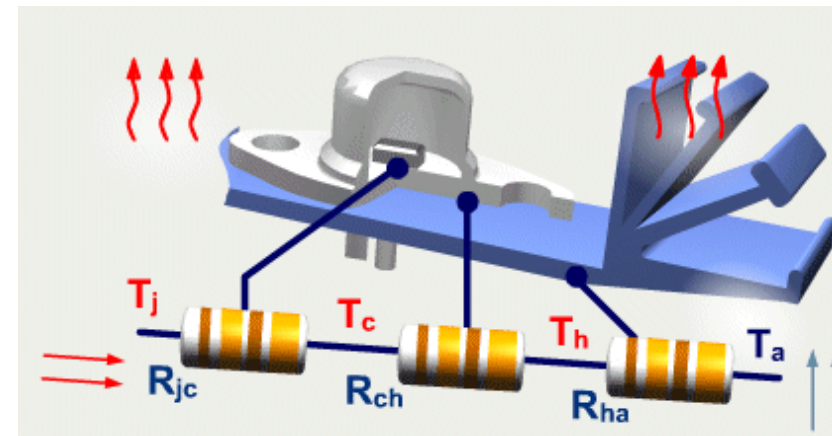
Топлинното съпротивление R_{th} показва ефективността при отделяне на топлината от транзистора и се измерва в K/W или в $^{\circ}C/W$.

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

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

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

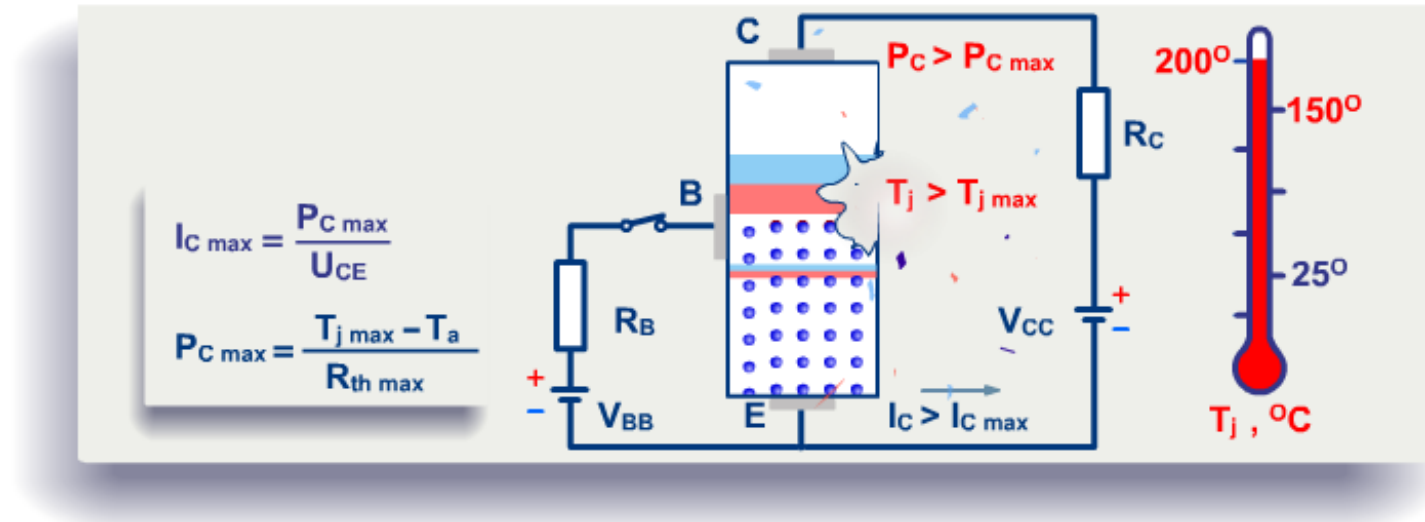
Радиатор



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

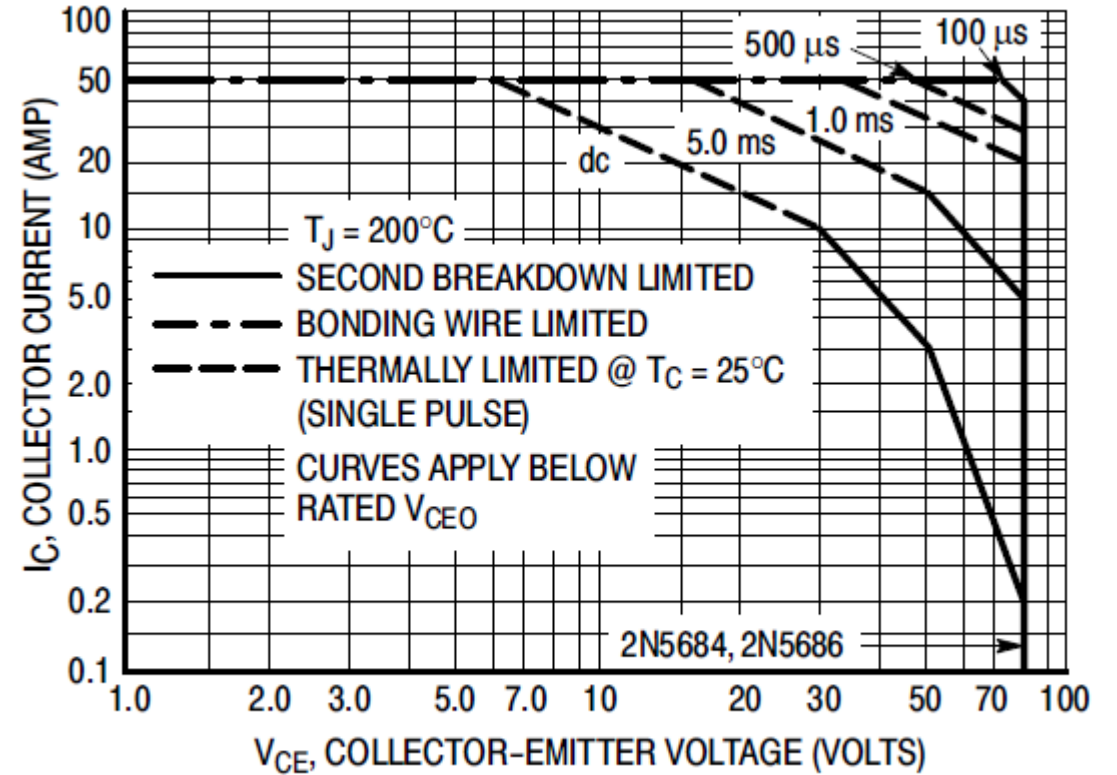
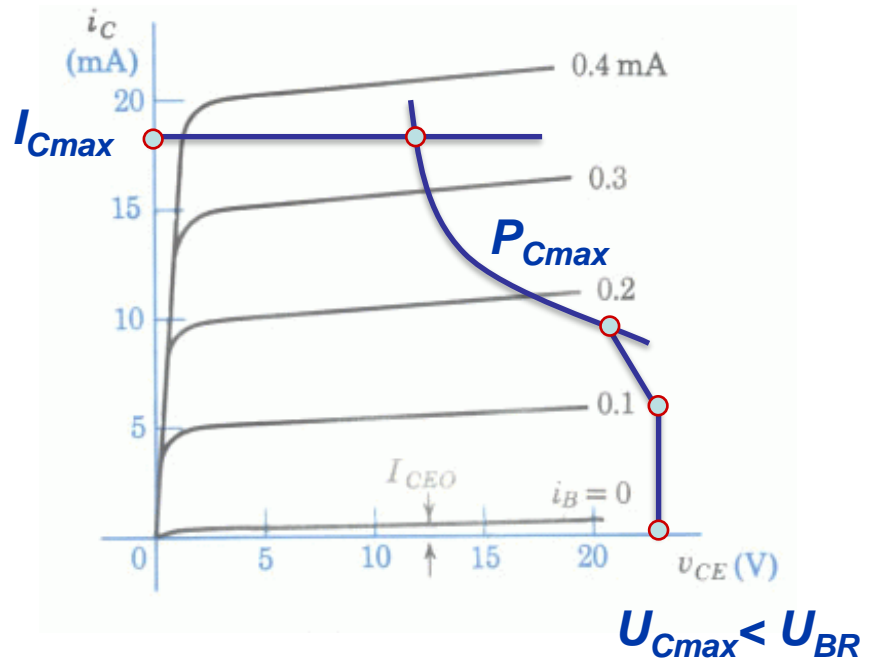
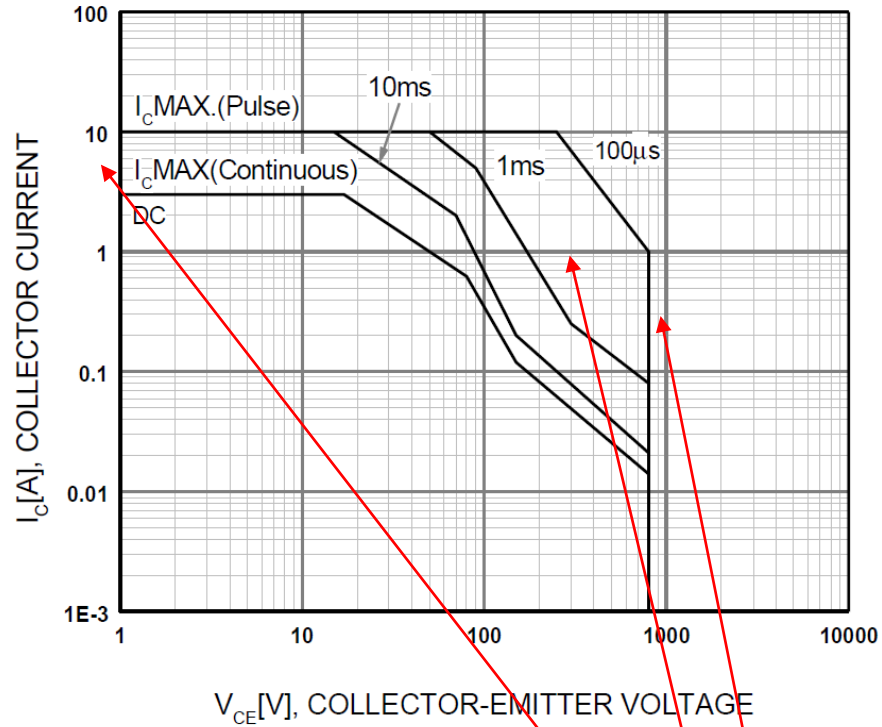


Figure 5. Active-Region Safe Operating Area

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)

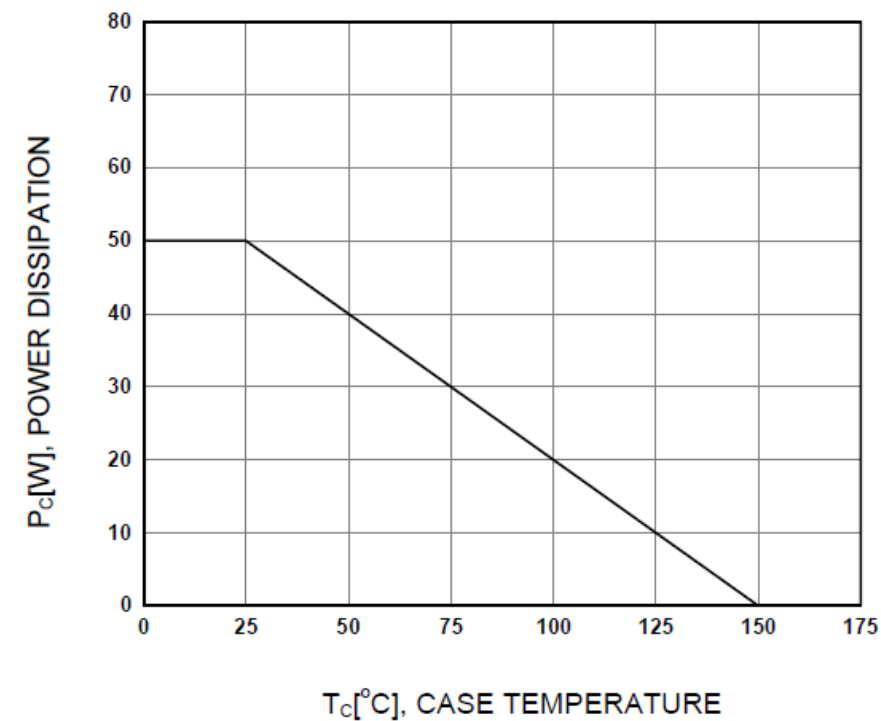
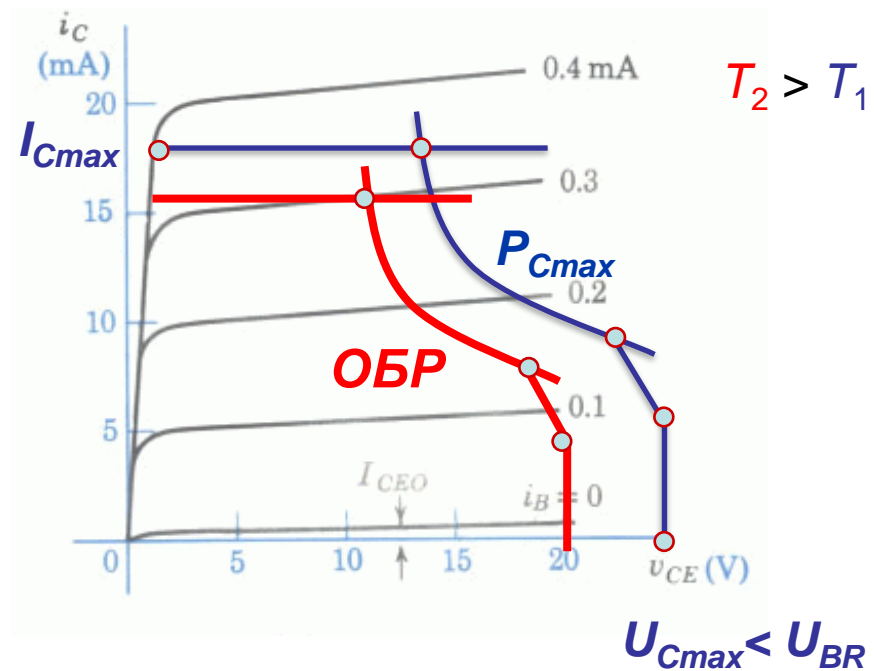
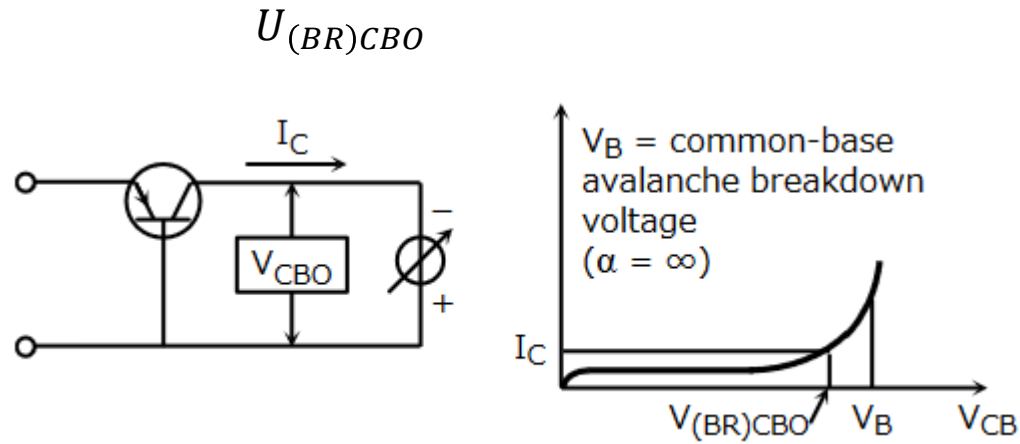


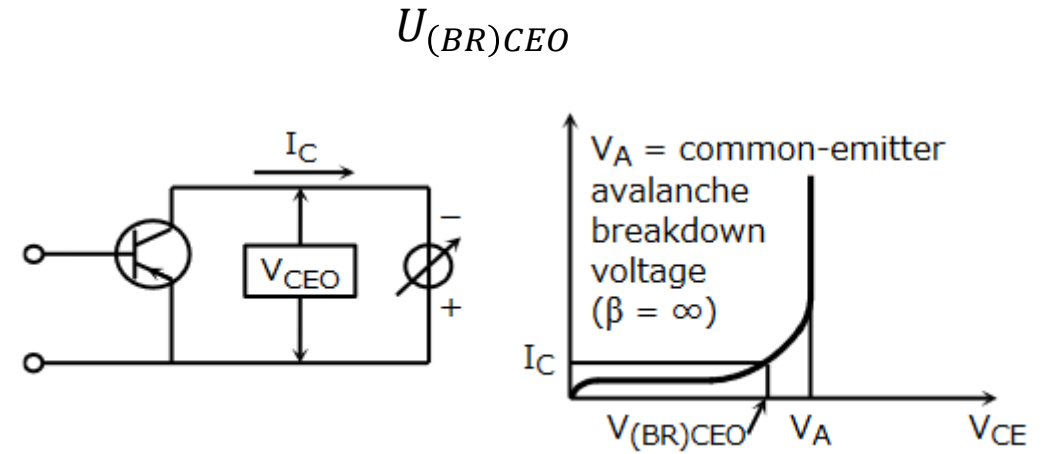
Figure 8. Power Derating

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