

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

# **Elektronika 1**

Ž. Butković, J. Divković Pukšec, A. Barić

## **7. Bipolarni tranzistori**

# Bipolarni tranzistor

---

## Aktivni element s tri priključka

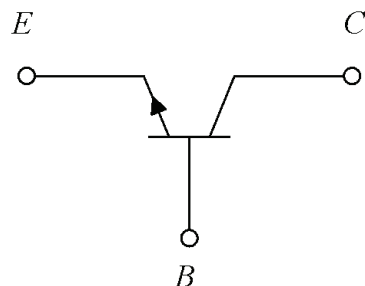
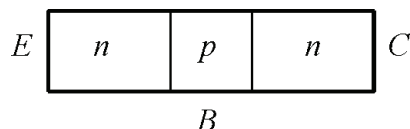
- ❑ ulazni, izlazni i zajednički priključak
- ❑ pobuda u ulaznom krugu upravlja signalom u izlaznom krugu
- ❑ naziv bipolarni – rad se temelji na vođenju struje obaju tipova nosilaca (engl. Bipolar Junction Transistor – BJT)
- ❑ primjena: pojačalo, sklopka

# Shematski prikaz i električni simbol

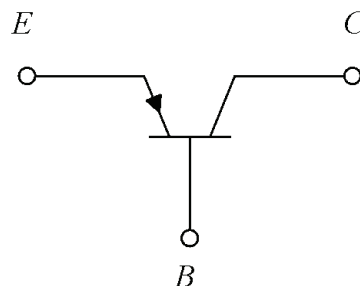
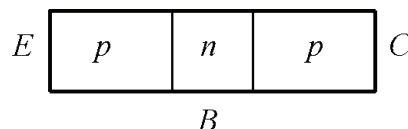
Troslojna struktura

Dva tipa

*n*p*n*



*p*n*p*



Priključci

☐ **emiter** – E

☐ **baza** – B

☐ **kolektor** – C

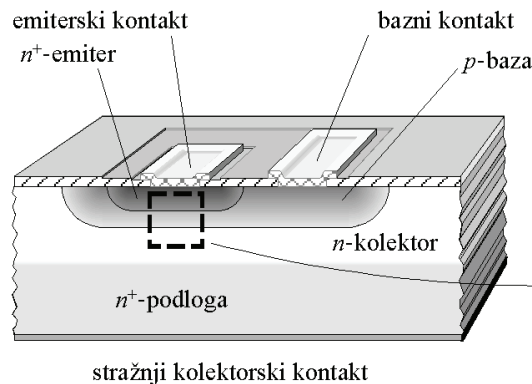
Dva pn-spoja

☐ **emiter-baza**

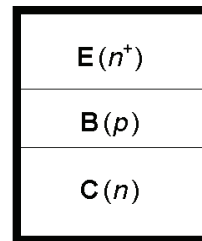
☐ **kolektor-baza**

# Struktura

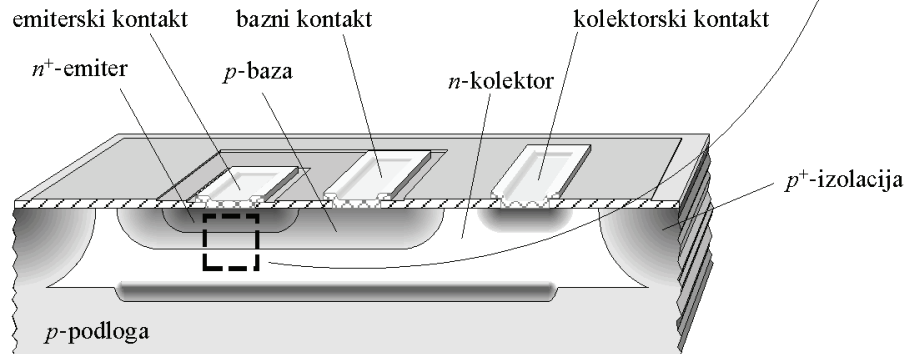
diskretni tranzistor



intrinzični tranzistor



integrirani tranzistor



u kolektoru - dva sloja

❑  $p$ -baza

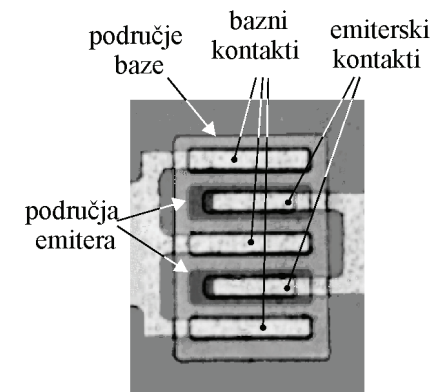
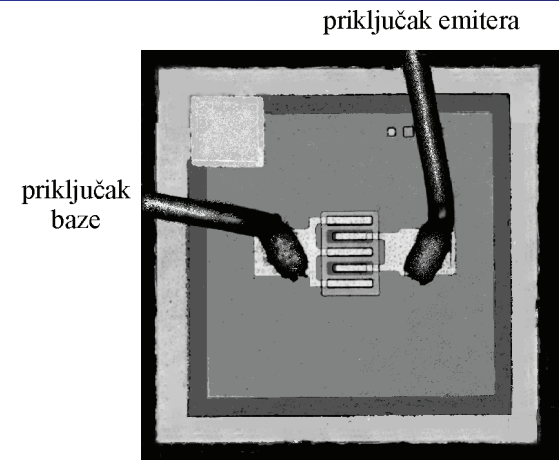
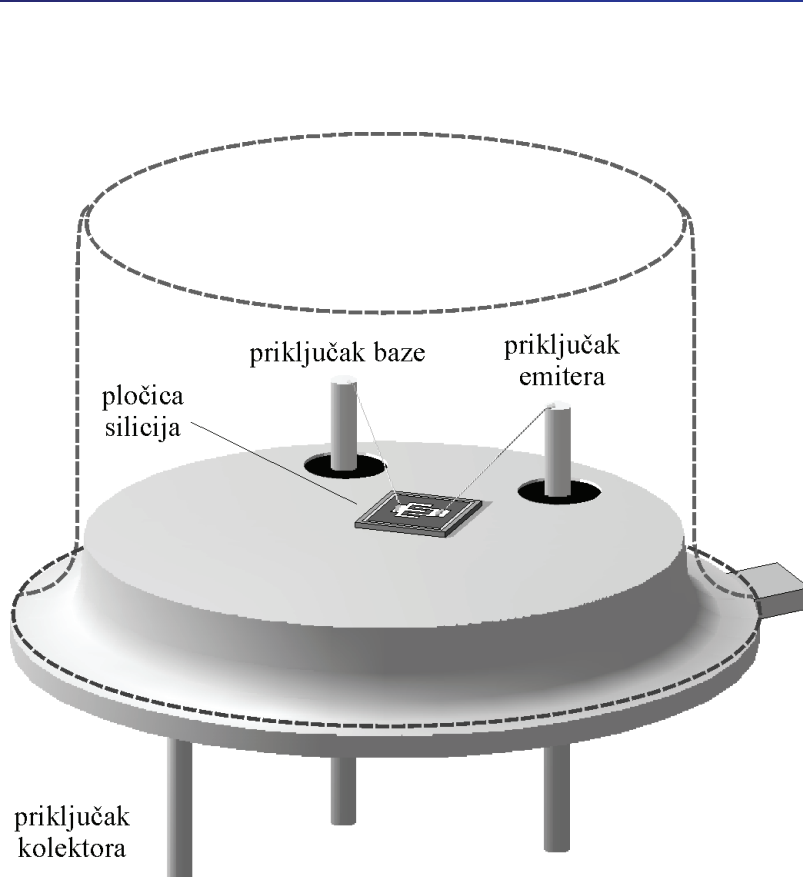
❑  $n^+$ -emiter

diskretni tranzistor –  
podloga je područje  
kolektora

integrirani tranzistor – u  
zajedničkoj podlozi  
za sve elemente

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

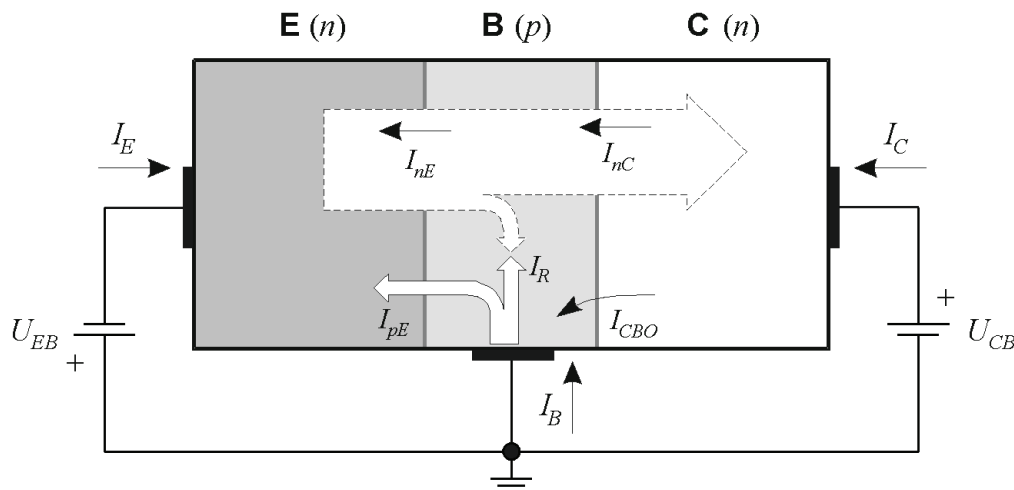
# Izgled diskretnog tranzistora



# Opis rada

Polarizacija *pn*-spojeva:

emiter-baza → propusno,  
kolektor-baza → zaporno →  
**normalno aktivno područje**



komponente struja:

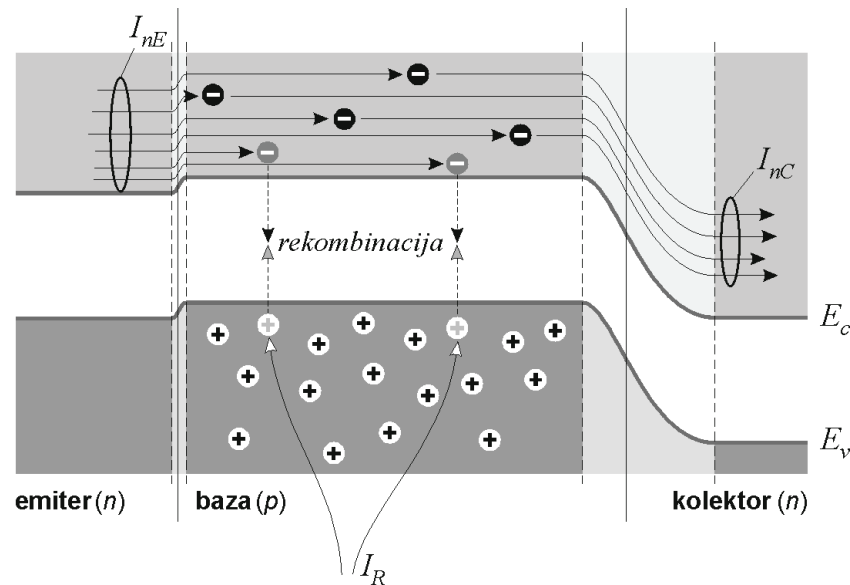
injekcija preko spoja emiter-  
baza → struje  $I_{nE}$  i  $I_{pE}$

rekombinacija elektrona u bazi  
→ struja  $I_R$

prolaz elektrona kroz spoj  
kolektor-baza →  $I_{nE}$

struja zasićenja spoja  
kolektor-baza →  $I_{CB0}$

# Energetski dijagram

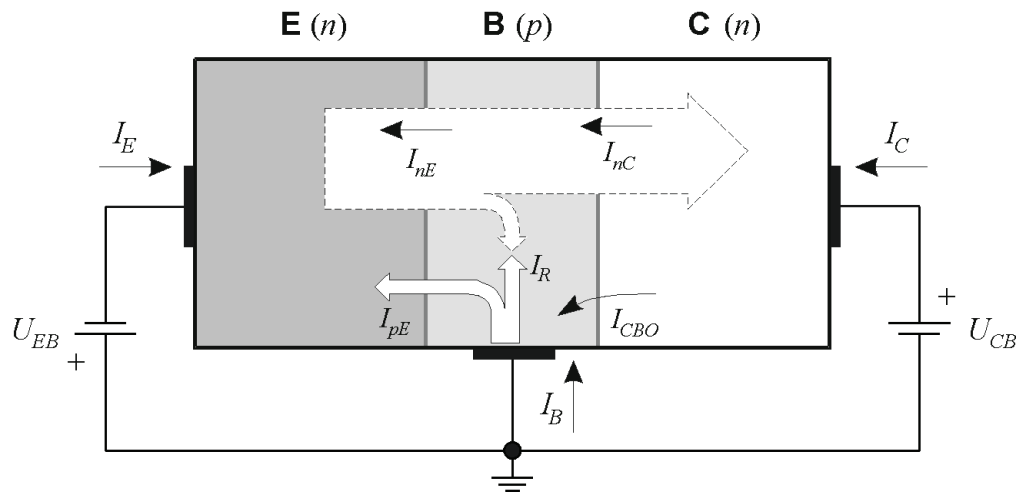


U bazi elektroni su manjinski nosioci

Dio elektrona u bazi rekombinira sa šupljinama

Veći dio prelazi spoj kolektor-baza → za manjinske elektrone ne postoji energetska barijera tog spoja

# 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 emitorske 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  $I_{CB0}$

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

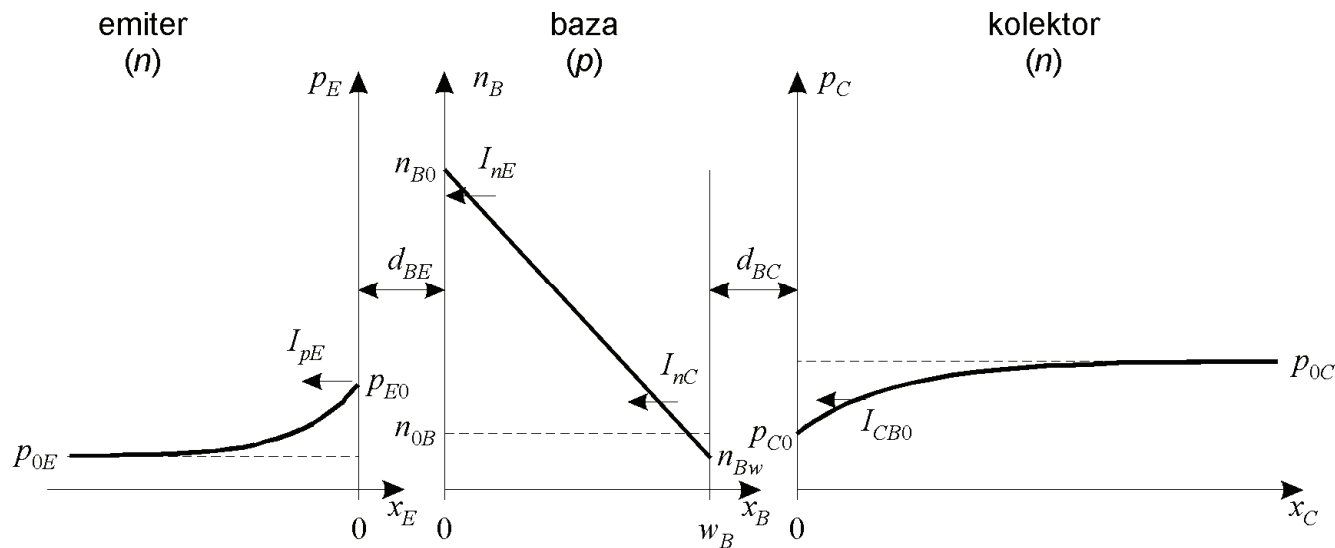
$\alpha \equiv$  **statički faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze**  
tipični iznosi od 0,98 do 0,995

# 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  $\alpha$ .

# 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

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

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

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

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

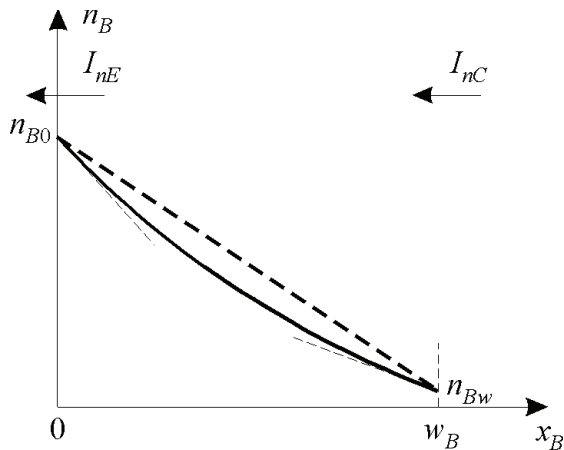
$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + I_{pE} / I_{nE}} = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} w_B N_{AB}}{D_{nB} L_{pE} N_{DE}}}$$

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

Faktor  $\gamma$  biti će to bliži jedinici što je emiter jače dopiran od baze.

# Transportni faktor baze

Odstupanje raspodjele manjinskih elektrona u bazi od linearne aproksimacije



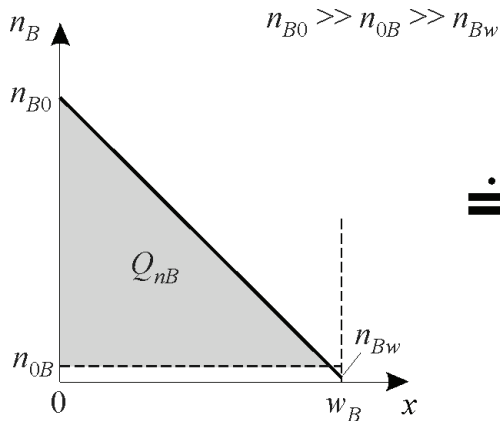
Za  $w_B \ll L_{nB}$

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

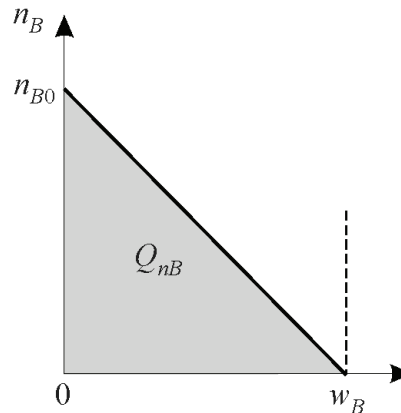
$w_B$  - efektivna širina baze

Faktor  $\beta^*$  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

Silicijski *npn* tranzistor ima homogene 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  $1 \text{ mm}^2$ , 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  $U_{CB} = 0$ .



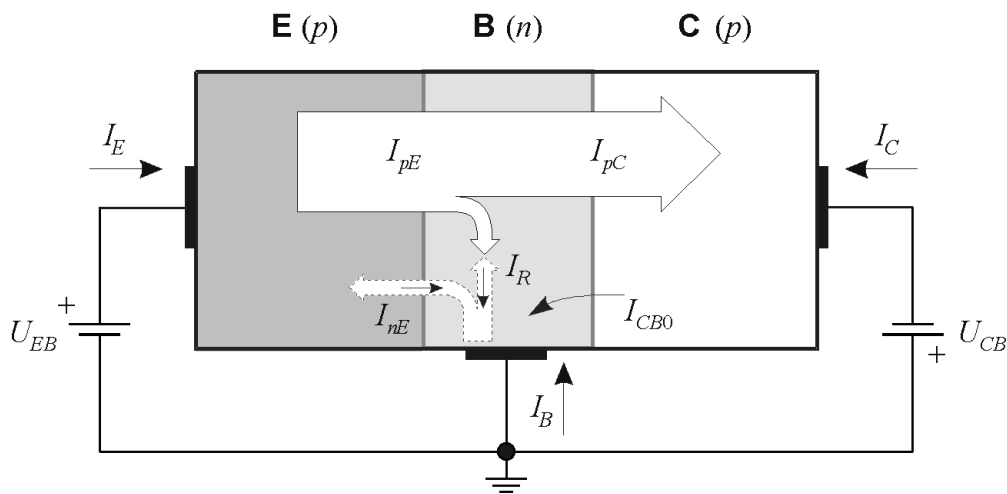
## Primjer 7.3

---

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

# 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  $I_{CB0}$ .

## Primjer 7.5

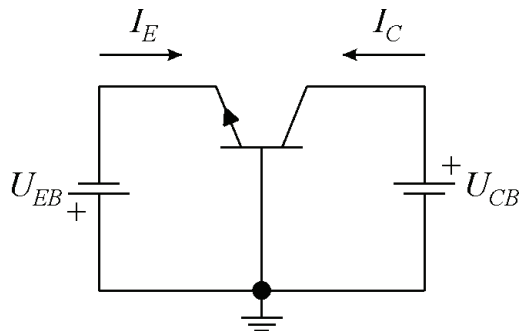
---

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  $t_{tr} = 12,5$  ns, a njihovo vrijeme života u bazi je  $\tau_B = 2$   $\mu$ s. Struja zasićenja  $I_{CB0} = 0$ . Izračunati sve komponente struja u zadanoj točki.

# 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



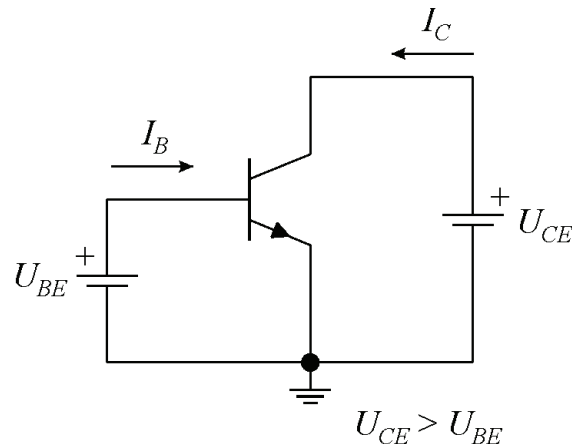
$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

uz zanemarenje struje  $I_{CB0}$

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

Faktor  $\alpha$  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

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

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

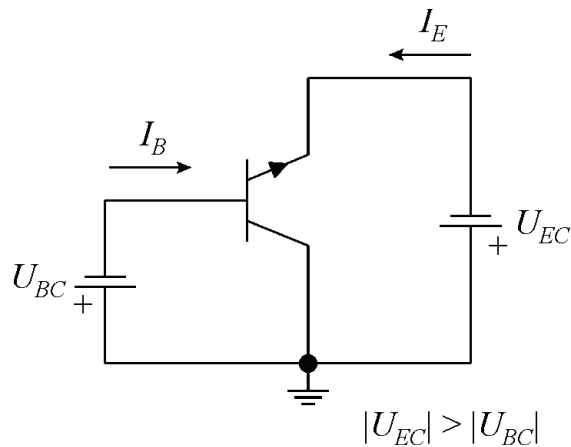
$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

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

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



# Spoj zajedničkog kolektora



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

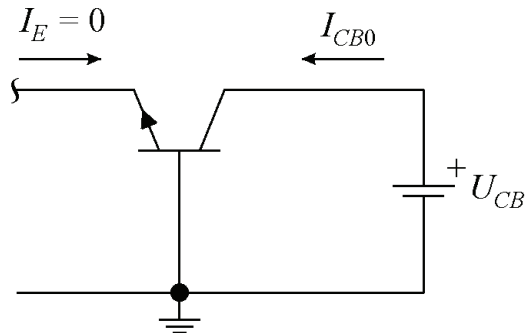
$$\beta + 1 = \frac{-I_E}{I_B}$$

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

# Struje zasićenja

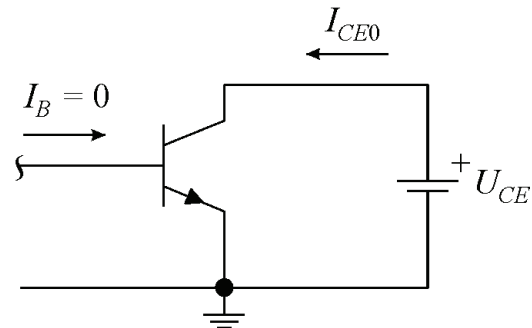
$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

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



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

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



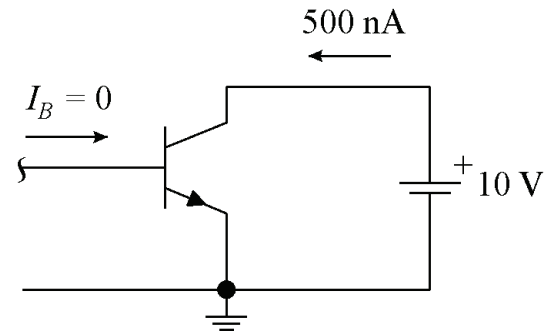
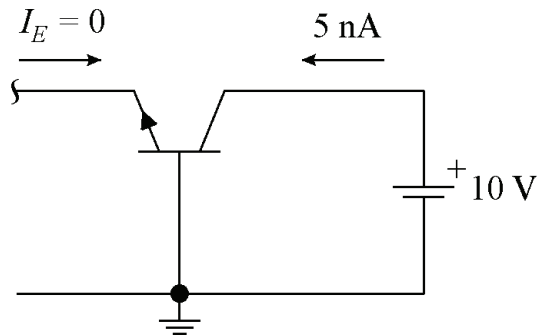
$I_{CB0} \equiv$  struja zasićenja spoja kolektor-baza uz odspojeni emiter

$I_{CE0} \equiv$  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?



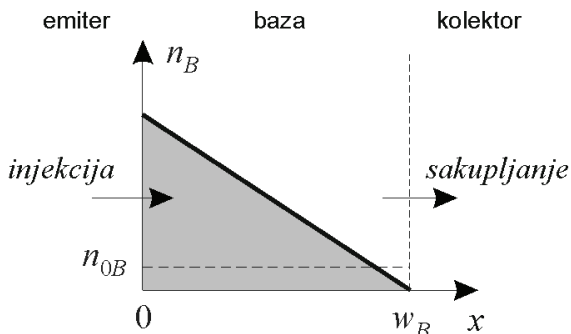
# Područja rada bipolarnog tranzistora

Područja rada:

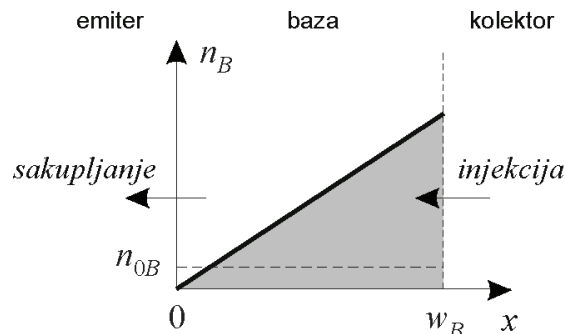
- ❑ normalno aktivno područje (engl. active region),
- ❑ inverzno aktivno područje (engl. reverse active region),
- ❑ područje zasićenja (engl. saturation region) i
- ❑ područje zapiranja (eng. cutoff region)

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>

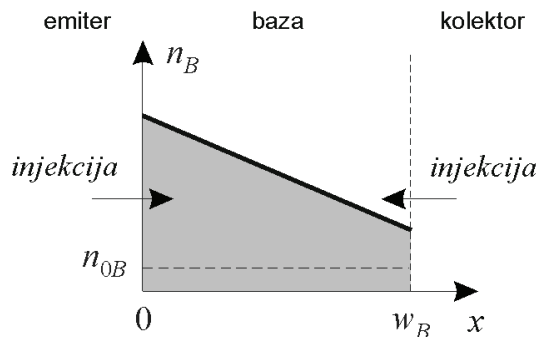
# Raspodjele manjinskih elektrona u bazi sa sva područja rada



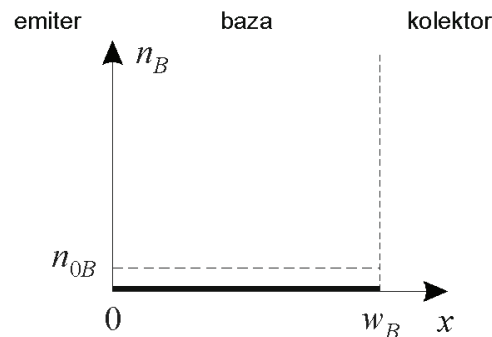
normalno aktivno područje



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.

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

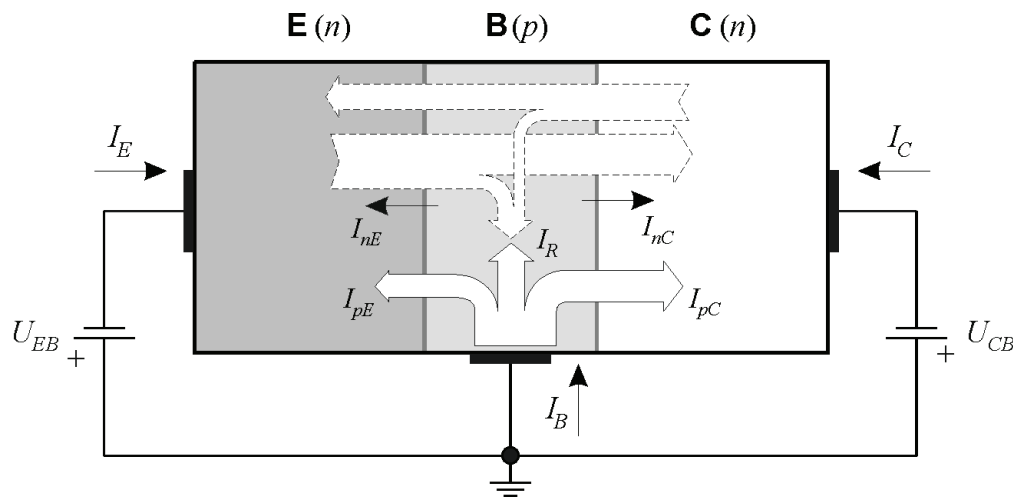
Tranzistor nije simetričan → faktori pojačanja  $\alpha_I$  i  $\beta_I$  su loši;  $\beta_I$  tipično 1 do 10.

# 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

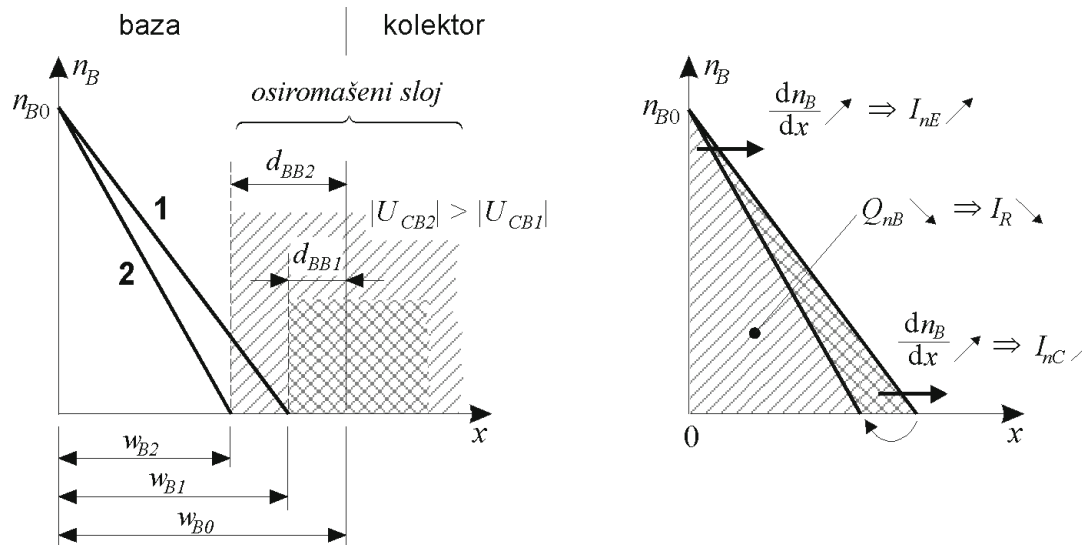
Uz tri priključka na tranzistoru se mogu mjeriti tri struje ( $I_E$ ,  $I_B$  i  $I_C$ ) i tri napona ( $U_{BE}$ ,  $U_{BC}$  i  $U_{CE}$ ). Od svih kombinacija najčešće se kao strujno-naponske karakteristike koriste

- ☐ ulazne karakteristike i
- ☐ izlazne karakteristike.

Karakteristike se crtaju za dva spoja

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

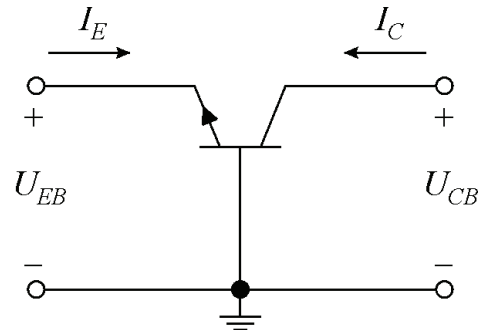
# Modulacija širine baze – Earlyjev efekt



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



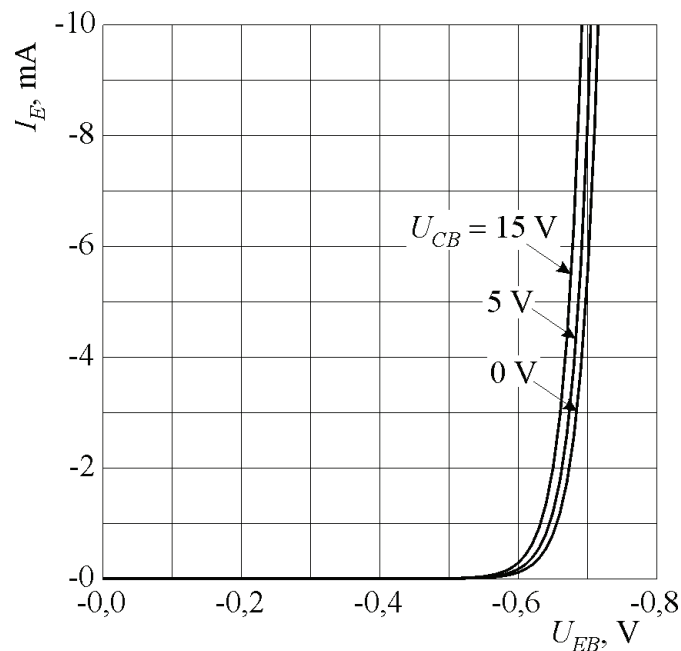
Ulazne karakteristike:

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

Izlazne karakteristike:

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

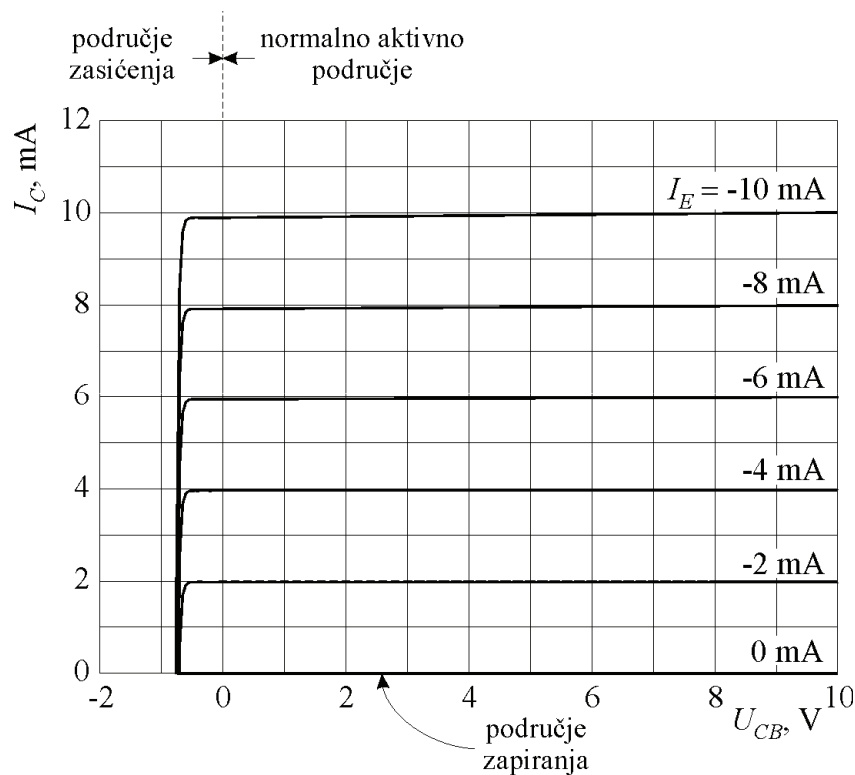
# Ulazne karakteristike spoja zajedničke baze



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

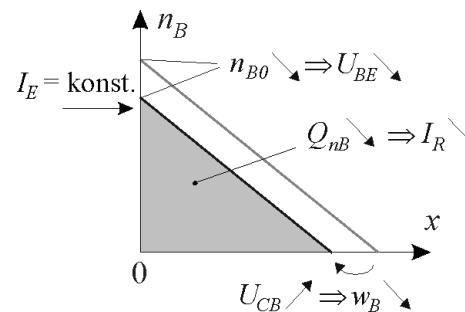
# Izlazne karakteristike spoja zajedničke baze



u normalnom aktivnom području

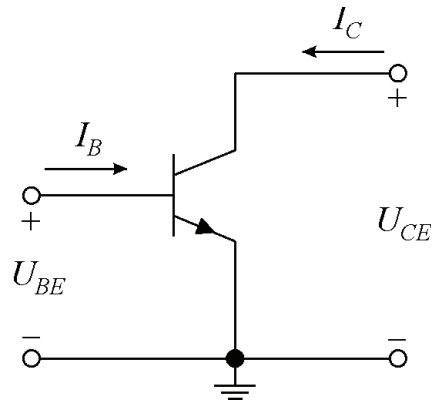
$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

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



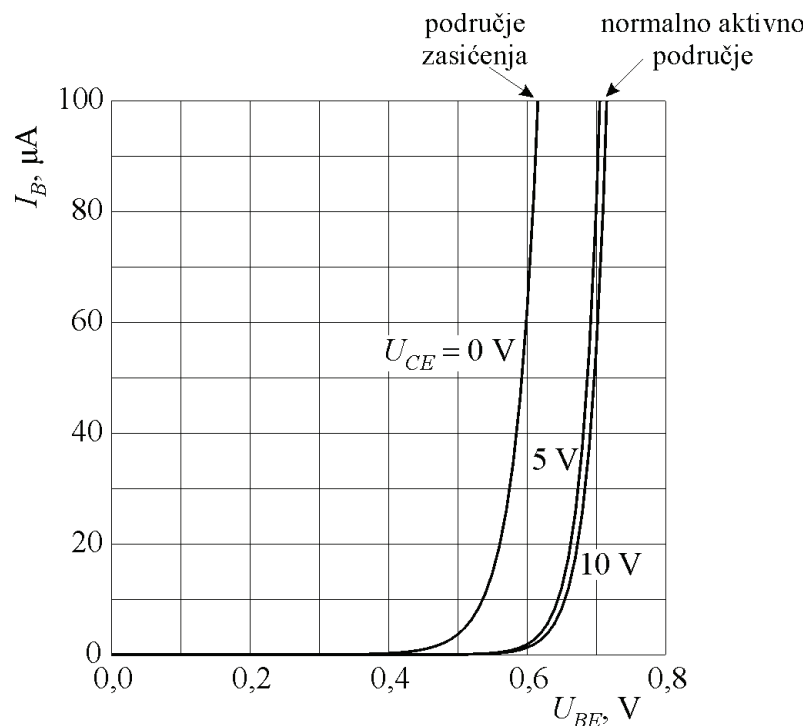
Ulazne karakteristike:

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

Izlazne karakteristike:

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

# Ulazne karakteristike spoja zajedničkog emitera

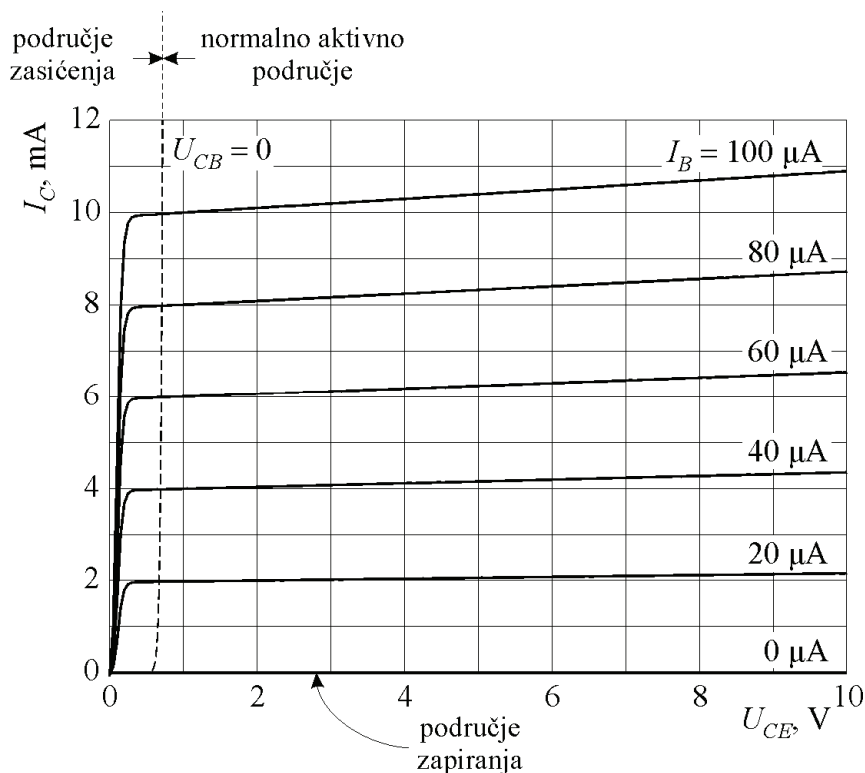


Karakteristike propusno polariziranog spoja emiter-baza

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

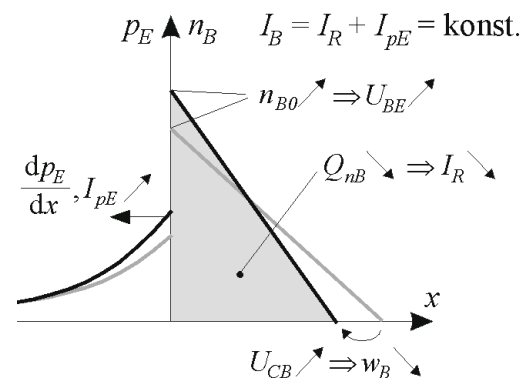


u normalnom aktivnom području

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

porast struje  $\rightarrow$  Earlyjev efekt;

povećava se gradijent i raste struja  $I_C$

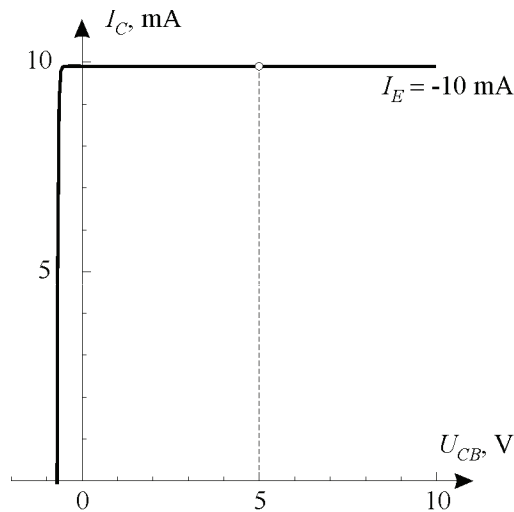


granica normalnog aktivnog područja i područja zasićenja  $\rightarrow U_{CE} = U_{BE}$

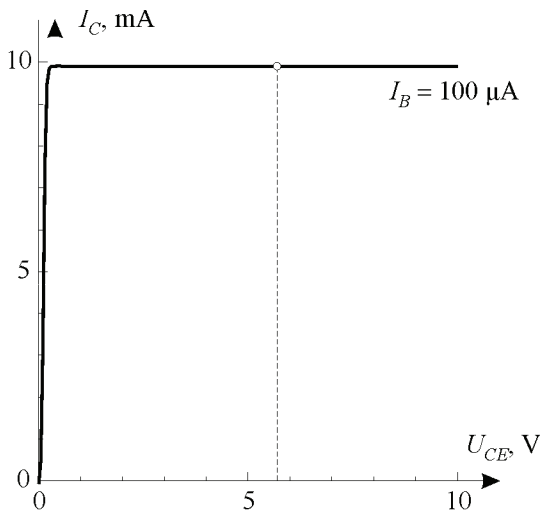
# Primjer 7.7

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  $5 \text{ V}$ . Nacrtati izlaznu karakteristiku i označiti radnu točku ako tranzistor radi:

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

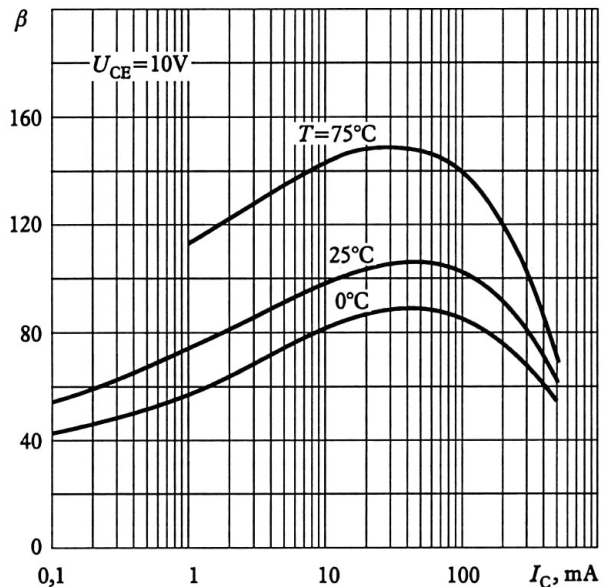


a)



b)

# Faktor strujnog pojačanja



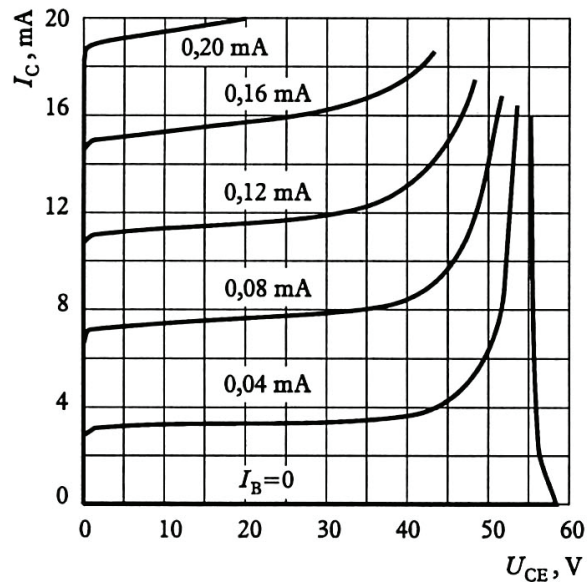
$$\beta = f(I_C)$$

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

$\beta$  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

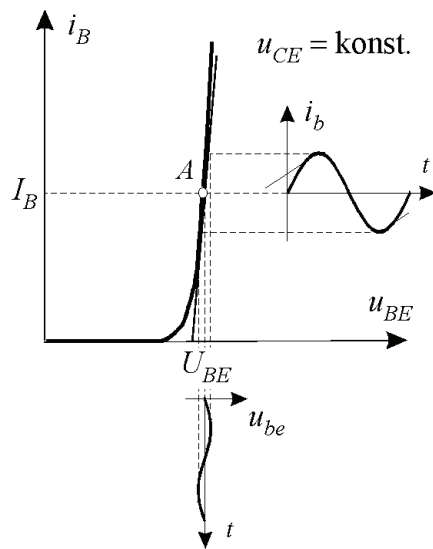
proboj kolektor-emiter

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

# Dinamički otpori – definicija i očitavanje iz karakteristika

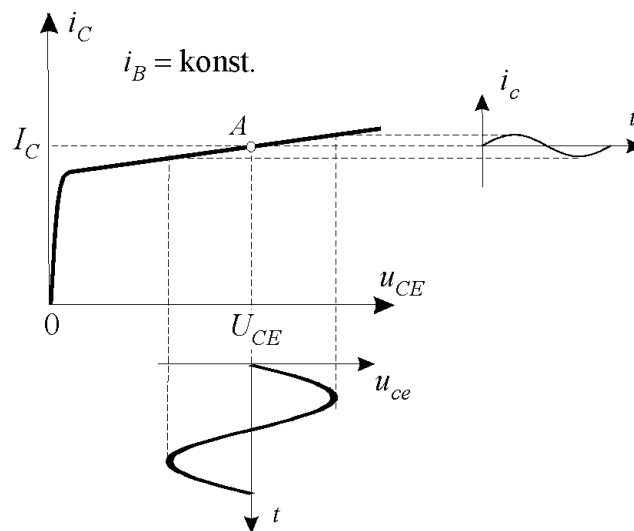
ulazni dinamički otpor

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



izlazni dinamički otpor

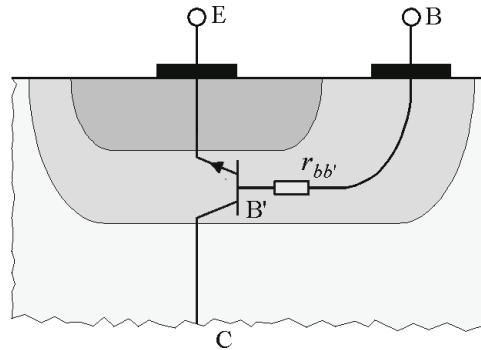
$$r_{ce} = \left. \frac{du_{CE}}{di_C} \right|_{i_B = \text{konst}} = \left. \frac{u_{ce}}{i_c} \right|_{i_b = 0}$$



# Ulazni dinamički otpor

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

□ serijski otpor baze  $r_{bb'}$  →



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

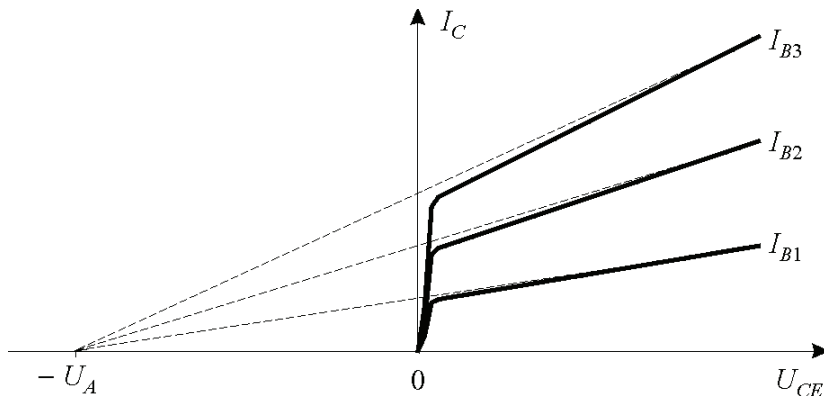
$$i_B = i_{PE} + i_R = q S D_{pE} \frac{p_{0E}}{L_{pE}} \exp\left(\frac{u_{B'E}}{U_T}\right) + q S \frac{w_B n_{0B}}{2 \tau_{nB}} \exp\left(\frac{u_{B'E}}{U_T}\right)$$

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

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

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

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

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

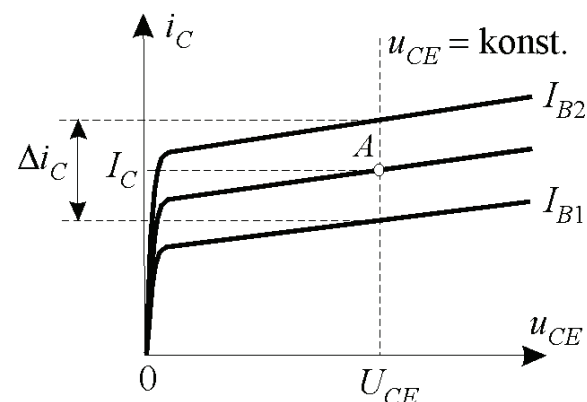
# Dinamički faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera

opisuje pojačanje tranzistora

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

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

očitanje 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

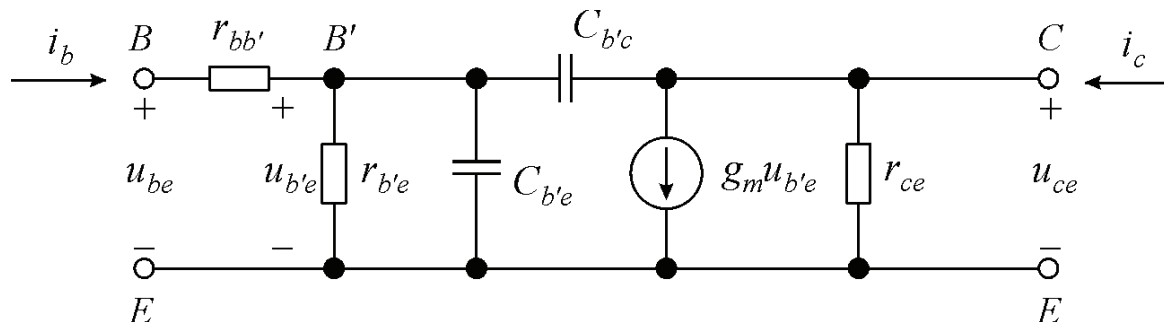
$$g_m = \left. \frac{di_C}{du_{B'E}} \right|_{u_{CE} = \text{konst}} = \left. \frac{i_c}{u_{b'e}} \right|_{u_{ce} = 0}$$

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

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

# Hibridni $\pi$ -model

## Visokofrekvencijski hibridni $\pi$ -model

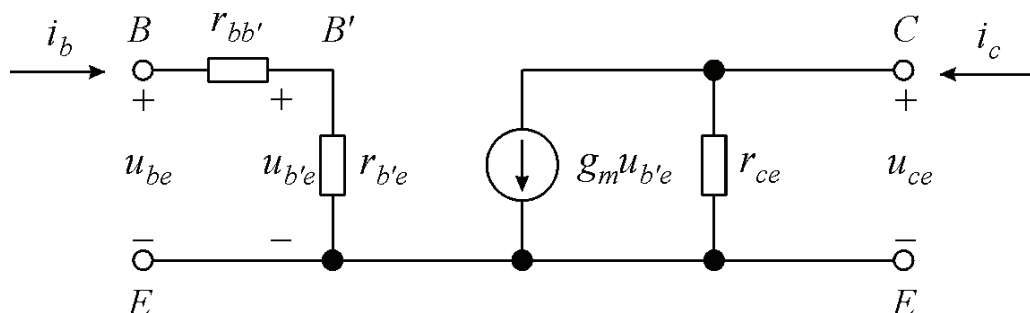


Kapaciteti:

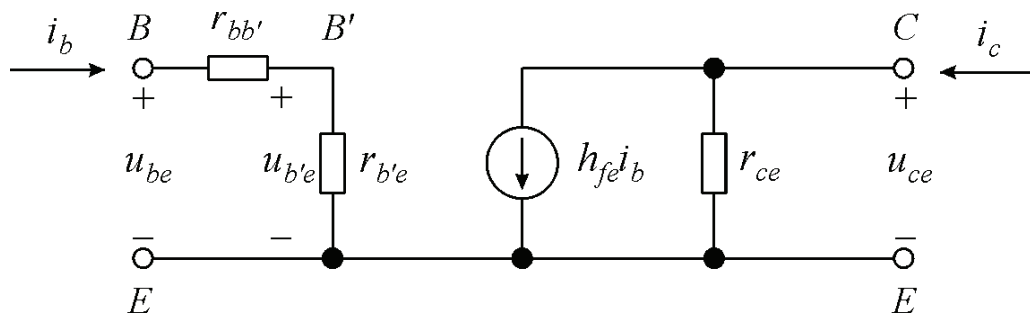
$C_{b'e} \rightarrow$  kapacitet spoja emiter-baza; difuzijski kapacitet

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

# Niskofrekvencijski modeli



Model sa strminom  $g_m$



Model s faktorom  
strujnog pojačanja  $h_{fe}$

## Primjer 7.8

---

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*. Koliki je Earlyjev napon  $U_A$  tog tranzistora? Temperatura je sobna,  $U_T = 25 \text{ mV}$ .