

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 1

7. Bipolarni tranzistori

Bipolarni tranzistor

Aktivni element s tri priključka

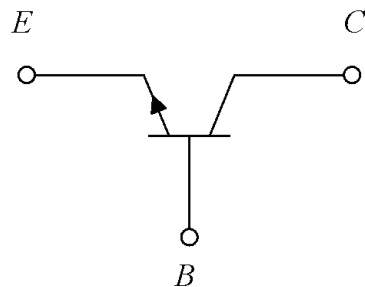
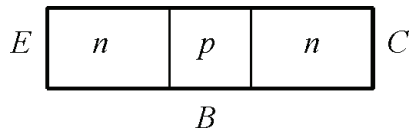
- ❑ ulazni, izlazni i zajednički priključak
- ❑ pobuda u ulaznom krugu upravlja signalom u izlaznom krugu
- ❑ naziv bipolarni – rad se temelji na vođenju struje obaju tipova nosilaca (engl. Bipolar Junction Transistor – BJT)
- ❑ primjena: pojačalo, sklopka

Shematski prikaz i električni simbol

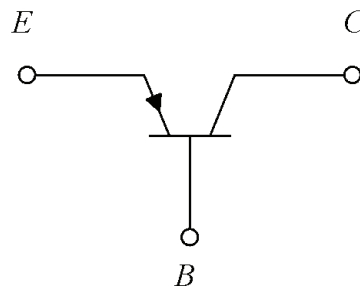
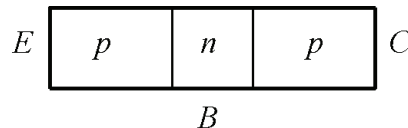
Troslojna struktura

Dva tipa

*n**p**n*



*p**n**p*



Priključci

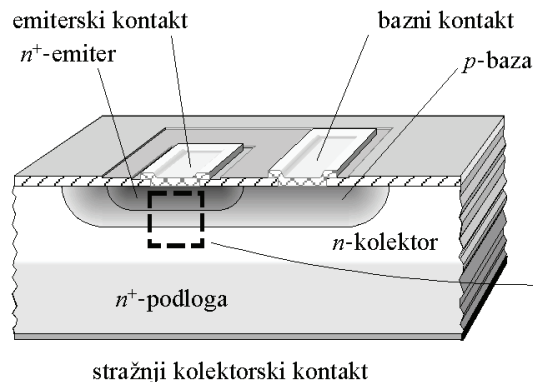
- ☐ emiter – E
- ☐ baza – B
- ☐ kolektor – C

Dva pn-spoja

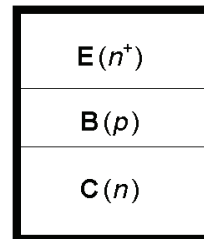
- ☐ emiter-baza
- ☐ kolektor-baza

Struktura

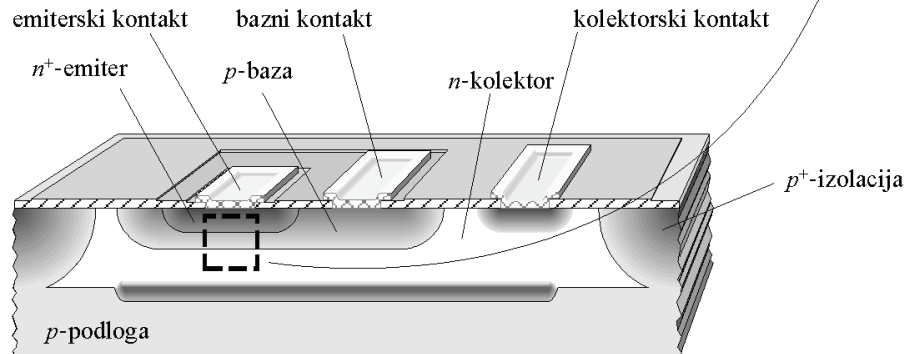
diskretni tranzistor



intrinzični tranzistor



integrirani tranzistor



u kolektoru - dva sloja

❑ p -baza

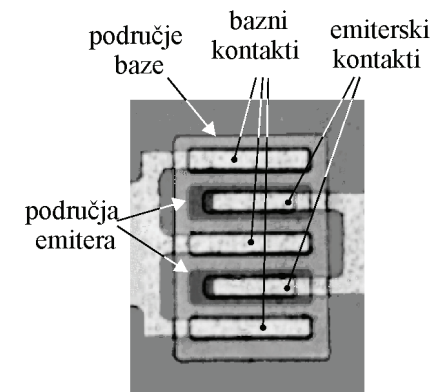
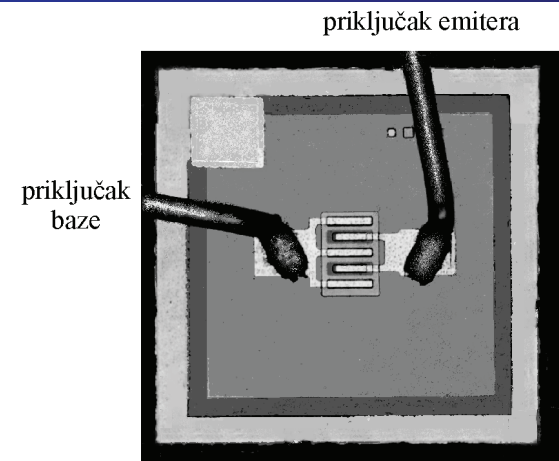
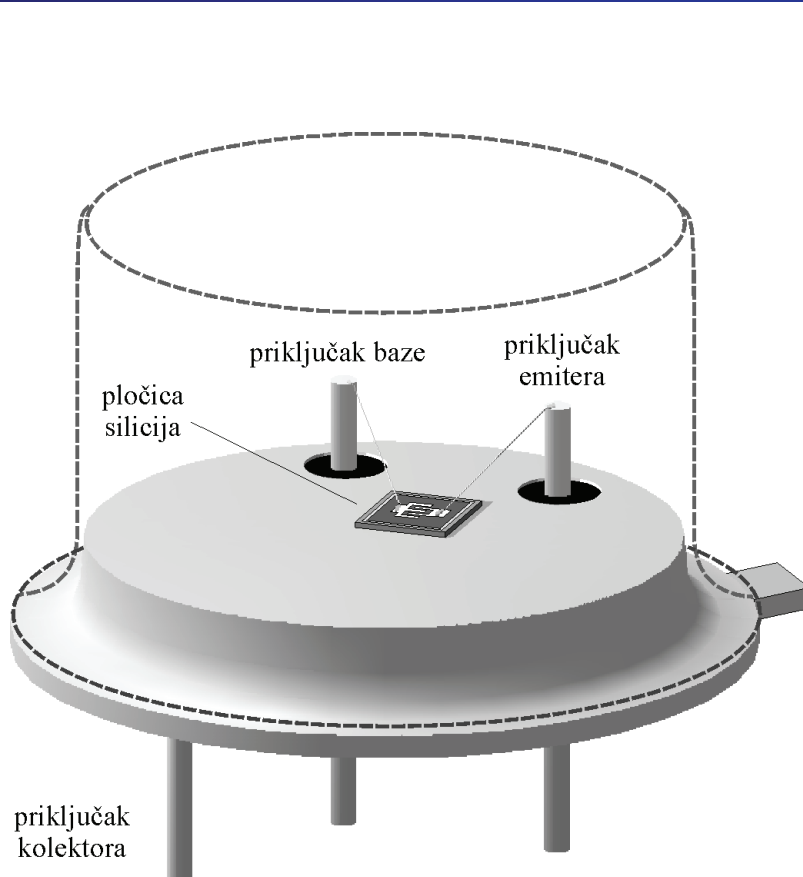
❑ n^+ -emiter

diskretni tranzistor –
podloga je dio
kolektora

integrirani tranzistor – u
zajedničkoj podlozi
za sve elemente

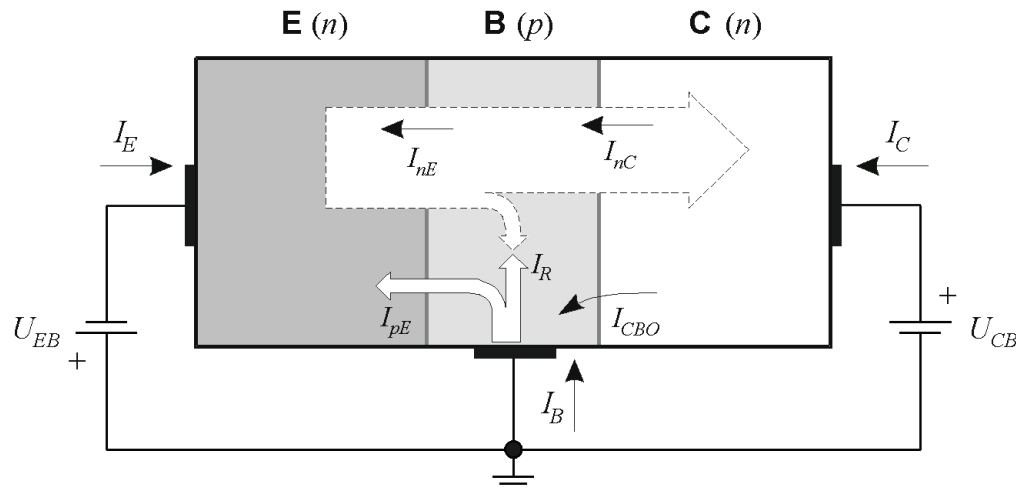
dominantni tok struje –
od emitera, kroz bazu
u kolektor →
intrinzični tranzistor

Izgled diskretnog tranzistora



Opis rada

Polarizacija *pn*-spojeva:
emiter-baza – propusno,
kolektor-baza – zaporno →
normalno aktivno područje



komponente struja:

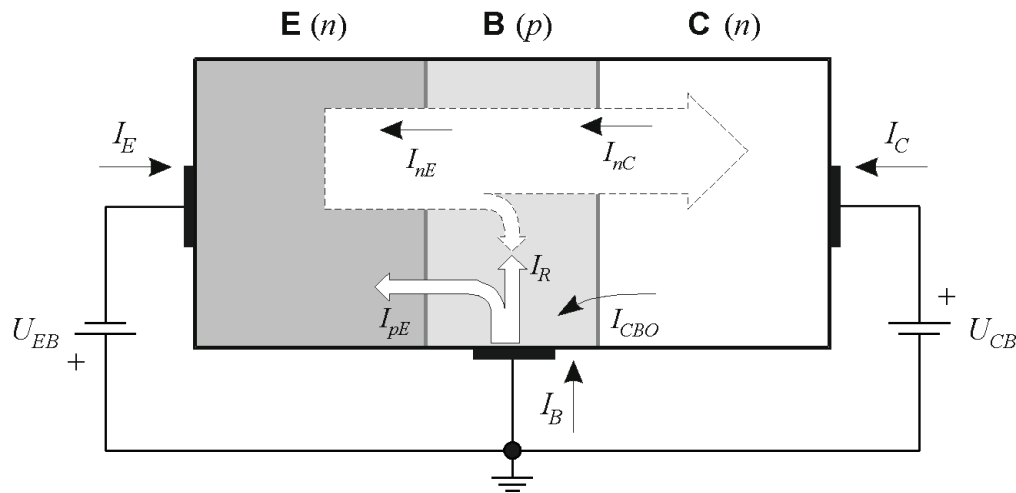
injekcija preko spoja emiter-baza → struje I_{nE} i I_{pE}

rekombinacija elektrona u bazi
→ struja I_R

prolaz elektrona kroz spoj
kolektor-baza → I_{nC}

struja zasićenja spoja
kolektor-baza → I_{CB0}

Vanjske struje tranzistora



definicija: struje su pozitivne
ako ulaze u element

$$I_E + I_B + I_C = 0$$

$$-I_E = I_{nE} + I_{pE}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{CBO}$$

$$I_B = I_{pE} + I_R - I_{CBO}$$

$$I_R = I_{nE} - I_{nC}$$

struje: $I_E < 0$, $I_B > 0$, $I_C > 0$,

Faktor injekcije, transportni faktor baze

Dobar tranzistor – što veći dio emitterske struje stiže do kolektora

Faktor injekcije ili efikasnost emitera

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{I_{nE}}{-I_E}$$

dobar tranzistor – u struji I_E prevladava struja I_{nE} ; $\gamma \rightarrow 1$

Transportni faktor baze

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{nE}}$$

dobar tranzistor – veći dio struje I_{nE} ulazi u kolektor kao struja I_{nC} ; mala rekombinacija u bazi; $\beta^* \rightarrow 1$

Faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze

Izlazna je struja kolektora I_C , ulazne je struja emitera I_E

→ spoj zajedničke baze

$$I_C = -\gamma \beta^* I_E + I_{CB0}$$

Svojstvo tranzistora - propusno polariziranim spojem emiter-baza upravlja se velikom strujom kroz bliski zaporno polarizirani spoj kolektor-baza

$$\alpha = \gamma \beta^*$$

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

Zanemarenjem struje zasićenja I_{CB0}

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E}$$

$\alpha \equiv$ **statički faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze**
tipični iznosi od 0,98 do 0,995

Primjer 7.1

Bipolarni *npn* tranzistor radi u normalnom aktivnom području. Na svakih 200 elektrona koji iz emitera prijeđu u bazu 1 šupljina prijeđe iz baze u emiter. Od 400 elektrona koji su iz emiter ušli u bazu njih 399 stigne do kolektora. Izračunati faktor strujnog pojačanja ovog tranzistora za spoj zajedničke baze α .

Rješenje:

Faktor injekcije – broj elektrona koji pređu u bazu u odnosu na ukupni broj elektrona

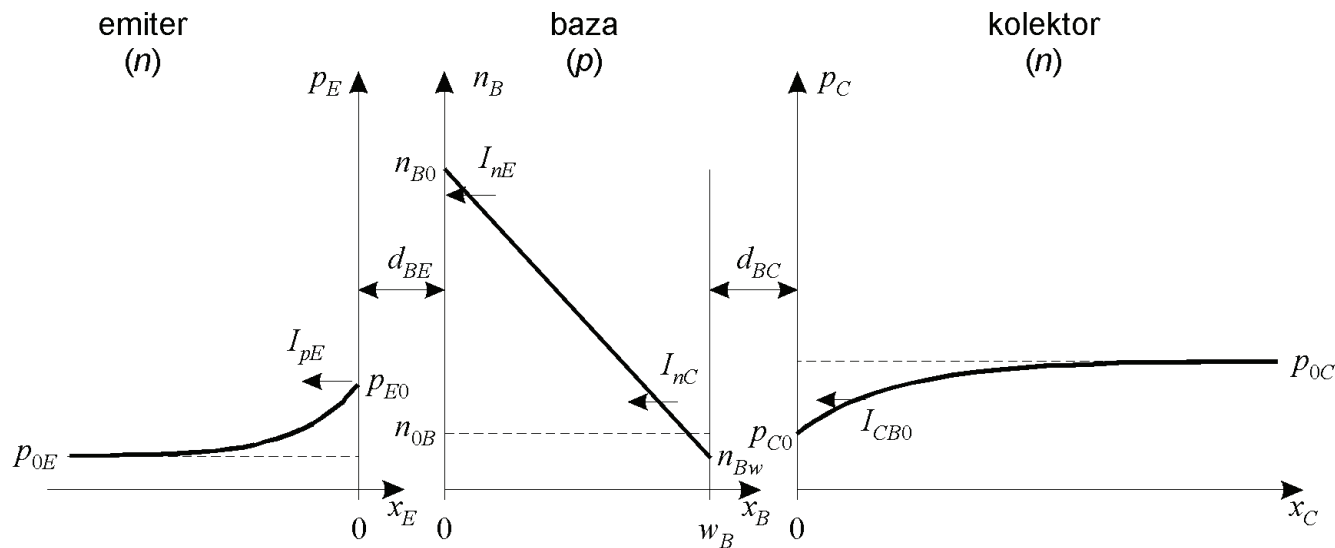
$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{200}{200 + 1} = 0,995$$

Transportni faktor baze – broj elektrona koji dolaze u kolektor u odnosu na broj elektrona iz emitera

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \frac{399}{400} = 0,9975$$

$$\alpha = \gamma \cdot \beta^* = 0,995 \cdot 0,9975 = 0,9925$$

Raspodjele manjinskih nosilaca



Rubne koncentracije nosilaca

$$n_{B0} = n_{0B} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

$$n_{Bw} = n_{0B} \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right)$$

$$p_{E0} = p_{0E} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

$$p_{C0} = p_{0C} \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right)$$

Faktor injekcije

Komponente I_{nE} i $I_{pE} \rightarrow$ difuzijske struje

$$I_{nE} = -I_{Dn}|_{x_B=0} = q S D_{nB} \frac{n_{B0} - n_{Bw}}{w_B} \approx q S D_{nB} \frac{n_{B0}}{w_B}$$

$$n_{0B} = \frac{n_i^2}{N_{AB}}$$

$$I_{pE} = -I_{Dp}|_{x_E=0} = q S D_{pE} \frac{p_{E0} - p_{0E}}{L_{pE}} \approx q S D_{pE} \frac{p_{E0}}{L_{pE}}$$

$$p_{0E} = \frac{n_i^2}{N_{DE}}$$

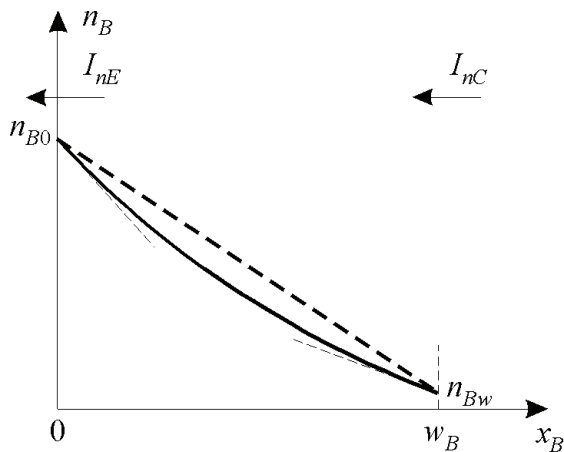
$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + I_{pE} / I_{nE}} = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} w_B N_{AB}}{D_{nB} L_{pE} N_{DE}}}$$

za uski emiter: umjesto $L_{pE} \rightarrow w_E$

Faktor γ biti će to bliži jedinici što je emiter jače dopiran od baze.

Transportni faktor baze

Odstupanje raspodjele manjinskih elektrona u bazi od linearne aproksimacije



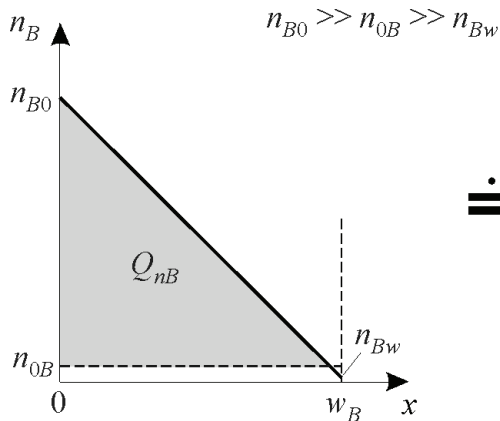
Za $w_B \ll L_{nB}$

$$\beta^* \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_B}{L_{nB}} \right)^2$$

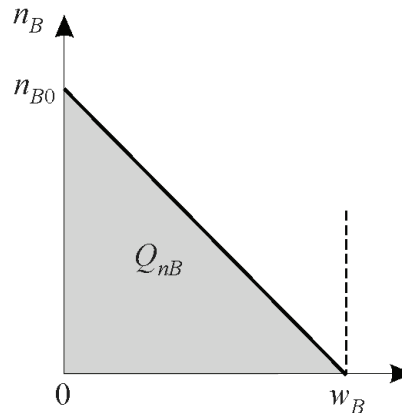
w_B - efektivna širina baze

Faktor β^* je to je bliže jedinici što je širina w_B manja od difuzijske duljine L_{nB} .

Naboj manjinskih nosilaca u bazi



$\dot{=}$



$$Q_{nB} \approx q S \frac{n_{B0} w_B}{2}$$

$$\frac{Q_{nB}}{I_{nE}} = \frac{w_B^2}{2 D_{nB}} = t_{tr} \quad t_{tr} \rightarrow \text{vrijeme proleta nosilaca kroz bazu}$$

$$I_R = I_{nE} - I_{nC} = I_{nE} (1 - \beta^*) = q S \frac{n_{B0} w_B}{2 \tau_{nB}}$$

$$\frac{Q_{nB}}{I_R} = \tau_{nB}$$

Primjer 7.2 (1)

Silicijski *npn* tranzistor ima koncentracije primjesa u emiteru i bazi iznosa $N_{DE} = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_{AB} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna širina baze je $1 \text{ }\mu\text{m}$, dok su širine emitera i kolektora puno veće od difuzijskih duljina manjinskih nosilaca. Površina tranzistora je 1 mm^2 , a struja zasićenja $I_{CB0} = 0,45 \text{ pA}$. Parametri manjinskih nosilaca su u emiteru $D_{pE} = 8 \text{ cm}^2/\text{s}$ i $L_{pE} = 20 \text{ }\mu\text{m}$ i u bazi $D_{nB} = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ i $L_{nB} = 15 \text{ }\mu\text{m}$. Temperatura je $T = 300\text{K}$. Izračunati sve komponente struja, i ukupne struje emitera, baze i kolektora uz napone

a) $U_{BE} = 0,55 \text{ V}$ i $U_{CB} = 5 \text{ V}$,

b) $U_{BE} = 0,55 \text{ V}$ i $U_{CB} = 0$.

Rješenje:

za $T = 300\text{K} \rightarrow n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$$p_{0E} = \frac{n_i^2}{n_{0E}} = \frac{n_i^2}{N_{DE}} = 1,05 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{0B} = \frac{n_i^2}{p_{0B}} = \frac{n_i^2}{N_{AB}} = 2,10 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

Primjer 7.2 (2)

- a) $U_{BE} = 0,55 \text{ V} \rightarrow$ propusna polarizacija, $U_{CB} = 5 \text{ V} \rightarrow$ zaporna polarizacija
rubne koncentracije

$$p_{E0} = p_{0E} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) = 1,05 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(\frac{0,55 \cdot 11600}{300}\right) = 1,81 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{B0} = n_{0B} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) = 2,10 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(\frac{0,55 \cdot 11600}{300}\right) = 3,62 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{Bw} = n_{0B} \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) = 2,10 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-\frac{5 \cdot 11600}{300}\right) = 2,28 \cdot 10^{-80} \approx 0$$

komponente struja

$$I_{nE} = q S D_{nB} \frac{n_{B0}}{w_B} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot \frac{3,62 \cdot 10^{13}}{10^{-4}} = 5,79 \text{ mA}$$

$$I_{pE} = q S D_{pE} \frac{p_{E0}}{L_{pE}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot \frac{1,81 \cdot 10^{12}}{20 \cdot 10^{-4}} = 11,6 \text{ }\mu\text{A}$$

Primjer 7.2 (3)

$$I_E = -I_{pE} - I_{nE} = -11,6 \cdot 10^{-6} - 5,79 \cdot 10^{-3} = -5,80 \text{ mA}$$

$$Q_{nB} = q S \frac{n_{B0} w_B}{2} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \frac{3,62 \cdot 10^{13} \cdot 10^{-4}}{2} = 2,90 \text{ pAs}$$

$$\tau_{nB} = \frac{L_{nB}^2}{D_{nB}} = \frac{(15 \cdot 10^{-4})^2}{10} = 0,225 \text{ } \mu\text{s}$$

$$I_R = \frac{Q_{nB}}{\tau_{nB}} = \frac{2,90 \cdot 10^{-12}}{0,225 \cdot 10^{-6}} = 12,9 \text{ } \mu\text{A}$$

$$I_{nC} = I_{nE} - I_R = 5,79 \cdot 10^{-3} - 12,9 \cdot 10^{-6} = 5,78 \text{ mA} \approx I_C$$

$$I_B = I_{pE} + I_R - I_{CB0} \doteq I_{pE} + I_R = 11,6 \cdot 10^{-6} + 12,9 \cdot 10^{-6} = 24,5 \text{ } \mu\text{A}$$

b) uz $U_{CB} = 0 \text{ V}$ mijenja se samo

$$n_{Bw} = n_{0B} \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) = 2,10 \cdot 10^4 \cdot \exp(0) = 2,10 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

Primjer 7.3 (1)

Za tranzistor iz primjera 7.2 odrediti faktor strujnog pojačanja α na temelju zadanih podataka. Koliko bi iznosio faktor strujnog pojačanja kada bi širina emitera bila $w_E = 3 \text{ } \mu\text{m} \ll L_{pE}$.

Rješenje:

za široki emiter

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} w_B N_{AB}}{D_{nB} L_{pE} N_{DE}}} = \frac{1}{1 + \frac{8 \cdot 1 \cdot 10^{16}}{10 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 10^{17}}} = 0,998$$

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_B}{L_{nB}} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{15} \right)^2 = 0,9978$$

$$\alpha = \gamma \cdot \beta^* = 0,998 \cdot 0,9978 = 0,9958$$

Primjer 7.3 (2)

za uski emiter

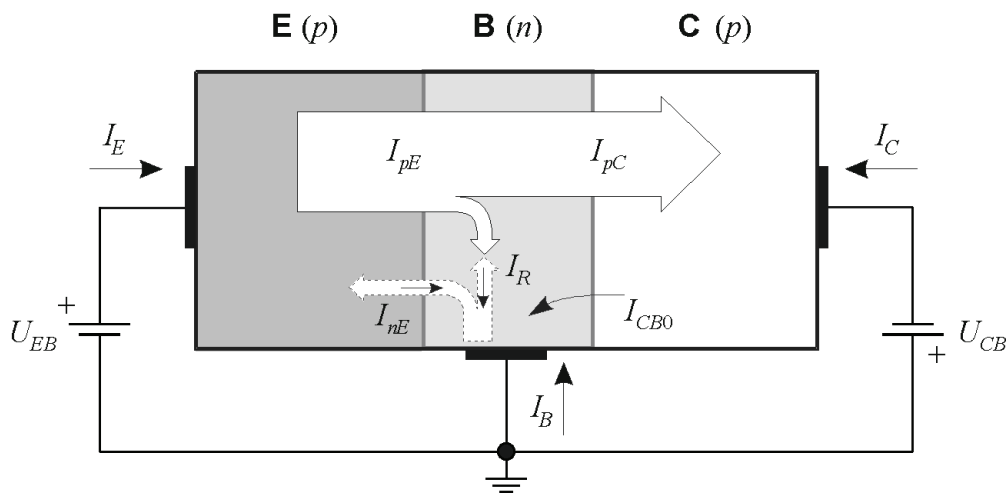
$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} w_B N_{AB}}{D_{nB} w_E N_{DE}}} = \frac{1}{1 + \frac{8 \cdot 1 \cdot 10^{16}}{10 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{17}}} = 0,9868$$

$$\alpha = \gamma \cdot \beta^* = 0,9868 \cdot 0,9978 = 0,9846$$

Uz uski emiter povećava se šupljinska komponenta struje emitera I_{pE} . Zbog toga se smanjuje faktor injekcije γ , a i faktor strujnog pojačanja α .

pnp tranzistor (1)

U odnosu na *npn* tranzistor razlikuje se po predznacima napona i smjerovima struja



struje: $I_E > 0$, $I_B < 0$, $I_C < 0$,
 $I_{CB0} < 0$

$$I_E = I_{pE} + I_{nE}$$

$$I_C = -I_{pC} + I_{CB0}$$

$$I_B = -I_{nE} - I_R - I_{CB0}$$

$$I_R = I_{pE} - I_{pC}$$

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_{pE} + I_{nE}} = \frac{I_{pE}}{I_E}$$

$$\beta^* = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{pE}}$$

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

pnp tranzistor (2)

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{nE} w_B N_{DB}}{D_{pB} L_{nE} N_{AE}}}$$

$$\beta^* \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_B}{L_{pB}} \right)^2$$

$$Q_{pB} \approx q S \frac{p_{B0} w_B}{2}$$

$$I_{pE} \approx q S D_{pB} \frac{p_{B0}}{w_B}$$

$$I_R = I_{pE} - I_{pC} = I_{pE} (1 - \beta^*) = q S \frac{p_{B0} w_B}{2 \tau_{pB}}$$

$$\frac{Q_{pB}}{I_{pE}} = \frac{w_B^2}{2 D_{pB}} = t_{tr}$$

$$\frac{Q_{pB}}{I_R} = \tau_{pB}$$

Primjer 7.4

Bipolarni *pnp* tranzistor radi u normalnom aktivnom području sa strujom emitera od 10 mA. Faktor injekcije je 0,99, a transportni faktor baze 0,998. Izračunati sve komponente struja, te struje baze i kolektora. Zanemariti struju I_{CB0} .

Rješenje:

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{I_{pE}}{I_E}$$

$$I_{pE} = \gamma I_E = 0,99 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 9,9 \text{ mA}$$

$$I_{nE} = I_E - I_{pE} = (1 - \gamma) I_E = 0,01 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 100 \mu\text{A}$$

$$I_{pC} = \beta^* I_{pE} = 0,998 \cdot 9,9 \cdot 10^{-3} = 9,88 \text{ mA}$$

$$I_R = I_{pE} - I_{pC} = (1 - \beta^*) I_{pE} = 0,002 \cdot 9,9 \cdot 10^{-3} = 19,8 \mu\text{A}$$

$$I_B = -I_{nE} - I_R = -100 \cdot 10^{-6} - 19,8 \cdot 10^{-6} = -120 \mu\text{A}$$

$$I_C = -I_{pC} = -9,88 \text{ mA}$$

Primjer 7.5

Silicijski *pnp* tranzistor radi u normalnom aktivnom području. U nekoj radnoj točki nakrcani naboj manjinskih nosilaca u bazi je 50 pAs , faktor injekcije je $\gamma = 0,995$, vrijeme proleta manjinskih nosilaca kroz bazu je $t_{tr} = 12,5 \text{ ns}$, a njihovo vrijeme života u bazi je $\tau_B = 2 \text{ }\mu\text{s}$. Struja zasićenja $I_{CB0} = 0$. Izračunati sve komponente struja u zadanoj točki.

Rješenje:

$$I_R = \frac{Q_{pB}}{\tau_{pB}} = \frac{50 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ }\mu\text{A} \qquad I_{pE} = \frac{Q_{pB}}{t_{tr}} = \frac{50 \cdot 10^{-12}}{12,5 \cdot 10^{-9}} = 4 \text{ mA}$$

$$I_{pC} = I_{pE} - I_R = 4 \cdot 10^{-3} - 25 \cdot 10^{-6} = 3,975 \text{ mA}$$

$$I_E = \frac{I_{pE}}{\gamma} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,995} = 4,02 \text{ mA}$$

$$I_{nE} = (1 - \gamma)I_E = (1 - 0,995) \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} = 20,1 \text{ }\mu\text{A}$$

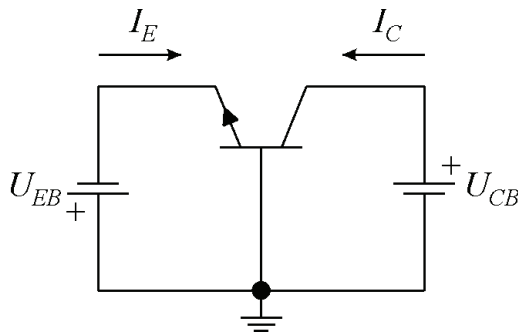
$$I_C = -I_{pC} = -3,975 \text{ mA}$$

$$I_B = -I_E - I_C = -4,02 \cdot 10^{-3} + 3,975 \cdot 10^{-3} = -45 \text{ }\mu\text{A}$$

Spojevi bipolarnog tranzistora

spoj	ulazna priključnica	ulazna struja	ulazni napon	izlazna priključnica	izlazna struja	izlazni napon
zajednička baza	emiter	I_E	U_{EB}	kolektor	I_C	U_{CB}
zajednički emiter	baza	I_B	U_{BE}	kolektor	I_C	U_{CE}
zajednički kolektor	baza	I_B	U_{BC}	emiter	I_E	U_{EC}

Spoj zajedničke baze



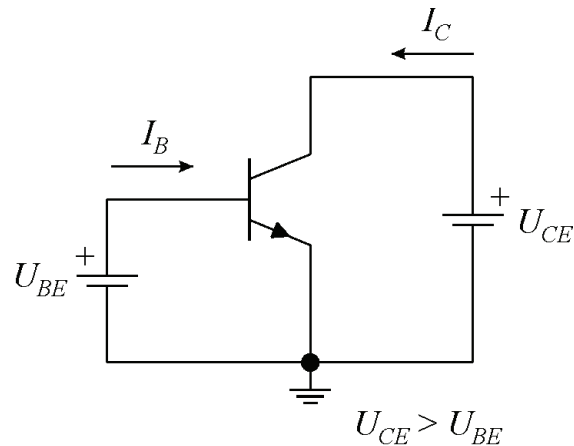
$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

uz zanemarenje struje I_{CB0}

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E}$$

Faktor α manji je od 1 \rightarrow izlazna struja I_C manja je u uz ulazne struje I_E

Spoj zajedničkog emitera



Polarizacije *pn*-spojeva i odnosi struja emitera I_E , baze I_B i kolektora I_C ostaju isti kao u spoju zajedničke baze

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

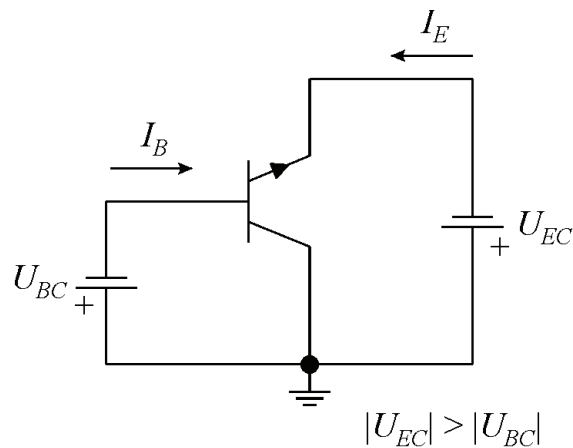
$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha} = \beta I_B + I_{CE0}$$

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

$\beta \equiv$ **statički faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera**
tipični iznosi od 50 do 200

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

Spoj zajedničkog kolektora



$$I_E = -I_C - I_B = -(\beta + 1)I_B - I_{CE0}$$

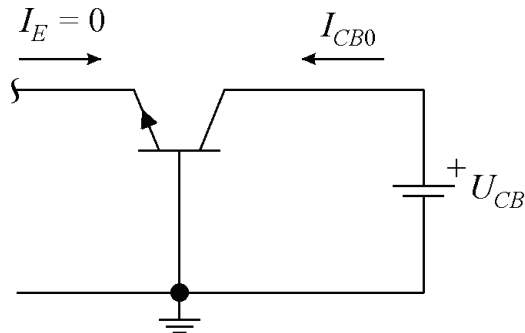
$$\beta + 1 = \frac{-I_E}{I_B}$$

Izlazna struja emitera I_E veća je $\beta + 1$ puta od ulazne struje baze I_B

Struje zasićenja

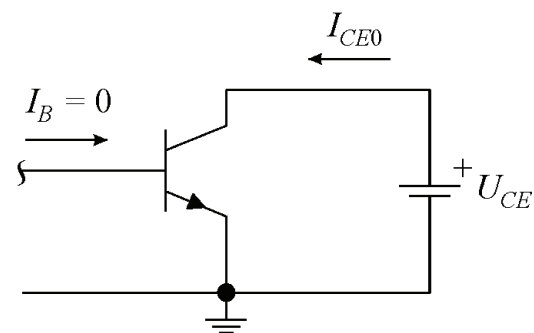
$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

$$I_{CB0} = I_C \quad \text{uz} \quad I_E = 0$$



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

$$I_{CE0} = I_C \quad \text{uz} \quad I_B = 0$$



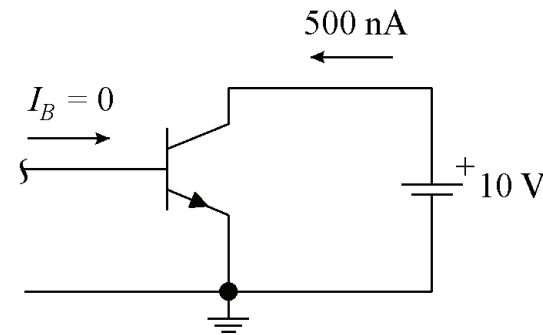
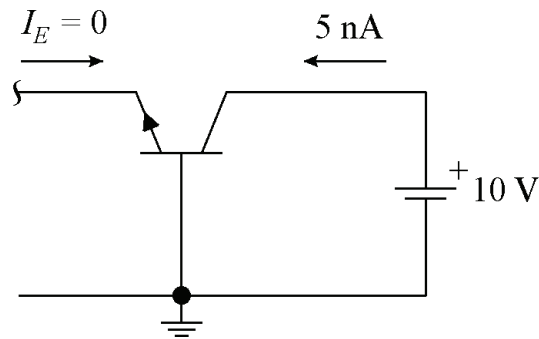
$I_{CB0} \equiv$ struja zasićenja spoja kolektor-baza uz odspojeni emiter

$I_{CE0} \equiv$ struja zasićenja spoja kolektor-baza uz odspojenu bazu

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

Primjer 7.6

Koliki je faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera za tranzistor na slici?



Rješenje:

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0} \quad I_E = 0 \rightarrow I_C = I_{CB0} = 5 \text{ nA}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad I_B = 0 \rightarrow I_C = I_{CE0} = 500 \text{ nA}$$

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

$$\beta = \frac{I_{CE0}}{I_{CB0}} - 1 = \frac{500}{5} - 1 = 99$$

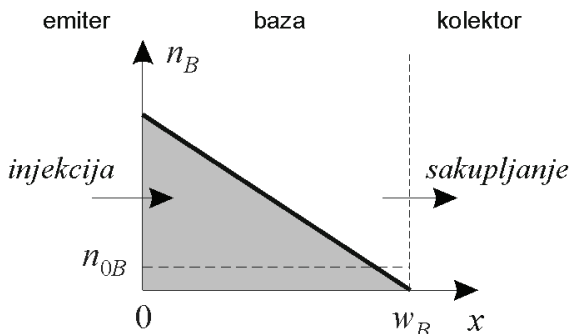
Područja rada bipolarnog tranzistora

Područja rada:

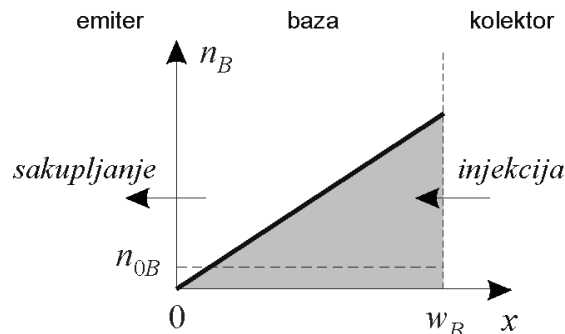
- ❑ normalno aktivno područje (engl. active region),
- ❑ inverzno aktivno područje (engl. reverse active region),
- ❑ područje zasićenja (engl. saturation region) i
- ❑ područje zapiranja (eng. cutoff region)

polarizacije <i>pn-spojeva</i>		emiter-baza	
		propusno	zaporno
kolektor -baza	propusno	<i>zasićenje</i>	<i>inverzno-aktivno</i>
	zaporno	<i>normalno-aktivno</i>	<i>zapiranje</i>

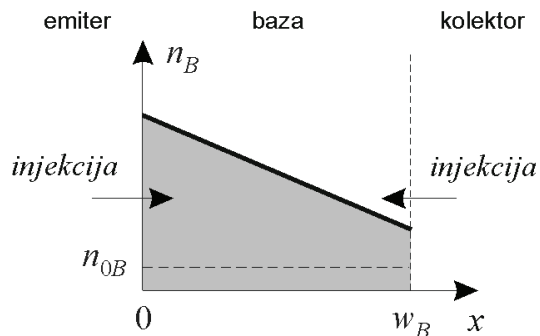
Raspodjele manjinskih elektrona u bazi sa sva područja rada



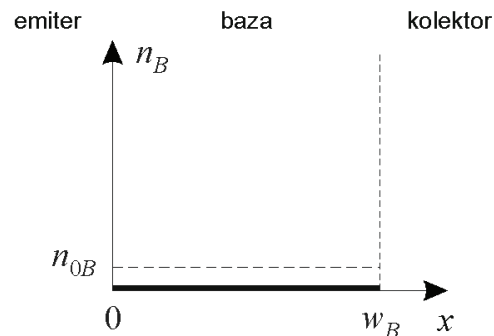
normalno aktivno područje



inverzno aktivno područje



područje zasićenja



područje zapiranja

Normalno aktivno područje

Spoj emiter-baza propusno je polariziran.

Emiter injektira nosioce u bazu.

Manji dio nosioca rekombinira u bazi, a najveći dio preko zaporno polariziranog spoja kolektor-baza prolazi u kolektor.

Struja kolektora ovisi o struji emitera, odnosno o naponu propusno polariziranog spoja emiter-baza, dok je ovisnost o naponu zaporno polariziranog spoja kolektor-baza zanemariva.

S kolektorskog priključka tranzistor se ponaša kao idealni strujni izvor upravljani ulaznom strujom.

U normalnom aktivnom području tranzistor posjeduje svojstvo pojačanja i koristi se u pojačalima.

Inverzno aktivno područje

Normalno aktivno područje uz zamjenu uloga emitera i kolektora.

Propusno polarizirani spoj kolektor-baza injektira nosioce u bazu, a emiter sakuplja dio manjinskih nosilaca iz baze.

U inverznom aktivnom području tranzistor se ponaša kvalitativno isto kao i u normalnom aktivnom području.

$$\alpha_I = \frac{I_E}{-I_C} \quad \beta_I = \frac{I_E}{I_B} = \frac{\alpha_I}{1 - \alpha_I}$$

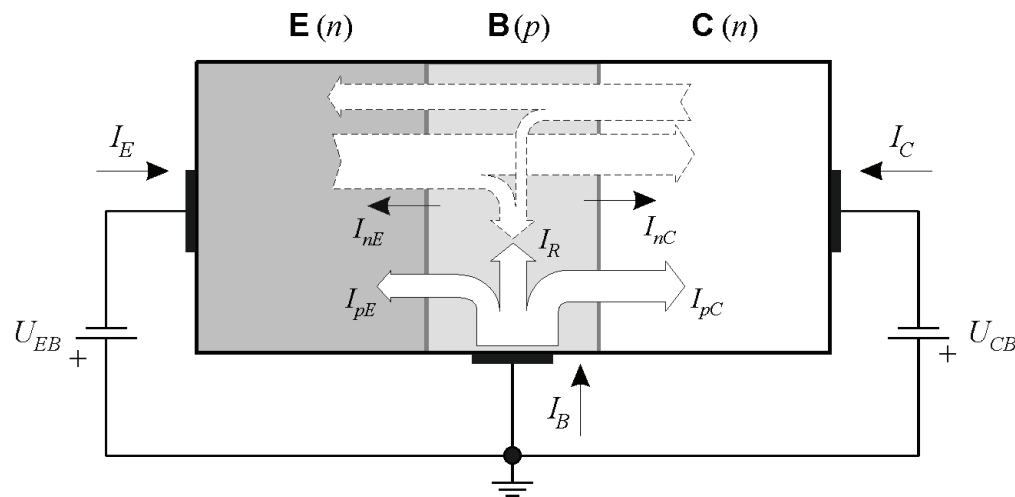
Tranzistor nije simetričan → faktori pojačanja α_I i β_I su loši; β_I tipično 1 do 10.

Područje zasićenja

Oba pn -spoja propusno su polarizirana i injektiraju elektrone u bazu.

Struja elektrona I_{nE} jednaka je razlici struje elektrona koje emiter injektira u bazu i struje elektrona koji do emitera stižu iz kolektora. Slično je sa strujom I_{nC} .

Rad tranzistora može se opisati kao superpozicija rada u normalnom i inverznom aktivnom području.



Područje zapiranja

U području zapiranja oba pn -spoja tranzistora su zaporno polarizirana.

U tranzistoru teku male struje zasićenja zaporno polariziranih spojeva emiter-baza I_{EB0} i kolektor-baza I_{CB0} .

U područjima zasićenja i zapiranja tranzistor ne pokazuje svojstvo pojačanja.

U području zasićenja naponi u tranzistoru su mali i oba kruga, ulazni i izlazni, imaju mali otpor. U području zapiranja struje su male tranzistora, a otpori su veliki.

Prelaskom iz područja zapiranja u područje zasićenja i obrnuto tranzistor ponaša kao sklopka.

Strujno-naponske karakteristike

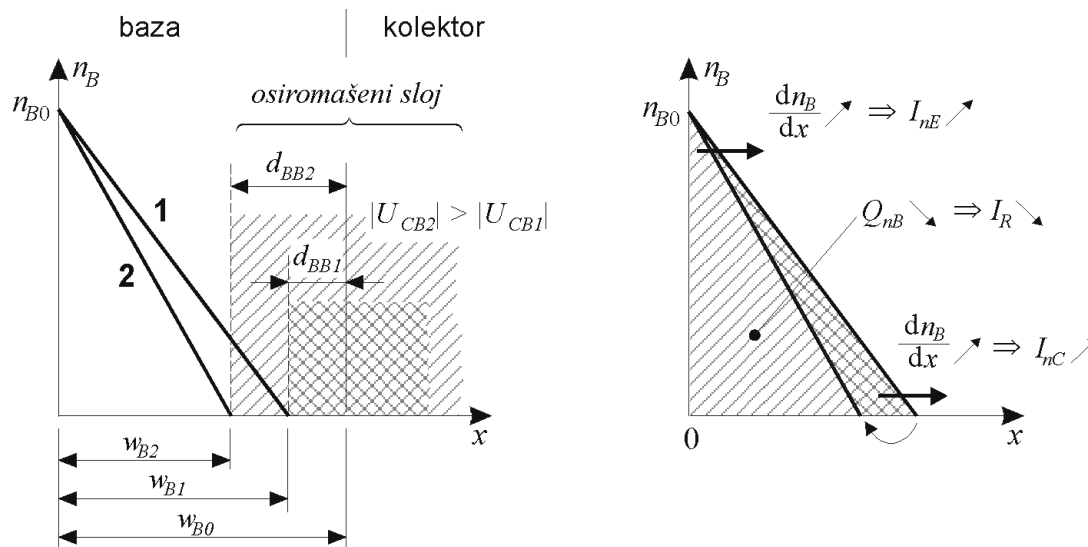
Uz tri priključka na tranzistoru se mogu mjeriti tri struje (I_E , I_B i I_C) i tri napona (U_{BE} , U_{BC} i U_{CE}). Od svih kombinacija najčešće se kao strujno-naponske karakteristike koriste

- ☐ ulazne karakteristike i
- ☐ izlazne karakteristike.

Karakteristike se crtaju za dva spoja

- ☐ spoj zajedničke baze i
- ☐ spoj zajedničkog emitera.

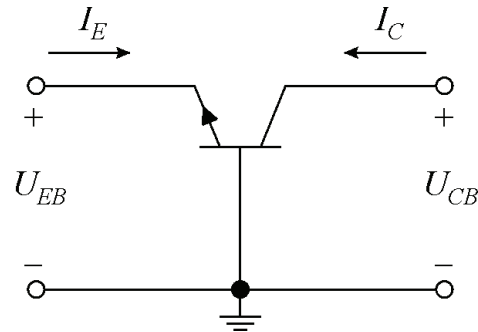
Modulacija širine baze – Earlyjev efekt



Porastom napona zaporne polarizacije spoja kolektor-baza U_{CB} , povećava se i širina osiromašenog sloja i sužava baza.

Uz konstantan napon U_{BE} povećava se gradijent koncentracije elektrona u bazi (rastu struje I_{nE} i I_{nC}) i smanjuje nagomilani naboj (smanjuje se struja I_R)

Spoj zajedničke baze



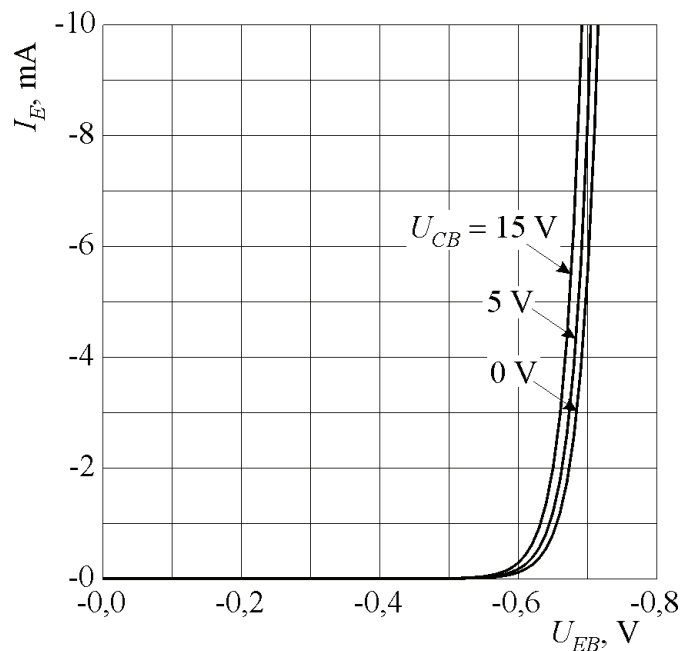
Ulazne karakteristike:

$$I_E = f(U_{EB})_{U_{CB}}$$

Izlazne karakteristike:

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

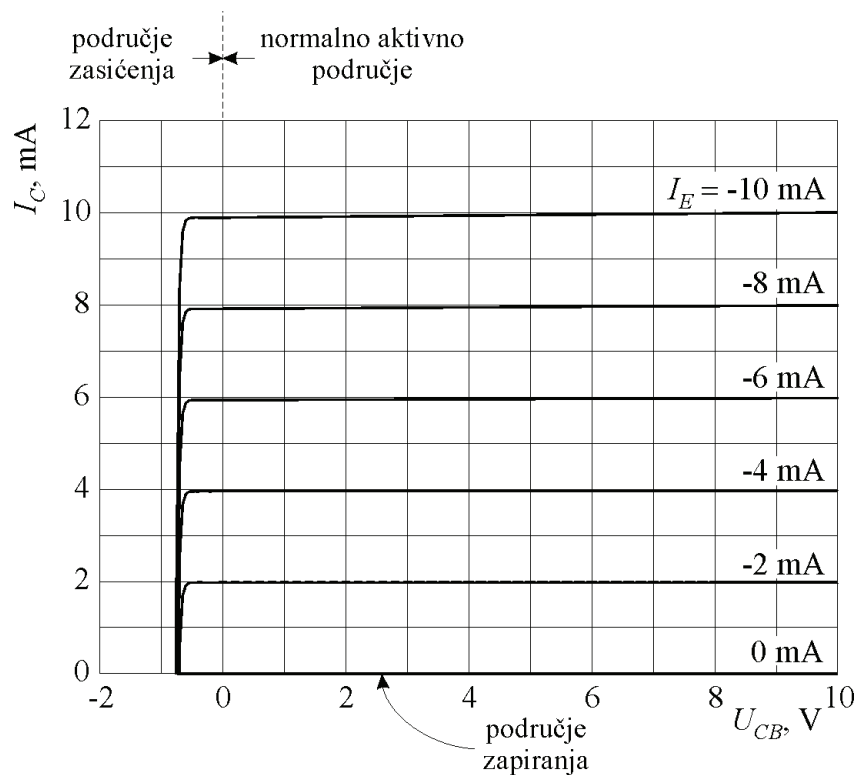
Ulazne karakteristike spoja zajedničke baze



Karakteristike propusno polariziranog spoja emiter-baza

Pomak karakteristika s naponom U_{CB}
→ Earlyjev efekt → uz konstantan U_{EB} struja I_E raste zbog porasta gradijenta nosilaca u bazi

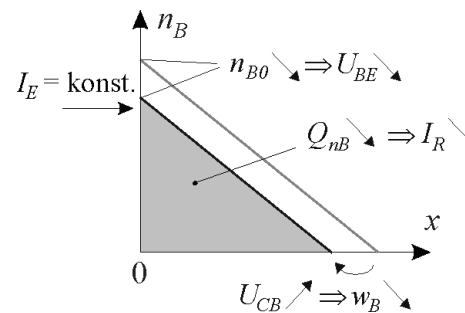
Izlazne karakteristike spoja zajedničke baze



u normalnom aktivnom području

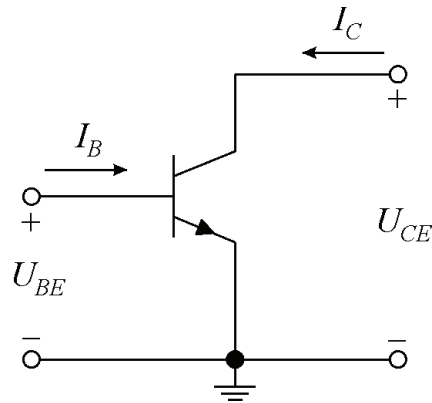
$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

porast struje \rightarrow Earlyjev efekt;
smanjuje se struja I_R i raste struja I_C



granica normalnog aktivnog područja i područja zasićenja $\rightarrow U_{CB} = 0$

Spoj zajedničkog emitera



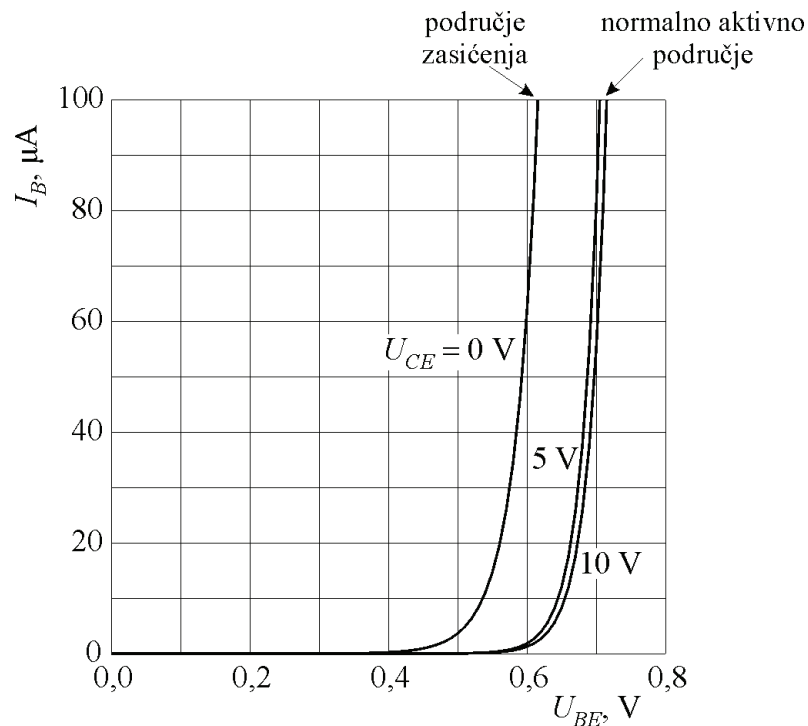
Ulazne karakteristike:

$$I_B = f(U_{BE})_{U_{CE}}$$

Izlazne karakteristike:

$$I_C = f(U_{CE})_{I_B}$$

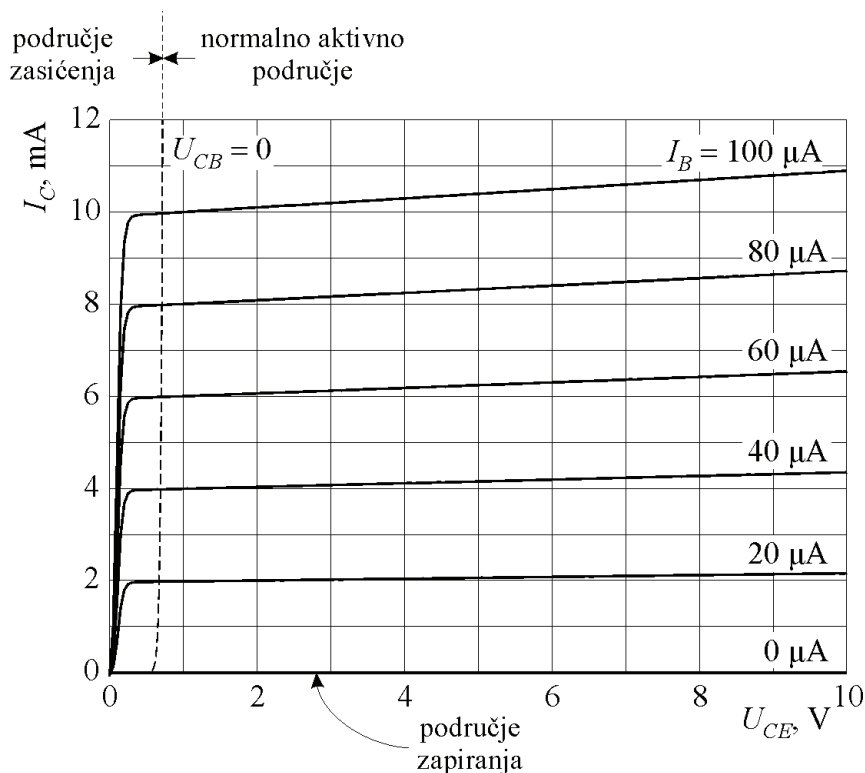
Ulazne karakteristike spoja zajedničkog emitera



Karakteristike propusno polariziranog spoja emiter-baza

Pomak karakteristika s naponom U_{CE}
→ Earlyjev efekt → uz konstantan U_{EB} struja I_B se smanjuje, jer se smanjuje naboj u bazi

Izlazne karakteristike spoja zajedničkog emitera

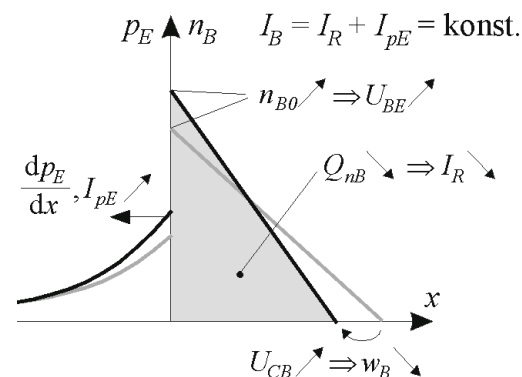


u normalnom aktivnom području

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

porast struje \rightarrow Earlyjev efekt;

povećava se gradijent i raste struja I_C



granica normalnog aktivnog područja i područja zasićenja $\rightarrow U_{CE} = U_{BE}$

Primjer 7.7 (1)

Bipolarni *npn* tranzistor ima faktor strujnog pojačanja $\alpha = 0,99$ i struju zasićenja spoja kolektor-baza $I_{CB0} = 1 \text{ nA}$. Tranzistor radi u normalnom aktivnom području sa strujom baze $I_B = 100 \text{ }\mu\text{A}$. Napon između kolektora i baze je 5 V. Nacrtati izlaznu karakteristiku i označiti radnu točku ako tranzistor radi:

- a) u spoju zajedničke baze,
- b) u spoju zajedničkog emitera.

Rješenje:

$$I_E + I_B + I_C = 0$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,99}{1 - 0,99} = 99$$

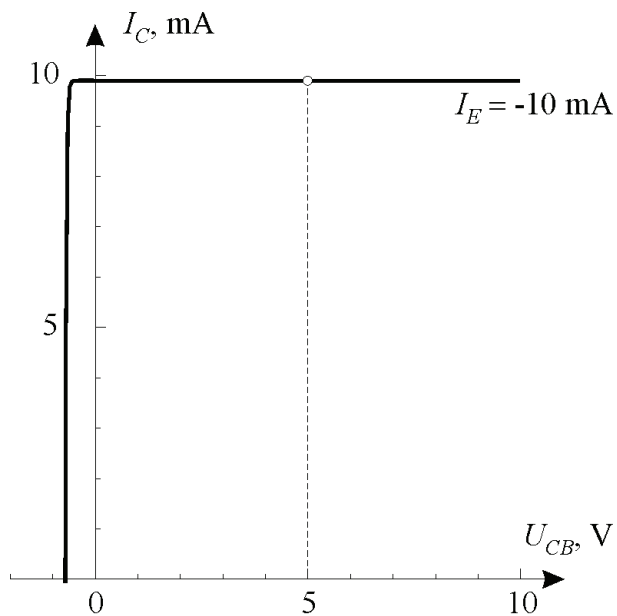
$$I_{CE0} = (1 + \beta)I_{CB0} = 99 \cdot 10^{-9} = 99 \text{ nA}$$

Primjer 7.7 (2)

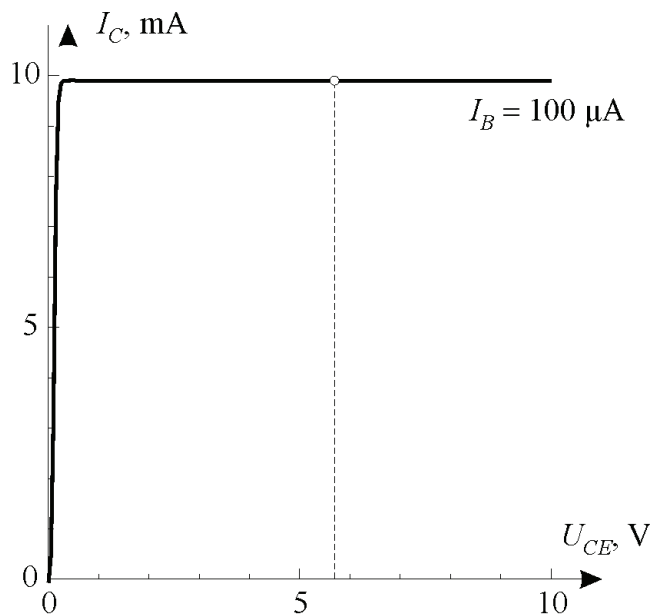
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} = 99 \cdot 100 \cdot 10^{-6} + 99 \cdot 10^{-9} = 9,9 \text{ mA}$$

$$I_E = -I_B - I_C = -100 \cdot 10^{-6} - 9,9 \cdot 10^{-3} = -10 \text{ mA}$$

Uz napon $U_{CB} = 5 \text{ V} \rightarrow U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} = 5 + 0,7 = 5,7 \text{ V}$

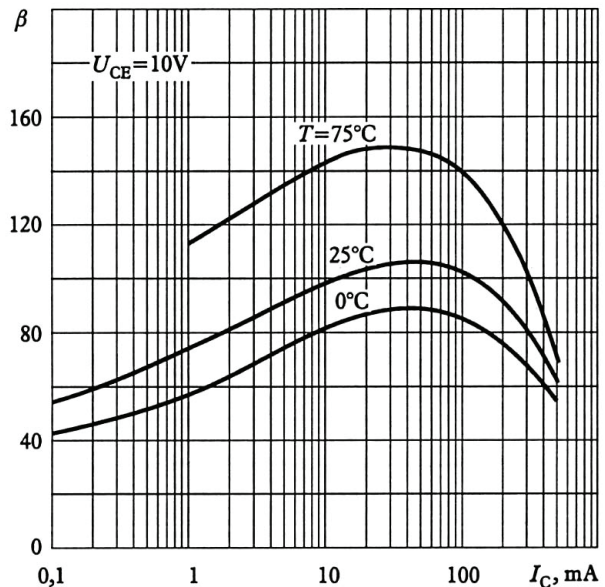


a)



b)

Faktor strujnog pojačanja



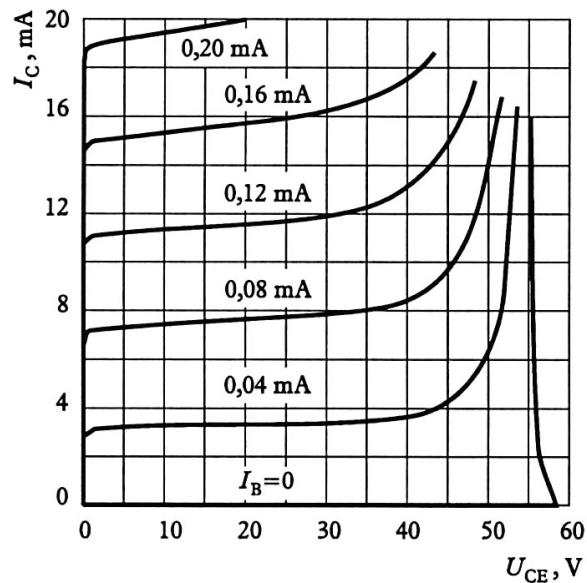
$$\beta = f(I_C)$$

- ❑ pad pri malim strujama → rekombinacija u osiromašenom sloju spoja emiter-baza
- ❑ pad pri većim strujama → visoka injekcija

β raste s temperaturom → posljedica: porast struje kolektora I_C i disipacije snage

$$P_T = I_C U_{CE}$$

Proboj



lavinski proboj zaporno polariziranog spoja
kolektor-baza

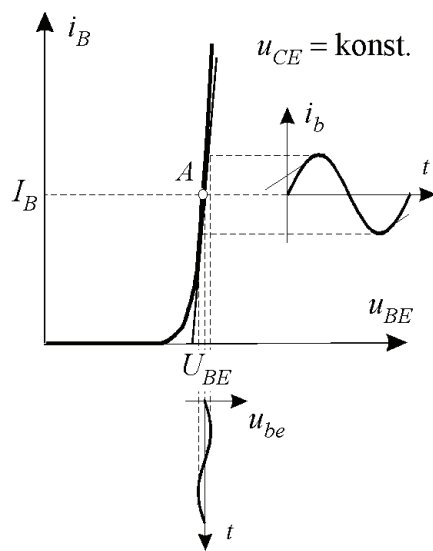
proboj kolektor-emiter

$$U_{CE(PR)} = \frac{U_{CB(PR)}}{\sqrt[n]{\beta}}$$

Dinamički otpori – definicija i očitavanje iz karakteristika

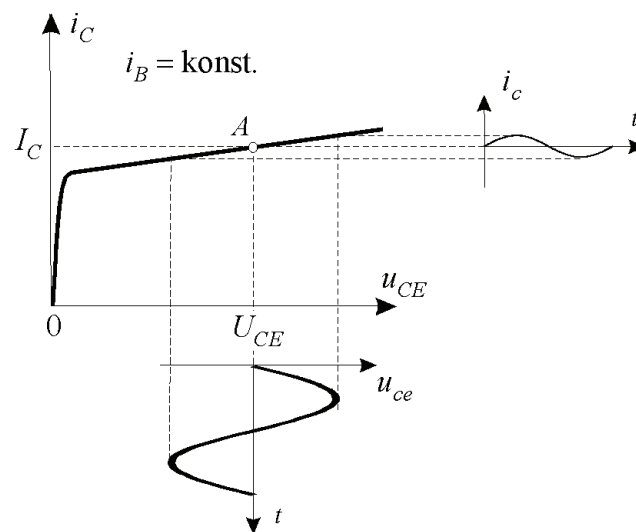
ulazni dinamički otpor

$$r_{be} = \left. \frac{du_{BE}}{di_B} \right|_{u_{CE} = \text{konst}} = \left. \frac{u_{be}}{i_b} \right|_{u_{ce} = 0}$$



izlazni dinamički otpor

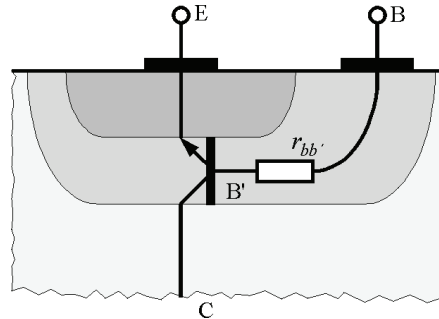
$$r_{ce} = \left. \frac{du_{CE}}{di_C} \right|_{i_B = \text{konst}} = \left. \frac{u_{ce}}{i_c} \right|_{i_b = 0}$$



Ulazni dinamički otpor

ukupni otpor $r_{be} \rightarrow r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$

□ serijski otpor baze $r_{bb'} \rightarrow$



□ dinamički otpor spoja emiter-baza $r_{b'e}$

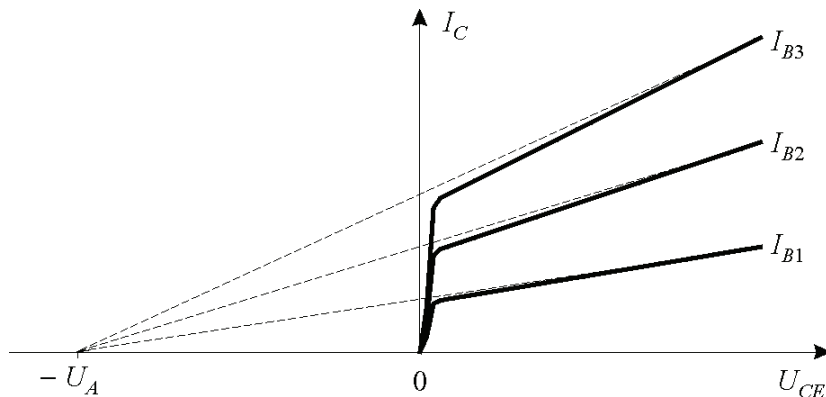
$$i_B = i_{PE} + i_R = q S D_{pE} \frac{p_{0E}}{L_{pE}} \exp\left(\frac{u_{B'E}}{U_T}\right) + q S \frac{w_B n_{0B}}{2 \tau_{nB}} \exp\left(\frac{u_{B'E}}{U_T}\right)$$

$$\frac{1}{r_{b'e}} = \frac{di_B}{du_{B'E}} = \frac{i_B}{U_T}$$

u radnoj točki: $r_{b'e} = \frac{U_T}{I_B}$

Izlazni dinamički otpor

model nagiba izlaznih karakteristika u području zasićenja



$U_A \equiv$ Earlyjev napon

$$i_C = \beta i_B \left(1 + \frac{u_{CE}}{U_A} \right)$$

$$\frac{1}{r_{ce}} = \frac{di_C}{du_{CE}} = \frac{i_C}{u_{CE} + U_A}$$

$$r_{ce} = \frac{U_{CE} + U_A}{I_C} \approx \frac{U_A}{I_C}$$

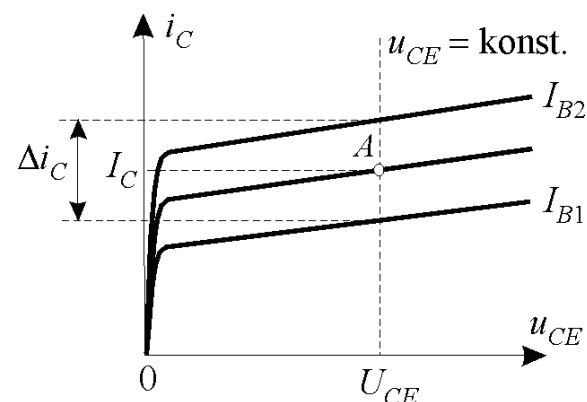
Dinamički faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera

opisuje pojačanje tranzistora

$$h_{fe} = \left. \frac{di_C}{di_B} \right|_{u_{CE} = \text{konst}} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{ce} = 0}$$

$$h_{fe} \approx \beta$$

očitavanje iz izlaznih karakteristika



$$h_{fe} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE} = \text{konst}} = \left. \frac{\Delta i_C}{I_{B2} - I_{B1}} \right|_{u_{CE} = \text{konst}}$$

Strmina bipolarnog tranzistora

drugi parametar koji opisuje pojačanje tranzistora

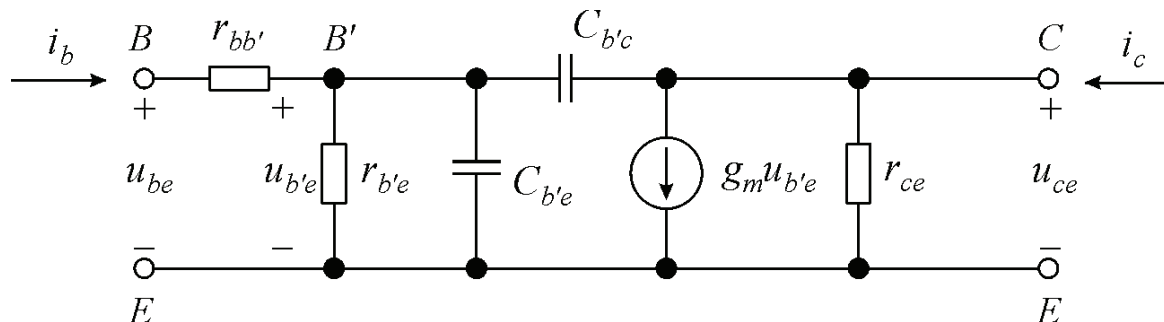
$$g_m = \left. \frac{di_C}{du_{B'E}} \right|_{u_{CE} = \text{konst}} = \left. \frac{i_c}{u_{b'e}} \right|_{u_{ce} = 0}$$

$$g_m = \frac{di_C}{du_{B'E}} = \frac{di_C}{di_B} \frac{di_B}{du_{B'E}} = \frac{h_{fe}}{r_{b'e}}$$

u radnoj točki: $g_m \approx \frac{\beta}{U_T / I_B} = \frac{I_C}{U_T}$

Hibridni π -model

Visokofrekvencijski hibridni π -model

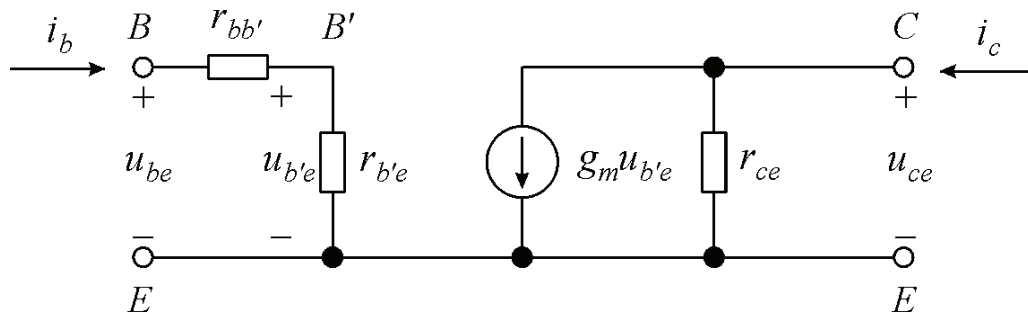


Kapaciteti:

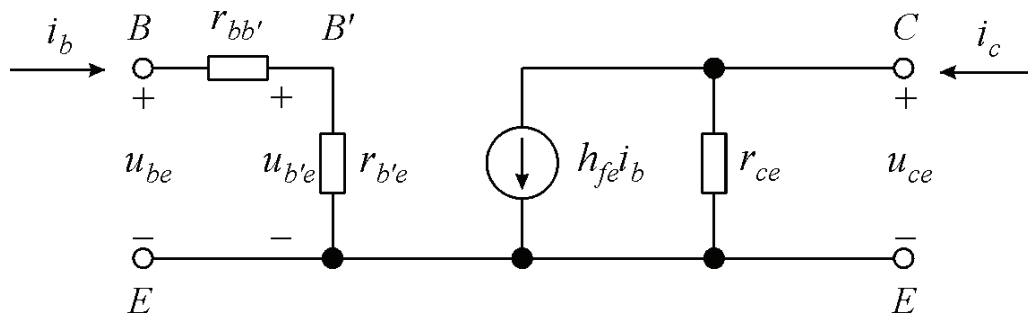
$C_{b'e} \rightarrow$ kapacitet spoja emiter-baza; difuzijski kapacitet

$C_{b'c} \rightarrow$ kapacitet spoja kolektor-baza; kapacitet osiromašenog sloja

Niskofrekvencijski modeli



Model sa strminom g_m



Model s faktorom
strujnog pojačanja h_{fe}

Primjer 7.8 (1)

U izlaznim karakteristikama *npn* tranzistora mjerenjem su očitane vrijednosti u dvije radne točke. U točki *A* dobivene su vrijednosti $I_{BA} = 50 \mu\text{A}$, $I_{CA} = 8 \text{ mA}$ i $U_{CEA} = 5 \text{ V}$, a na istoj izlaznoj karakteristici u točki *B* $I_{CB} = 8,1 \text{ mA}$ i $U_{CEB} = 10 \text{ V}$. Odrediti dinamičke parametre $r_{b'e}$, r_{ce} , h_{fe} i g_m u točki *A*. Koliko je Earlyjev napon U_A tog tranzistora? Temperatura je sobna, $U_T = 25 \text{ mV}$.

Rješenje:

Iz poznatih struja u točki *A* slijedi

$$r_{b'e} = \frac{U_T}{I_{BA}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 500 \Omega$$

$$g_m = \frac{I_{CA}}{U_T} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 320 \text{ mA/V}$$

$$h_{fe} = g_m r_{b'e} = 320 \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 160$$

Primjer 7.8 (2)

Faktor β u točki A je

$$\beta = \frac{I_{CA}}{I_{BA}} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 160$$

Izlazni otpor r_{ce} i Earlyjev napon U_A su

$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} \right|_{i_B = \text{konst}} = \frac{U_{CEB} - U_{CEA}}{I_{CB} - I_{CA}} = \frac{10 - 5}{(8,1 - 8) \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{U_{CEA} + U_A}{I_{CA}} = \frac{U_{CEB} + U_A}{I_{CB}}$$

$$U_A = \frac{I_{CA} U_{CB} - I_{CB} U_{CA}}{I_{CB} - I_{CA}} = \frac{8 \cdot 10 - 8,1 \cdot 5}{8,1 - 8} = 395 \text{ V}$$