

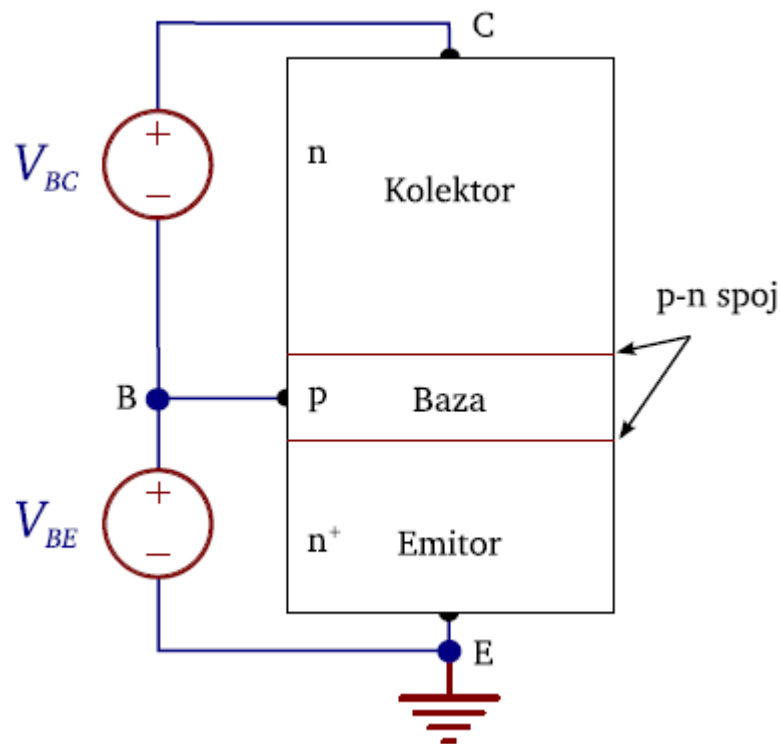
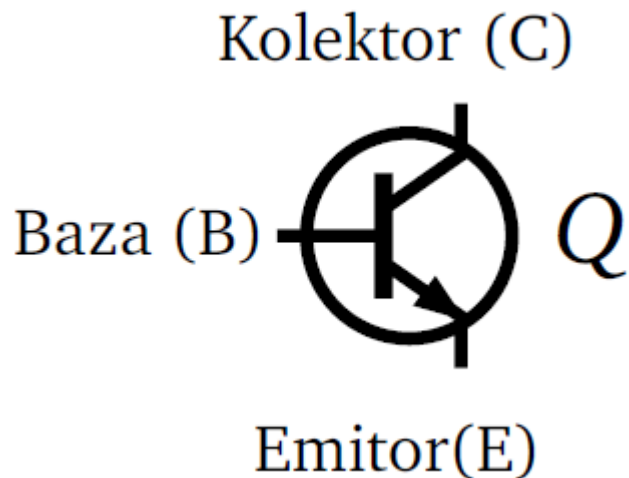
Osnove elektronike

III semestar

BIPOLARNI TRANZISTOR

NPN bipolarni tranzistor

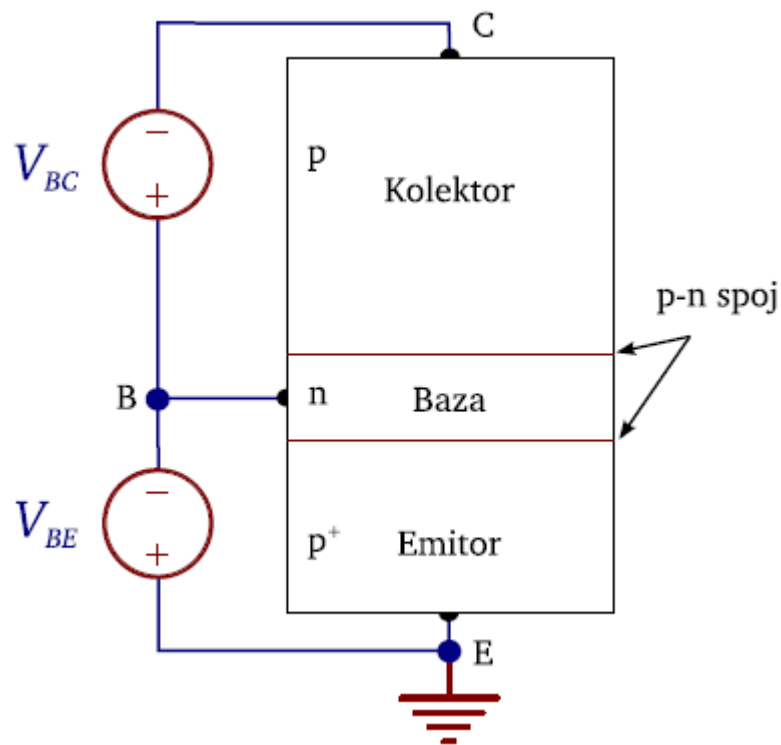
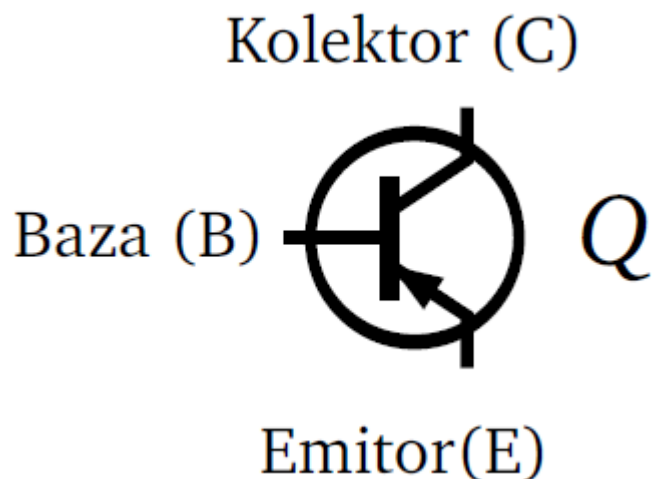
NPN bipolarni tranzistor se sastoji od dva pn spoja u konfiguraciji n^+pn , pri čemu je baza uska tako da onemogućava kompletnu rekombinaciju ubačenih sporednih nosilaca (elektrona).



Elektrode su: emitor, baza i kolektor (emitter, base, collector).

PNP bipolarni tranzistor

PNP bipolarni tranzistor se sastoji od dva pn spoja u konfiguraciji p^+np , pri čemu je baza uska tako da onemogućava kompletnu rekombinaciju ubačenih sporednih nosilaca (šupljina).

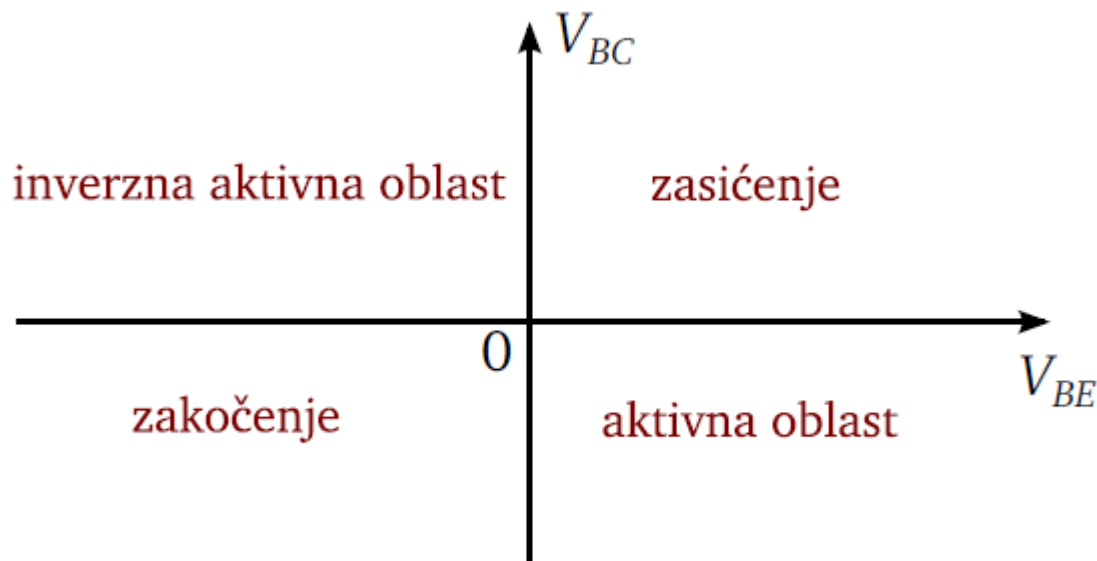


Elektrode su: emitor, baza i kolektor (emitter, base, collector).

Režimi rada bipolarnog tranzistora

U zavisnosti od direktne ili inverzne polarizacije BE i BC spojeva, razlikujemo četiri režima rada:

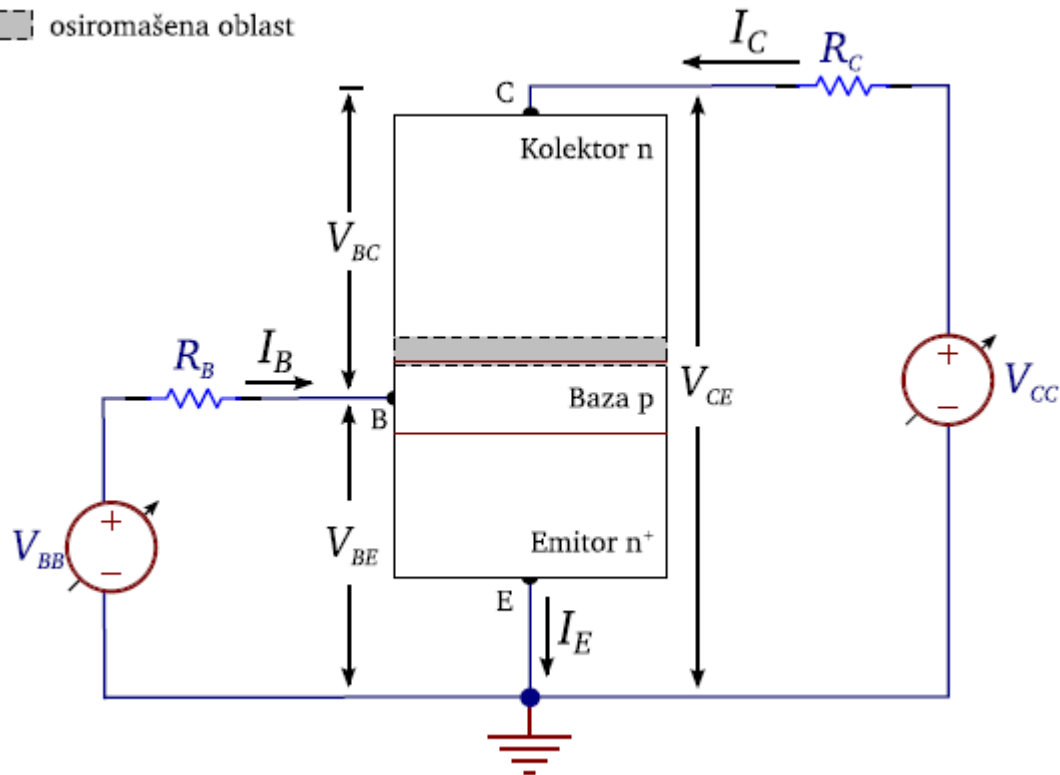
| | | |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Direktan aktivni režim | $V_{BE} > 0$ (direktna) | $V_{BC} < 0$ (inverzna) |
| Režim zasićenja | $V_{BE} > 0$ (direktna) | $V_{BC} > 0$ (direktna) |
| Inverzni aktivni režim | $V_{BE} < 0$ (inverzna) | $V_{BC} > 0$ (direktna) |
| Režim zakočenja | $V_{BE} < 0$ (inverzna) | $V_{BC} < 0$ (inverzna) |



Direktni aktivni režim

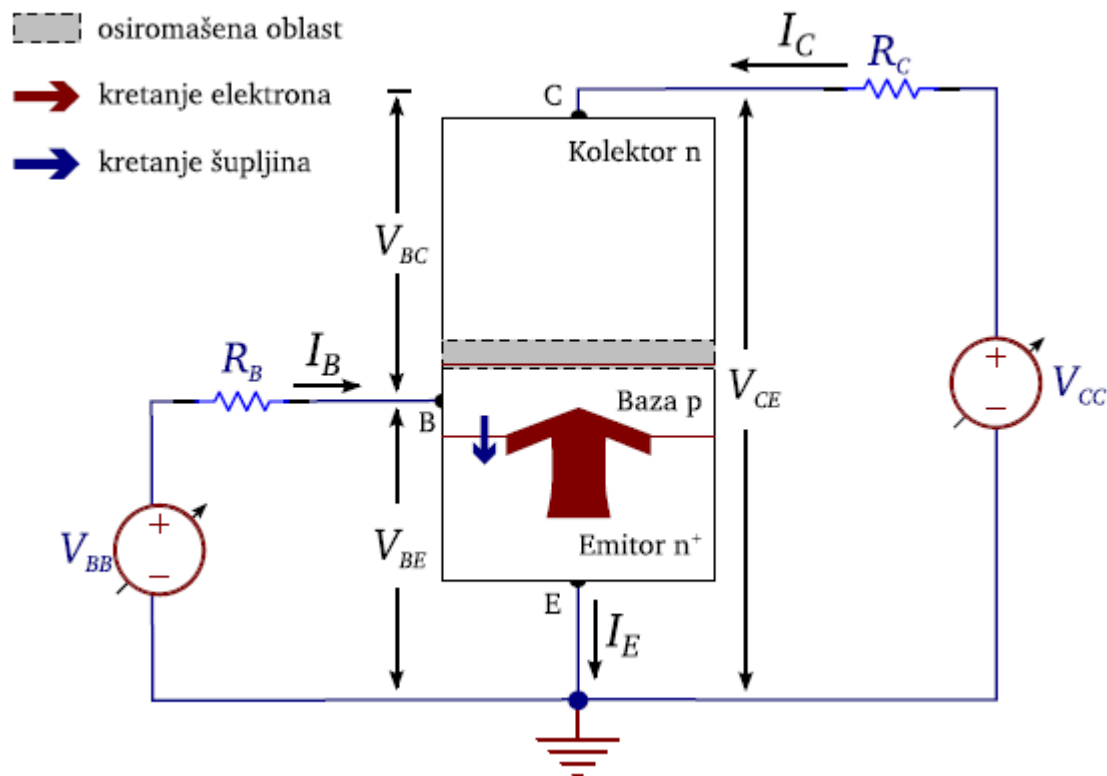
Polarizacija bipolarnog tranzistora u direktnom aktivnom režimu omogućava protok struje od kolektora ka emiteru, pri čemu se veličina struje kontroliše pomoću baze.

▒▒▒▒▒ osiromašena oblast



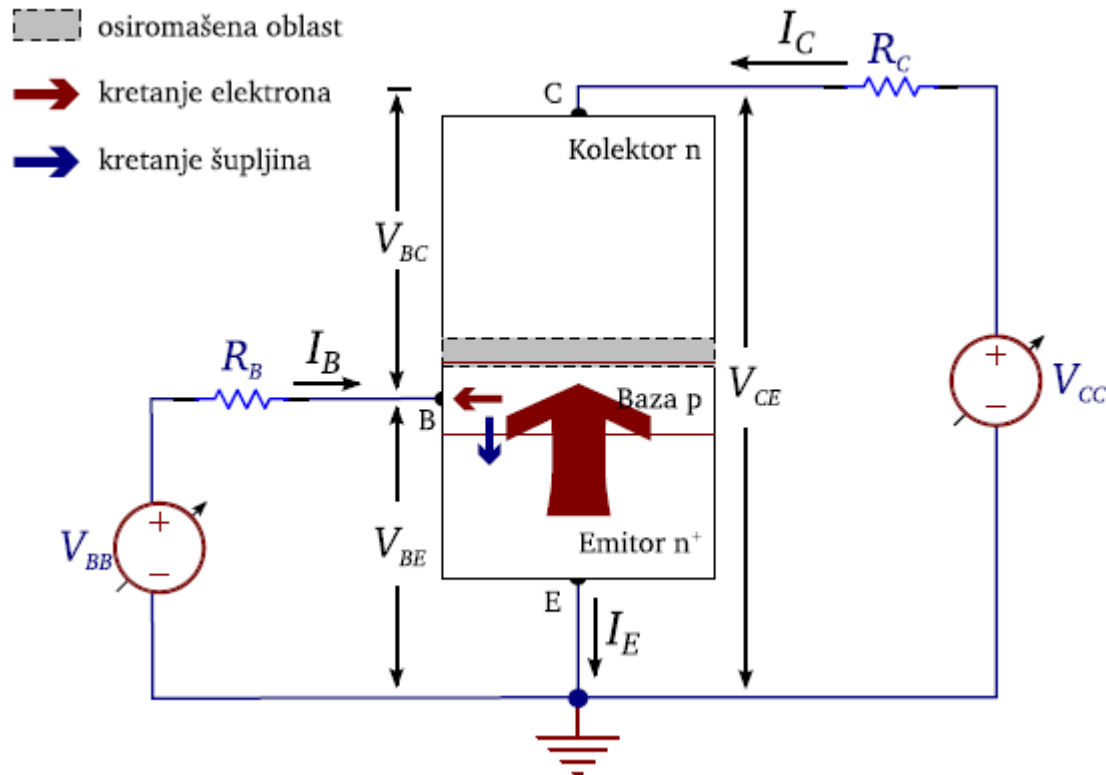
Emitorska struja I_E

Direktno polarisan BE spoj ubacuje elektrone iz emitora u bazu, i šupljine iz baze u emitor.



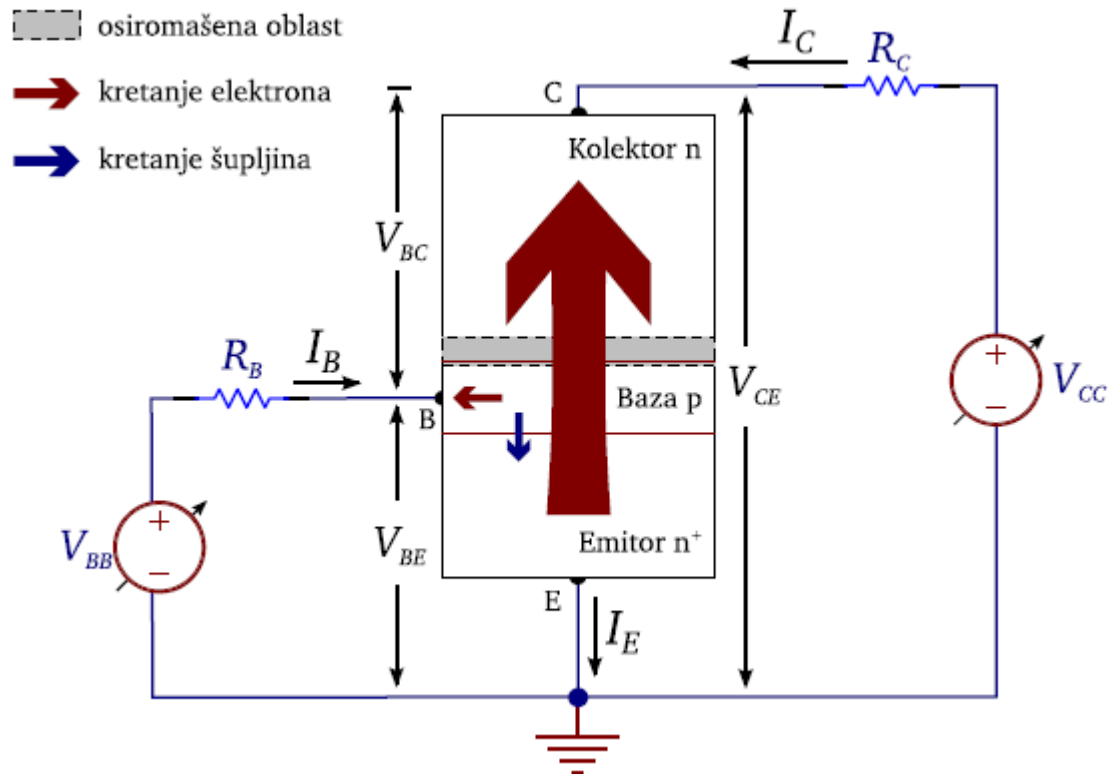
Bazna struja I_B

Bazna struja ubacuje šupljine u bazu, gde se rekombinuju sa elektronima ubačenim iz emitora i time određuju broj elektrona koji će biti prebačen u kolektor.



Kolektorska struja I_C

Inverzno polarisan BC spoj prebacuje nerekombinovane elektrone iz baze u kolektor, gde formiraju kolektorsku struju.



Glavni smerovi kretanja nosilaca

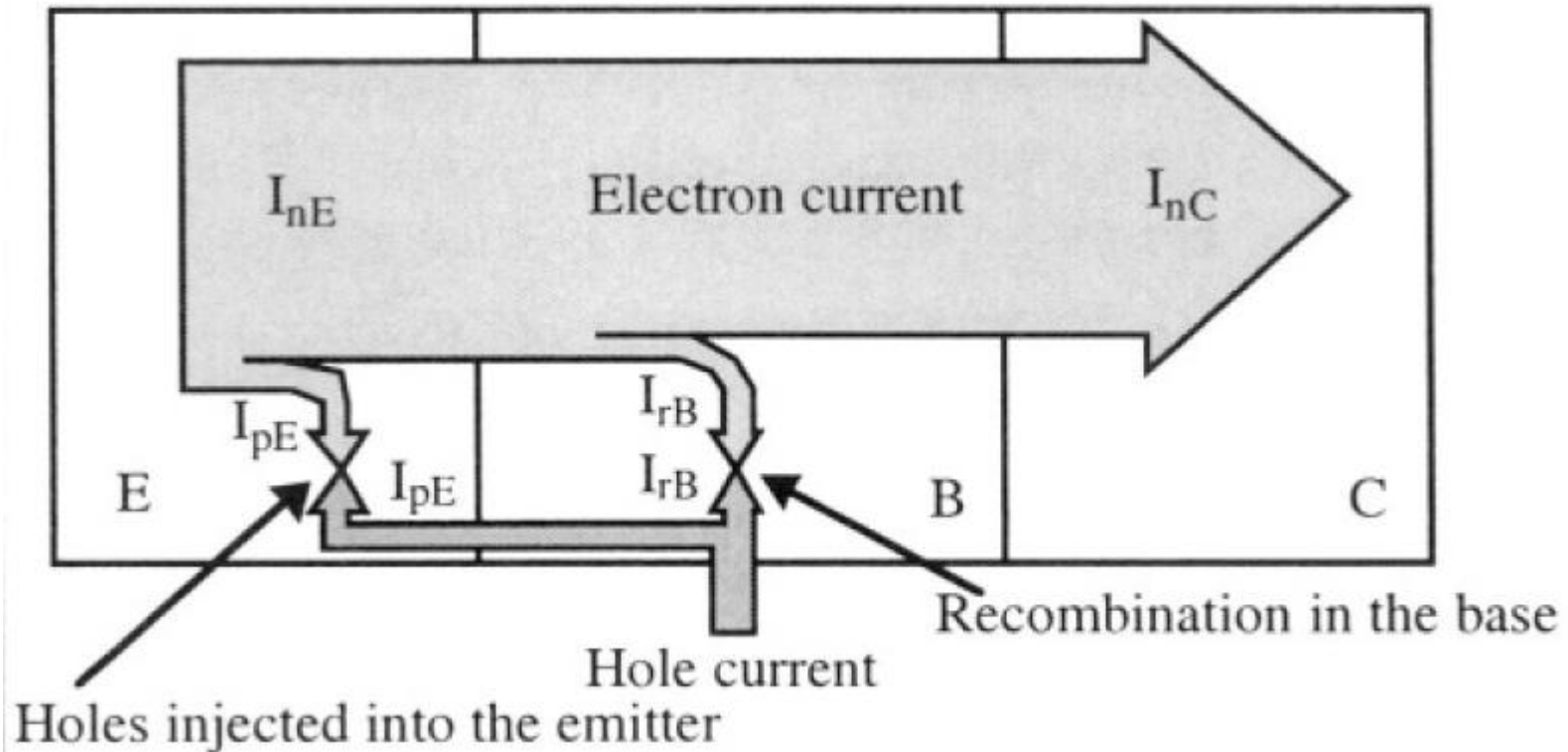
I_{nC} = smer kretanja elektrona u kolektoru

I_{nE} = smer kretanja elektrona u emiteru

I_{rB} = smer kretanja elektrona u bazi (rekombinacija)

I_{rB} = smer kretanja šupljina u bazi (rekombinacija)

I_{pE} = smer kretanja šupljina u emiteru



Struje bipolarnog tranzistora

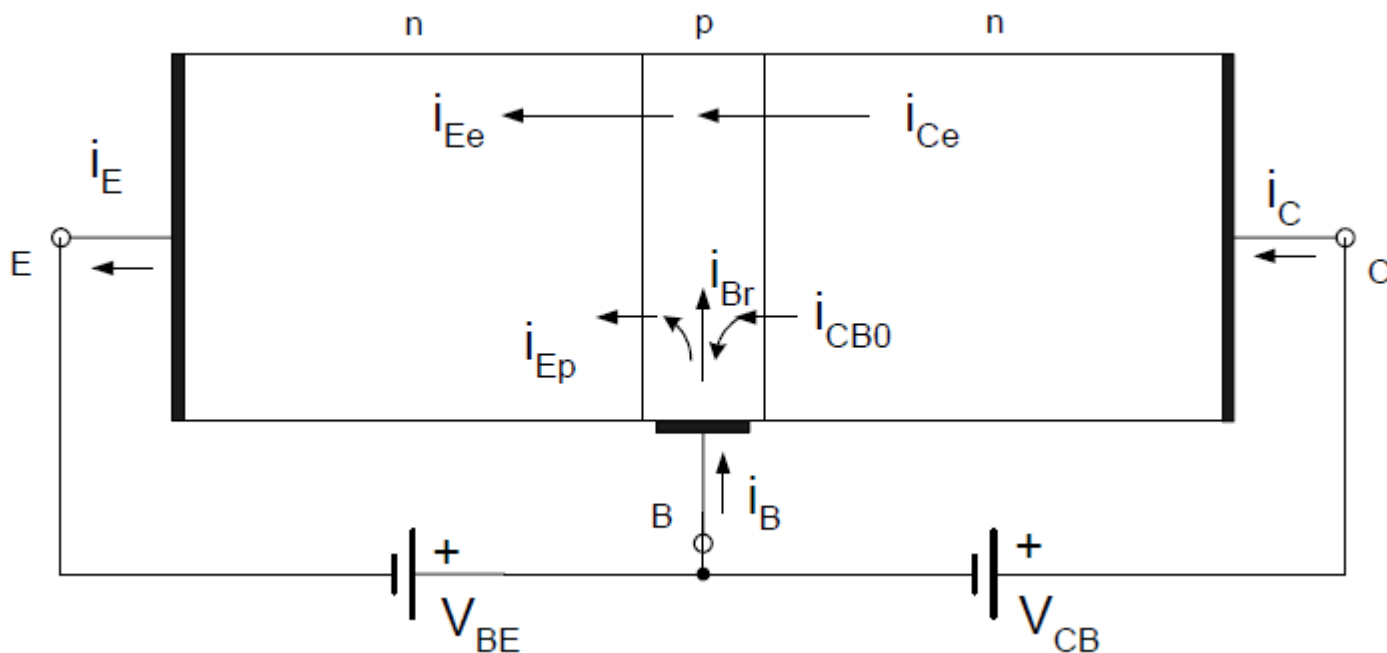
i_{Ce} = kolektorska struja elektrona

i_{Ee} = emitorska struja elektrona

i_{CBO} = inverzna struja zasićenja BC spoja

i_{Br} = struja šupljina koja podržava rekombinaciju u bazi

i_{Ep} = emitorska struja šupljina



Strujno pojačanje tranzistora

$$I_E = I_{Ee} + I_{Ep} \approx I_{Ee}, \quad \text{jer je } I_{Ep} \ll I_{Ee}$$

$$I_C = I_{Ce} + I_{CB0} \approx I_{Ce}, \quad \text{jer je } I_{CB0} \ll I_{Ce}$$

$$I_B = I_{Ep} + I_{Br} - I_{CB0}$$

α = koeficijent strujnog pojačanja od emitora do kolektora (tipično između 0.95 i 0.999).

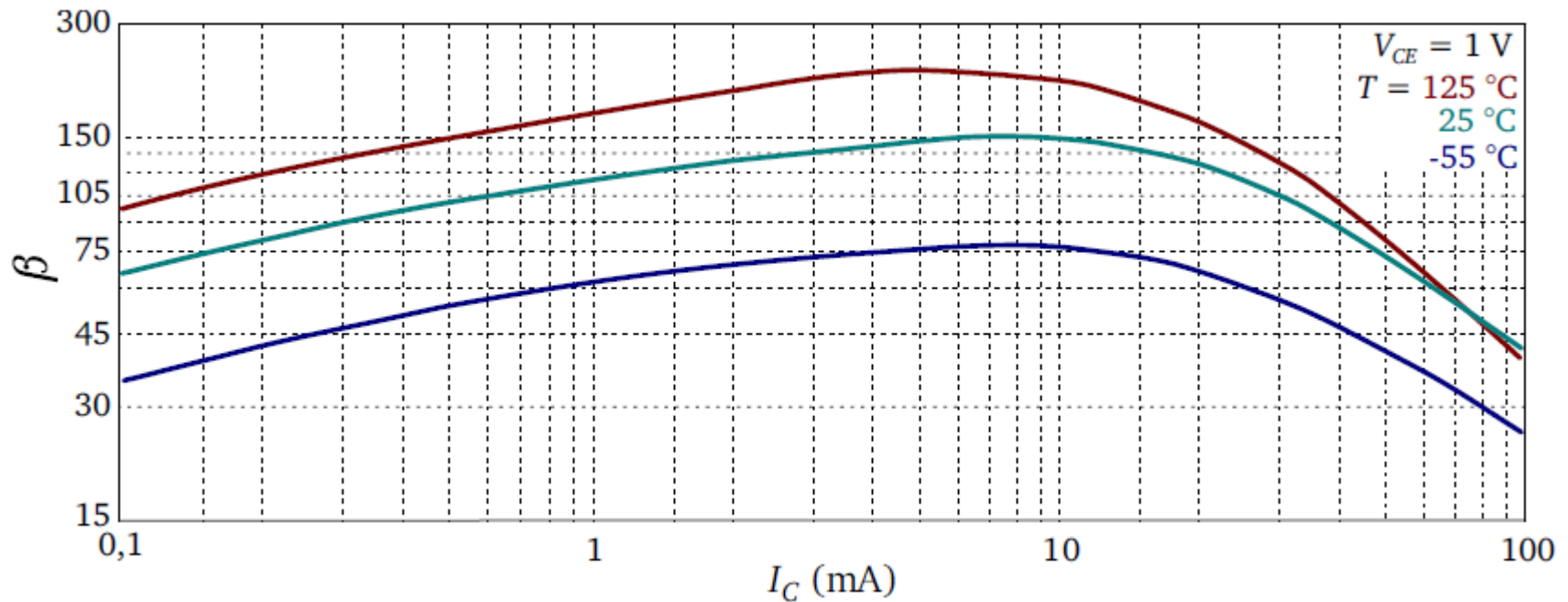
$$\alpha = \frac{I_{Ce}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E} \qquad I_E = I_B + I_C$$

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

β = koeficijent strujnog pojačanja od baze do kolektora (tipično između 20 i 1000)

Zavisnost strujnog pojačanja

Zavisnost strujnog pojačanja β npn tranzistora od kolektorske struje i temperature.



Koncentracije nosilaca

n_{nE} = koncentracija elektrona u emitoru

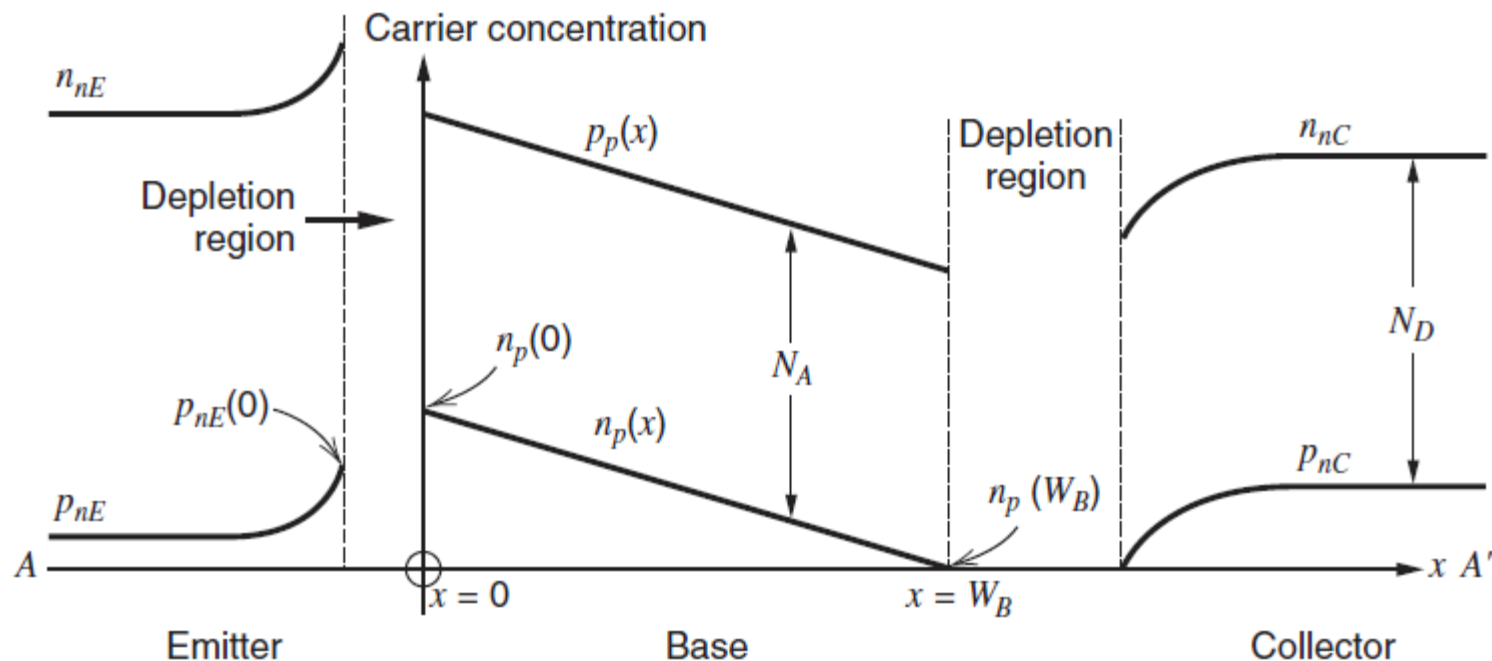
p_{nE} = koncentracija šupljina u emitoru

n_p = koncentracija elektrona u bazi

p_p = koncentracija šupljina u bazi

n_{nC} = koncentracija elektrona u kolektoru

p_{nC} = koncentracija šupljina u kolektoru



Kolektorska struja elektrona

$$n_p(0) = n_{po} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$n_p(W_B) = n_{po} \exp \frac{V_{BC}}{V_T} \simeq 0$$

Elektroni su sporedni nosioci u bazi i uglavnom se kreću difuzijom.

$$J_n = qD_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$J_n = -qD_n \frac{n_p(0)}{W_B}$$

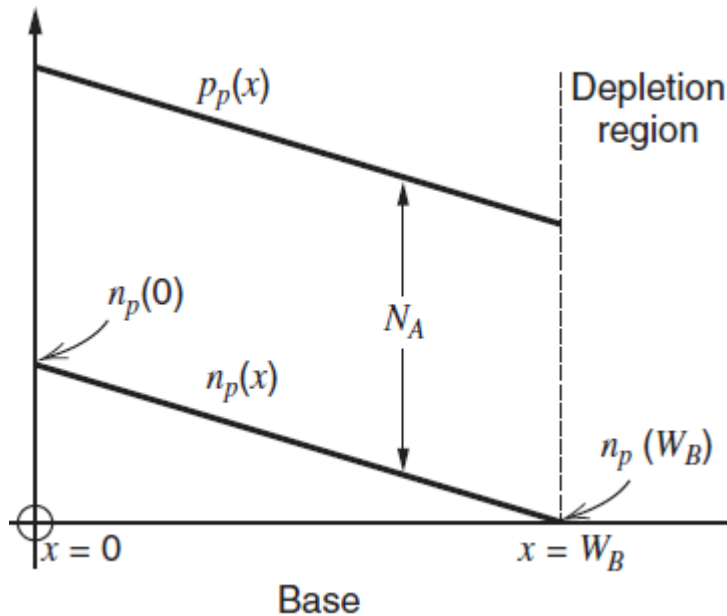
$$I_C = qAD_n \frac{n_p(0)}{W_B}$$

$$I_C = \frac{qAD_n n_{po}}{W_B} \exp \frac{V_{BE}}{V_T} = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_S = \frac{qAD_n n_{po}}{W_B} \quad n_{po} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$I_S = \frac{qAD_n n_i^2}{W_B N_A}$$

$$I_C = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$



Bazne struje tranzistora

Struja I_{B1} podržava rekombinaciju elektrona u bazi.

Naelektrisanje elektrona u bazi sa vremenom života τ_b je:

$$Q_e = \frac{1}{2} n_p(0) W_B q A$$

$$I_{B1} = \frac{Q_e}{\tau_b} = \frac{1}{2} \frac{n_p(0) W_B q A}{\tau_b}$$

$$n_p(0) = n_{po} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_{B1} = \frac{1}{2} \frac{n_{po} W_B q A}{\tau_b} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

Struja I_{B2} prebacuje šupljine iz baze u emiter.

$$p_{nE}(0) = p_{nEo} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_{B2} = \frac{q A D_p}{L_p} p_{nE}(0)$$

$$p_{nEo} \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$I_{B2} = \frac{q A D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

Strujno pojačanje tranzistora od baze do kolektora

Ukupna bazna struja I_B je:

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} = \left(\frac{1}{2} \frac{n_{po} W_B q A}{\tau_b} + \frac{q A D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

Pošto su i I_C i I_B proporcionalne istom eksponentu, može se uvesti izraz za strujno pojačanje od baze do kolektora:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_F} \quad \beta_F = \frac{\frac{q A D_n n_{po}}{W_B}}{\frac{1}{2} \frac{n_{po} W_B q A}{\tau_b} + \frac{q A D_p n_i^2}{L_p N_D}} = \frac{1}{\frac{W_B^2}{2 \tau_b D_n} + \frac{D_p}{D_n} \frac{W_B}{L_p} \frac{N_A}{N_D}}$$

Strujno pojačanje tranzistora od emitora do kolektora

$$I_E = I_B + I_C$$

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

$$I_C = \alpha_F I_E$$

$$I_C = \alpha_F (I_B + I_C) = \alpha_F \left(\frac{I_C}{\beta_F} + I_C \right)$$

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F}$$

$$\alpha_F = \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta_F}} = \frac{1}{1 + \frac{W_B^2}{2\tau_b D_n} + \frac{D_p}{D_n} \frac{W_B}{L_p} \frac{N_A}{N_D}} \simeq \alpha_T \gamma$$

Transportni faktor

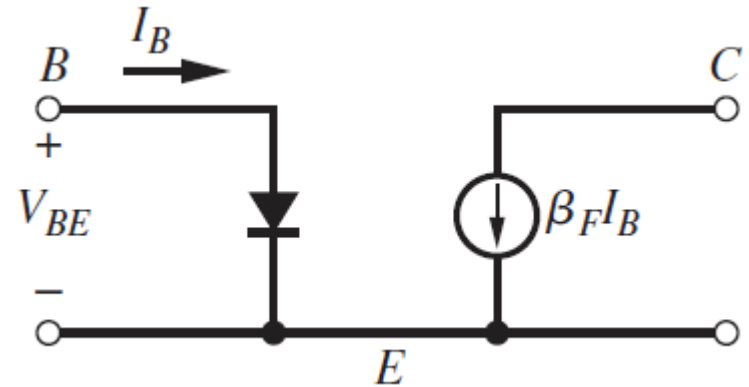
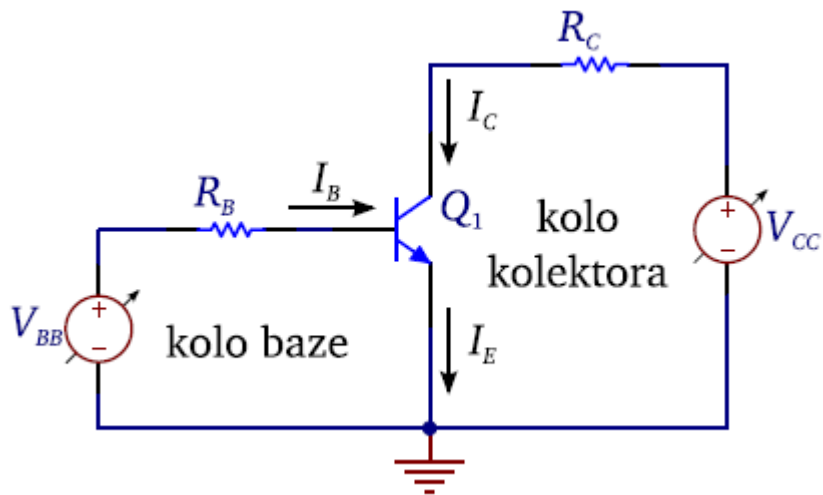
Efikasnost emitora

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + \frac{W_B^2}{2\tau_b D_n}}$$

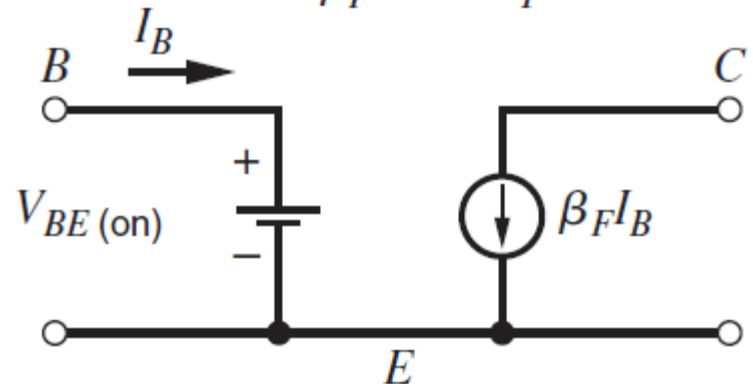
$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_p}{D_n} \frac{W_B}{L_p} \frac{N_A}{N_D}}$$

NPN tranzistor kao pojačavač u spoju sa zajedničkim emiterom

Mala promena bazne struje izaziva veliku promenu kolektorske struje, time veliku promenu napona na kolektorskom otporniku i pojačavački efekat.

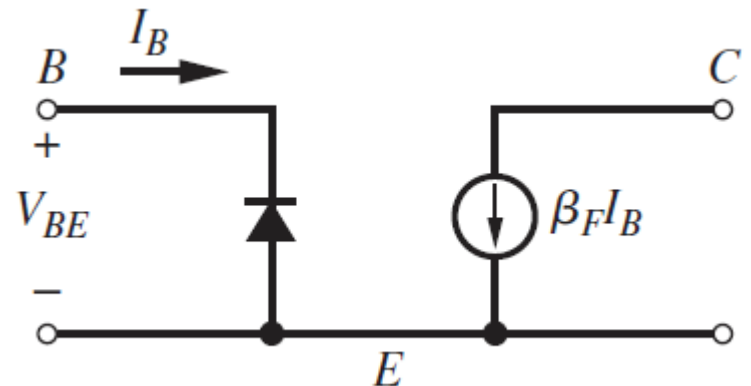
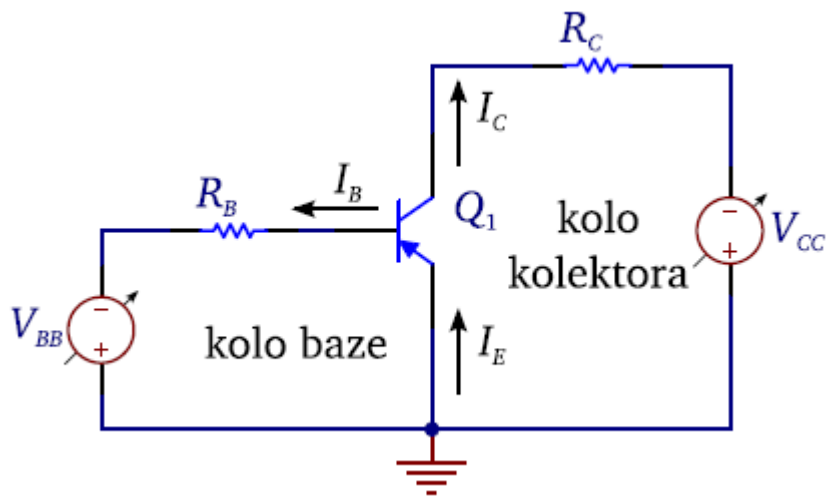


$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

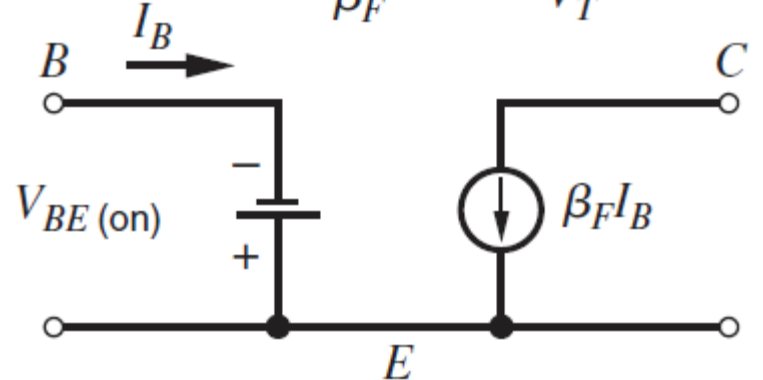


PNP tranzistor kao pojačavač u spoju sa zajedničkim emiterom

Mala promena bazne struje izaziva veliku promenu kolektorske struje, time veliku promenu napona na kolektorskom otporniku i pojačavački efekat.



$$I_B = -\frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(-\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

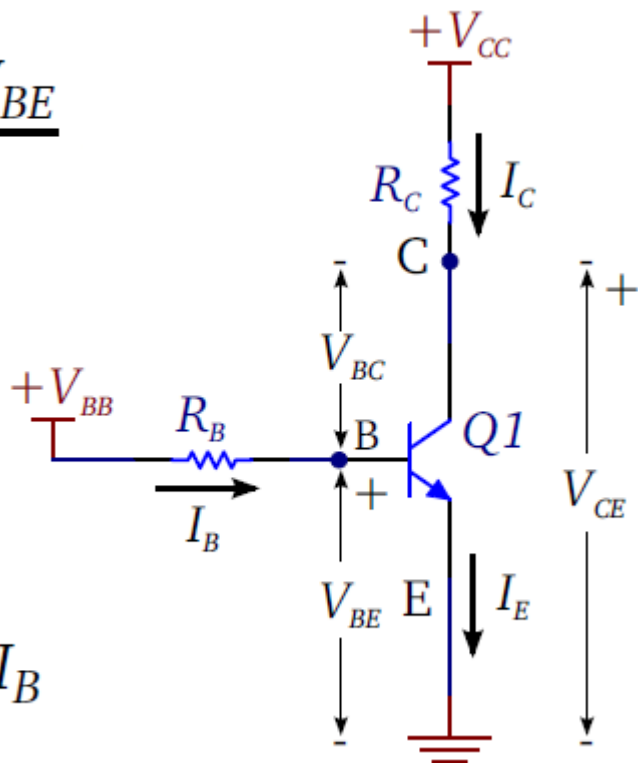


Konstantna bazna struja

Na slici je prikazana polarizacija konstantnom strujom bazom. Tranzistor je direktno polarisan ako postoji kontura koja direktno polariše BE spoj. Ako tranzistor nije u zakočenju ili zasićenju, već u direktnom aktivnom režimu, važe sledeće formule:

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

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



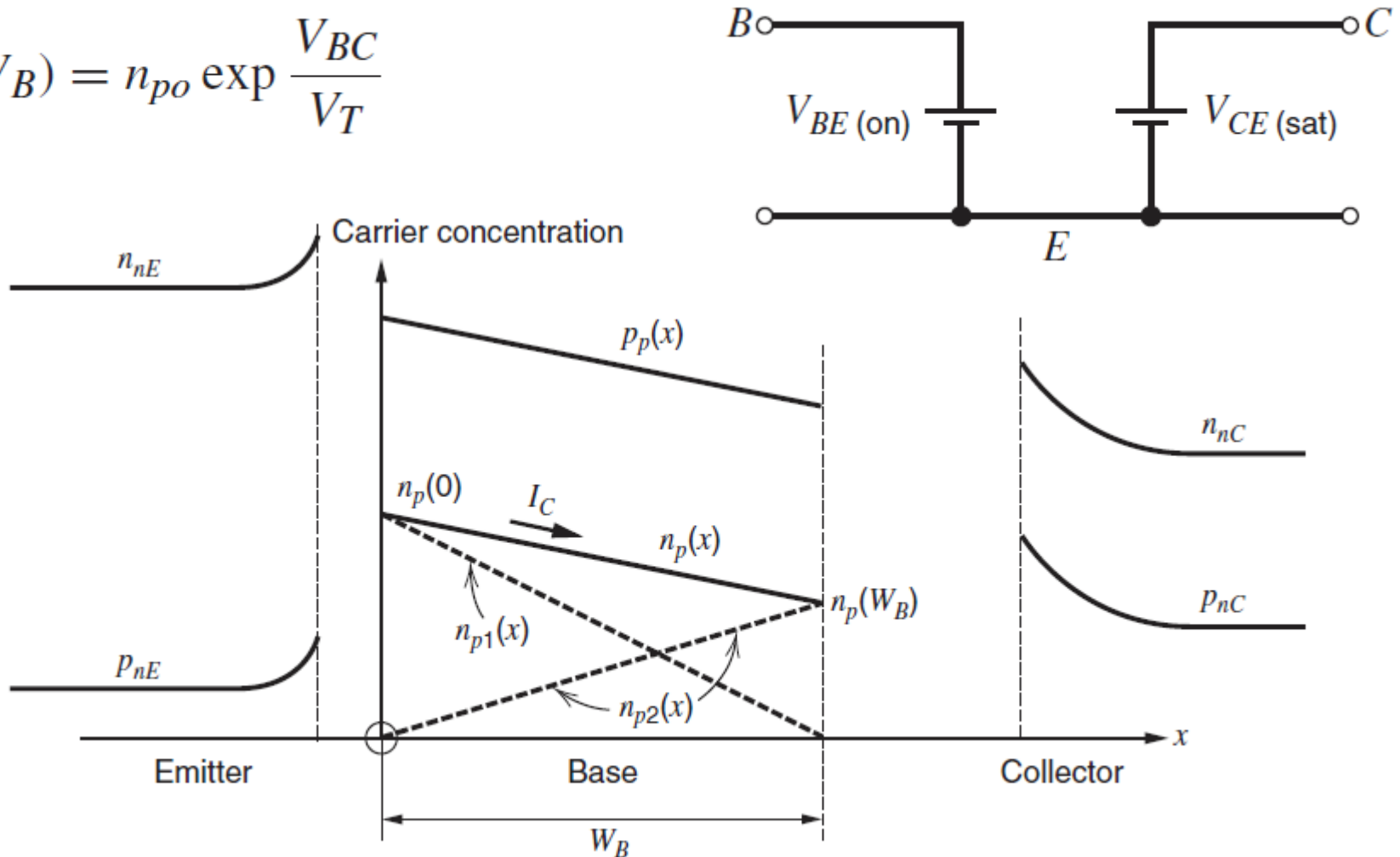
$$I_E = (1 + \beta)I_B$$

$$I_E \simeq \beta I_B = I_C$$

Režim zasićenja

Tranzistor je u zasićenju kada se napon V_{CE} smanji na napon zasićenje $V_{CES} \sim 0.2V$, kada je BC spoj direktno polarisan.

$$n_p(W_B) = n_{po} \exp \frac{V_{BC}}{V_T}$$



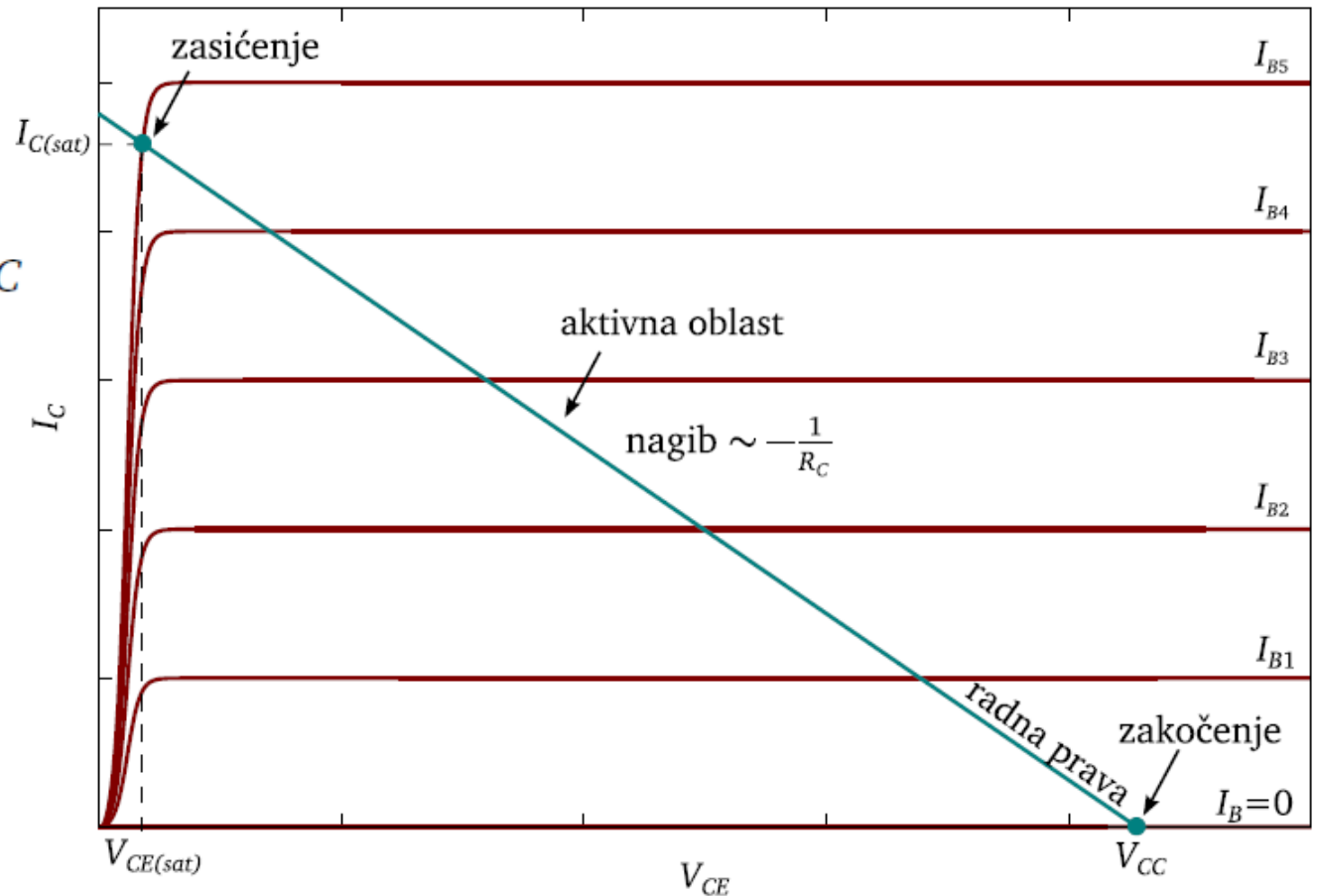
Izlazne karakteristike

Tranzistor je zakočen kada je kolektorska struja nula.

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

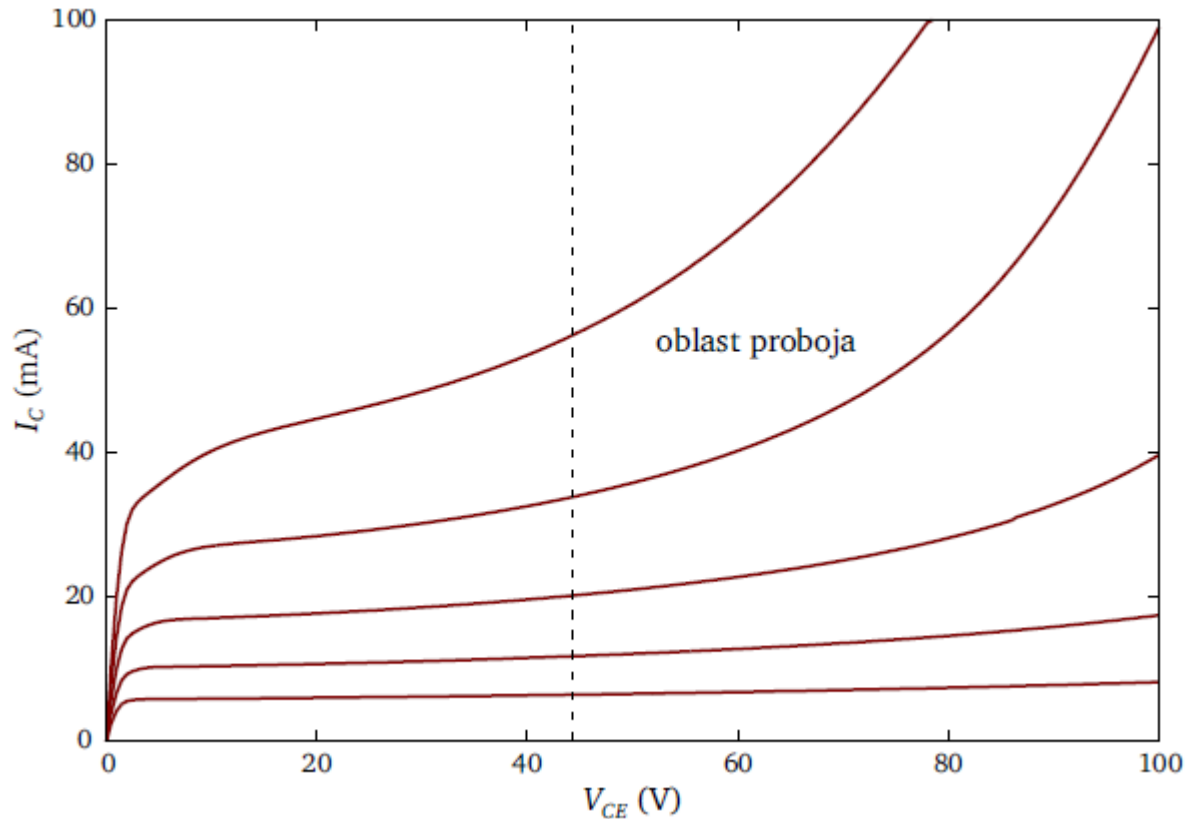
U zasićenju:

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

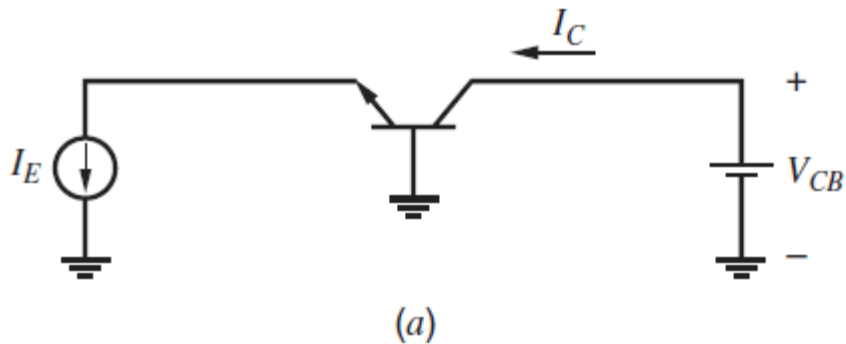


Izlazne karakteristike u probouju

Napon V_{CE} se može povećavati dok na inverzno polarisanom BC spoju ne nastupi proboj, nakon čega kolektorska struja naglo raste zajedno sa disipacijom, tako da može doći do uništenja tranzistora.



Proboj u spoju sa zajedničkom bazom

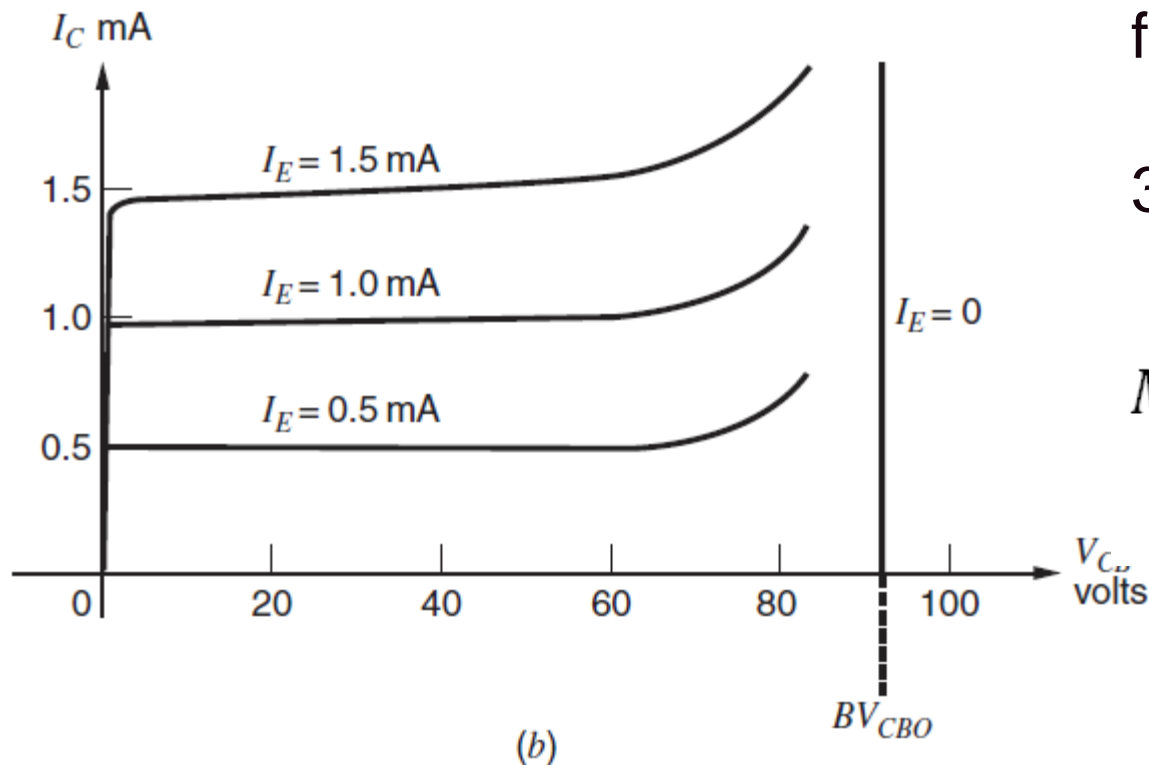


$$I_C = \alpha_F M I_E$$

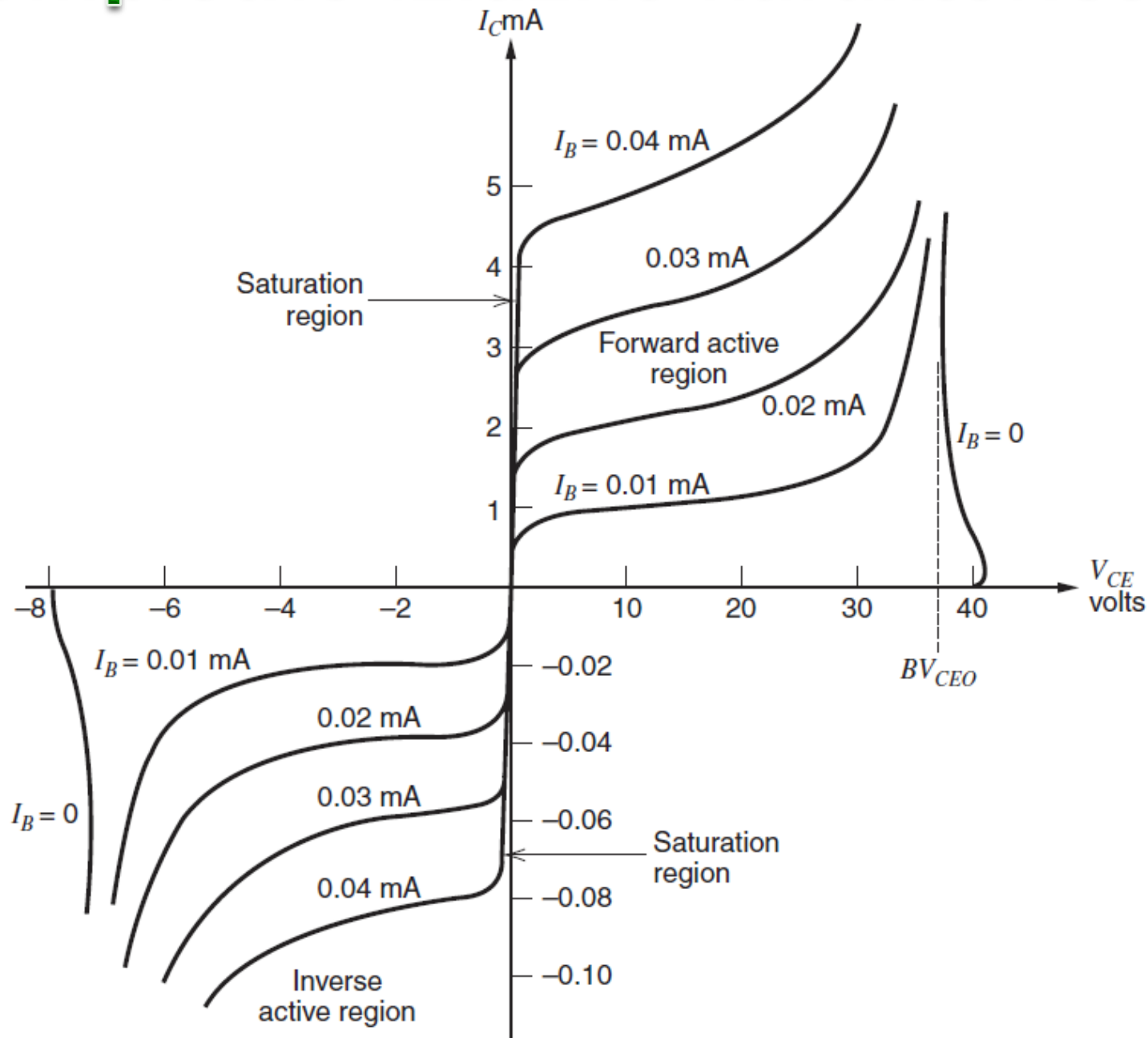
M = multiplikacioni faktor

$$3 < n < 6$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{BV_{CBO}}\right)^n}$$



Kompletne izlazne karakteristike



Proboj u spoju sa zajedničkim emiterom

$$I_E = I_B + I_C \quad I_C = \alpha_F M I_E \quad M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{BV_{CBO}}\right)^n}$$
$$I_E = I_C + I_B = \frac{I_C}{\alpha_F M}$$

$$I_B = I_C \left(\frac{1}{\alpha_F M} - 1 \right) = I_C \frac{1 - \alpha_F M}{\alpha_F M} \quad I_C = I_B \frac{\alpha_F M}{1 - \alpha_F M}$$

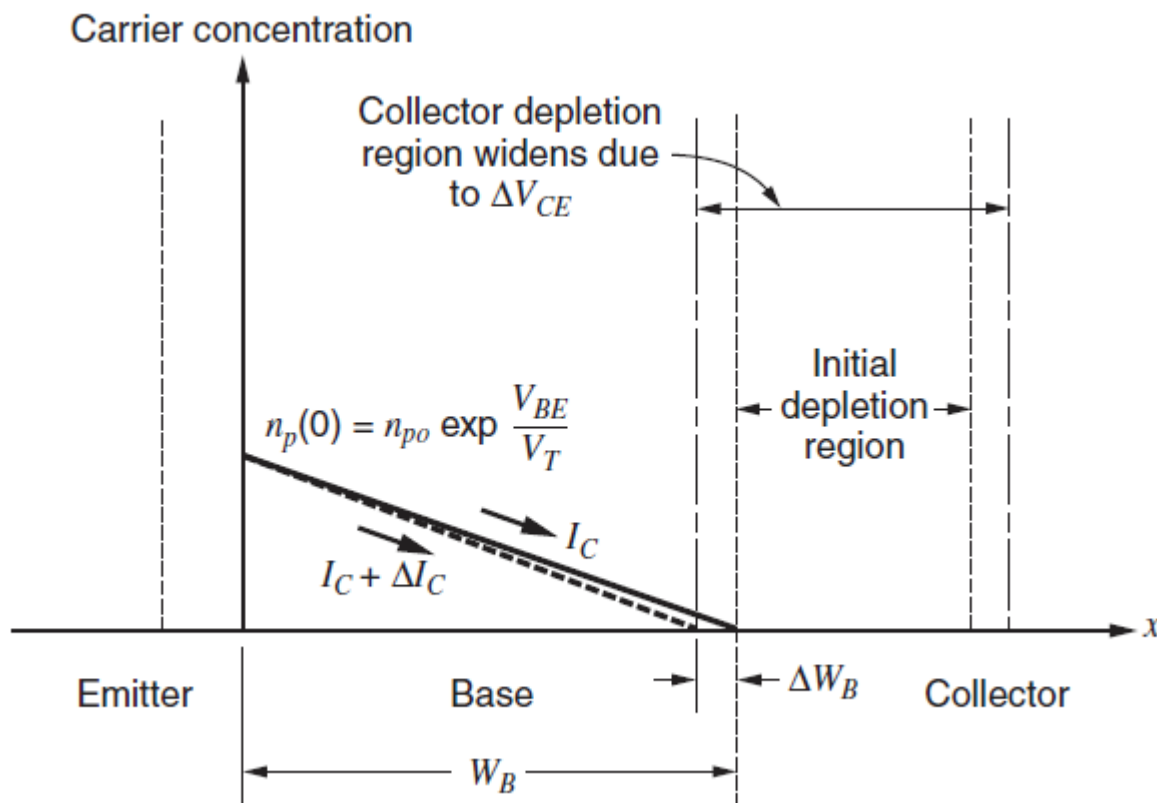
$\alpha_F M = 1$ Uslov proboja za beskonačnu kolektorsku struju.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{BV_{CBO}}\right)^n} = \frac{1}{\alpha_F} \quad V_{CB} \simeq V_{CE} \quad \frac{\alpha_F}{1 - \left(\frac{BV_{CEO}}{BV_{CBO}}\right)^n} = 1$$

$$\frac{BV_{CEO}}{BV_{CBO}} = \sqrt[n]{1 - \alpha_F} \quad BV_{CEO} \simeq \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[n]{\beta_F}}$$

Early-jev efekat

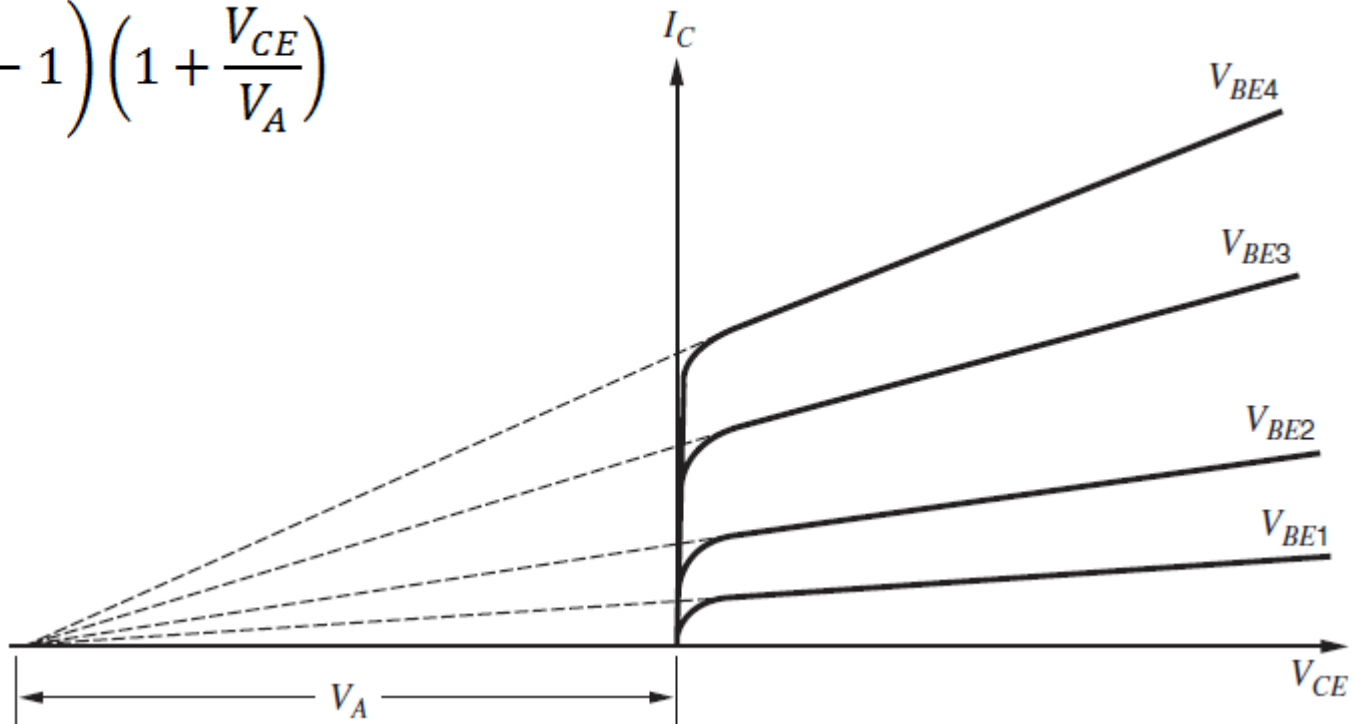
Sa povećanjem napona V_{CB} inverzne polarizacije BC spoja se širi oblast prostornog tovara na BC spoju, čime se smanjuje širina baze, povećava gradijent koncentracije elektrona kao sporednih nosilaca u bazi i time povećava difuziona struja.



Early-jev efekat

Napon V_{CE} se može povećavati dok na inverzno polarisanom BC spoju ne nastupi proboj, nakon čega kolektorska struja naglo raste zajedno sa disipacijom, tako da može doći do uništenja tranzistora.

$$I_C = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$



Rad u režimu malih signala

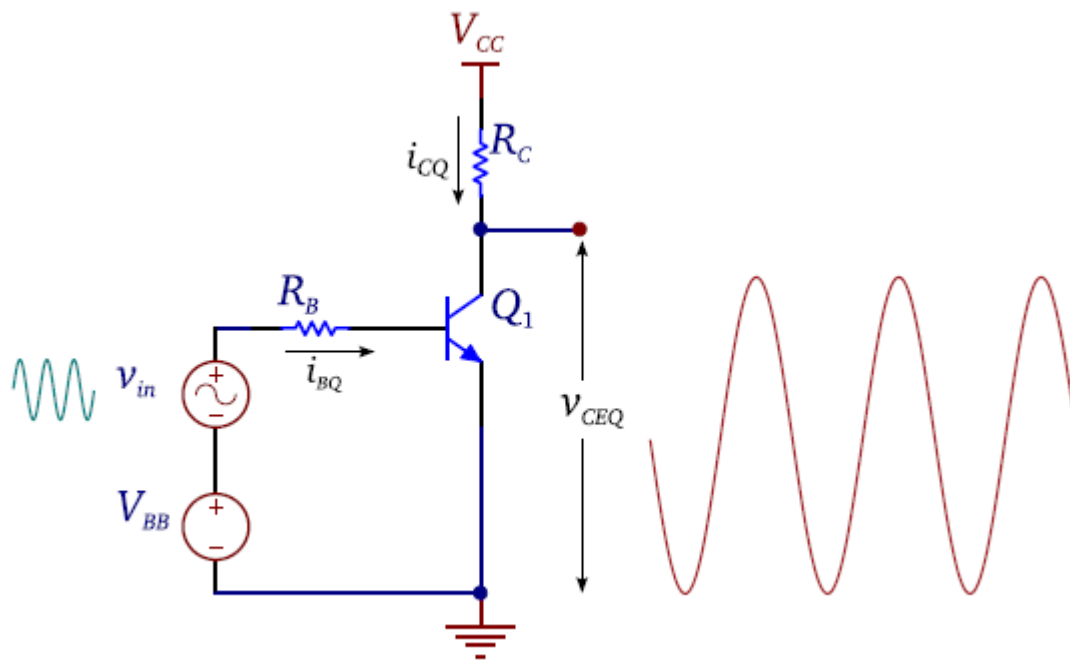
Mali signal u elektronici je naizmenični električni signal čija je amplituda mnogo manja od vrednosti jednosmernih napona i struja u kolu.

Trenutne vrednosti napona i struje u kolu će biti odgovarajuće zbiru jednosmerne i naizmenične komponente prema principu superpozicije.

$$v_{in} = V_{in} \sin(\omega t)$$

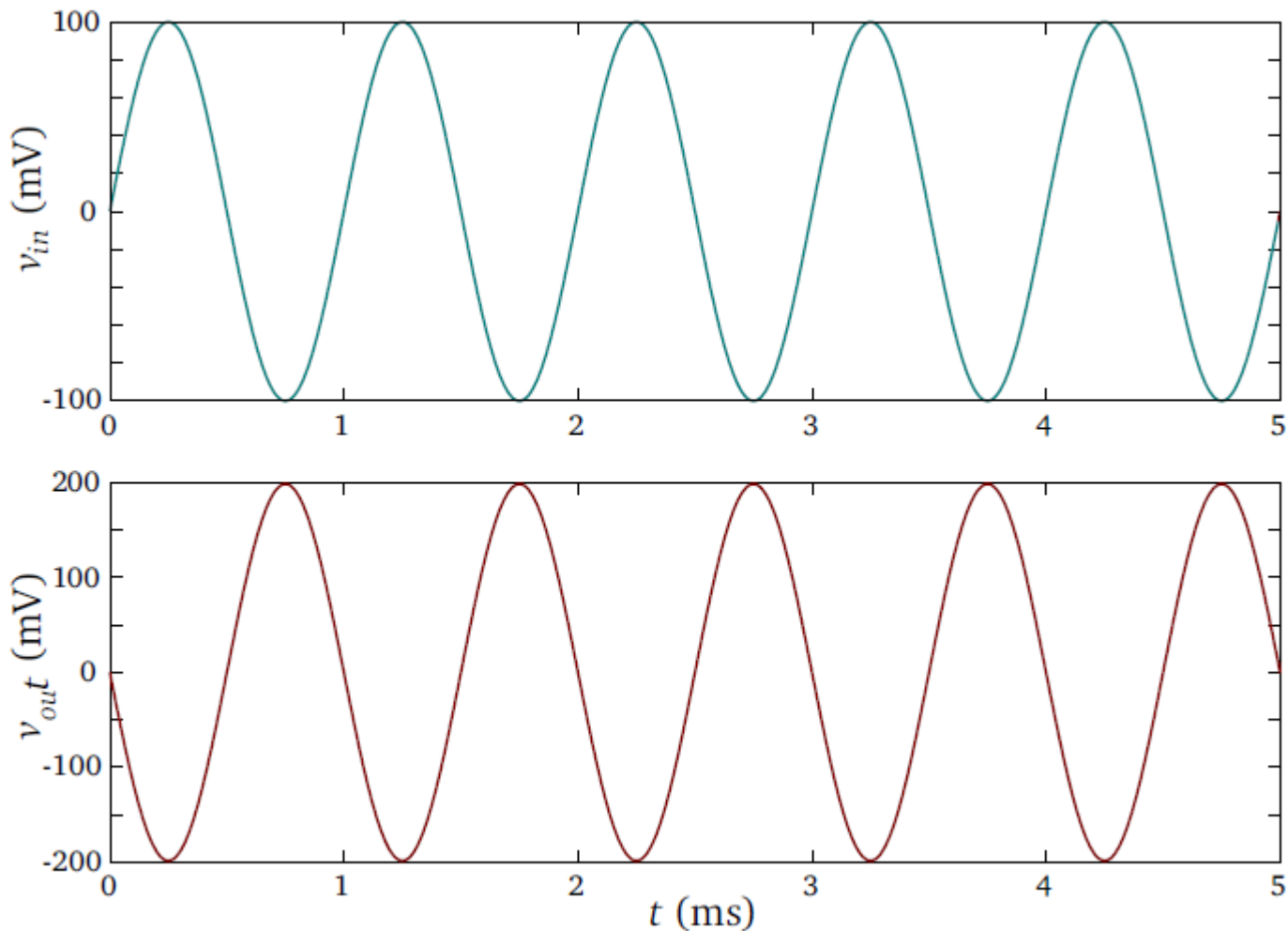
$$V_{in} \ll V_{BB}$$

$$v_{IN} = V_{BB} + v_{in}$$



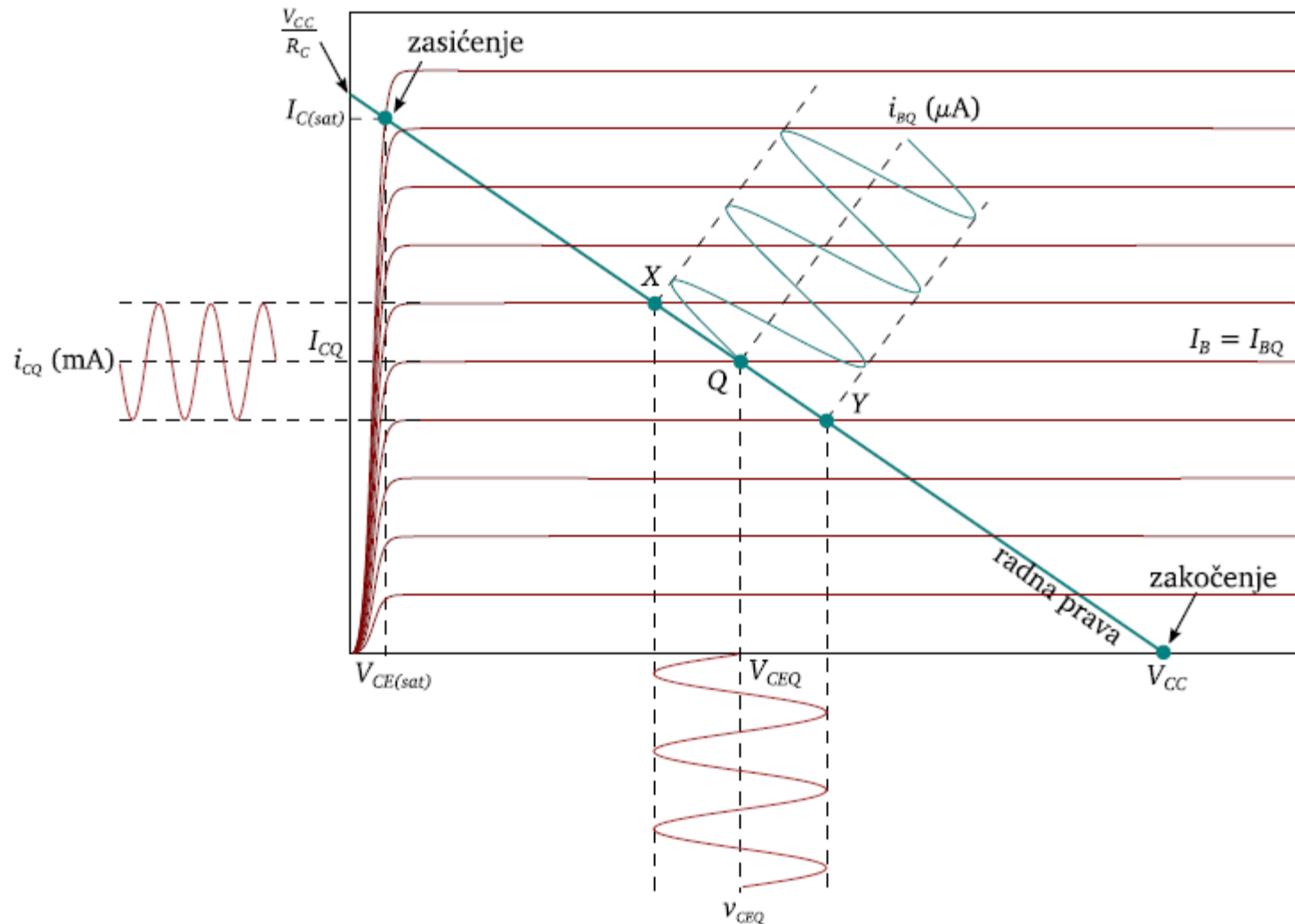
Vremenski dijagrami

Vremenski dijagrami naizmeničnog ulaznog i izlaznog signala su:

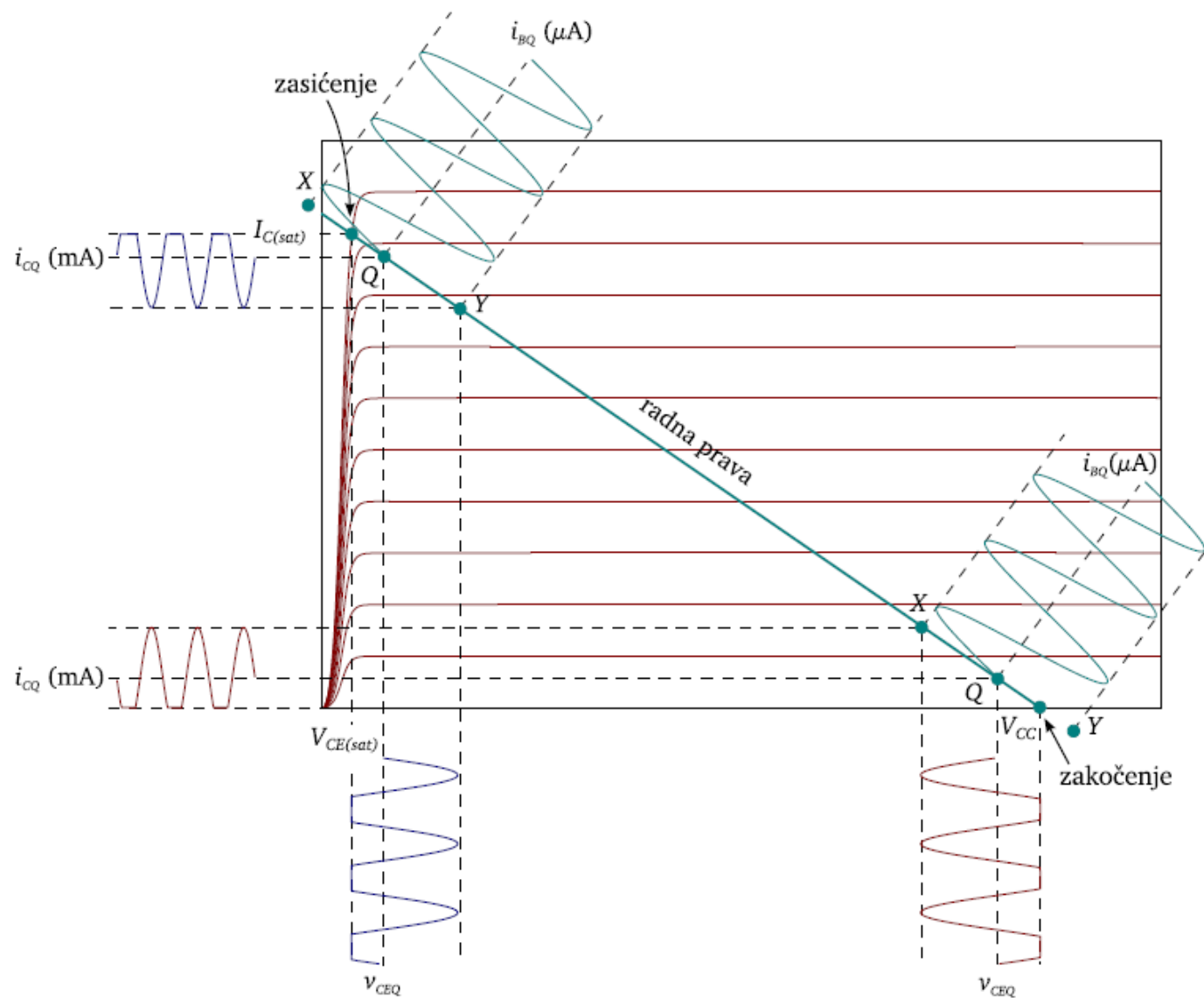


Mali signali u okolini radne tačke

Radna tačka se postavlja približno na sredinu radne prave da bi se smanjila izobličenja.



Nepravilan izbor radne tačke



Transkonduktansa tranzistora

Transkonduktansa tranzistora se definiše za male promene struje I_C i napona V_{BE} kao:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_{v_{CE}=\text{const}} = \frac{I_S}{V_T} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right) \Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$

$$i_C = I_S \left(e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

$$g_m \approx \frac{I_S}{V_T} \left(e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right) \Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$

$$g_m \approx \frac{I_S}{V_T} \left(e^{\frac{V_{BEQ}}{V_T}} - 1 \right) \left(1 + \frac{V_{CEQ}}{V_A} \right)$$

$$g_m \approx \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

Ulazna otpornost tranzistora

Ulazna otpornost tranzistora se definiše za male promene struje I_B i napona V_{BE} kao:

$$r_\pi = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{v_{CE}=\text{const}} = \left. \left(\frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right)^{-1} \right|_{v_{CE}=\text{const}}$$

$$r_\pi = \left. \left(\frac{\partial i_B}{\partial i_C} \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right)^{-1} \right|_{v_{CE}=\text{const}} = \left. \left(\frac{g_m}{\beta_0} \right)^{-1} \right|_{v_{CE}=\text{const}}$$

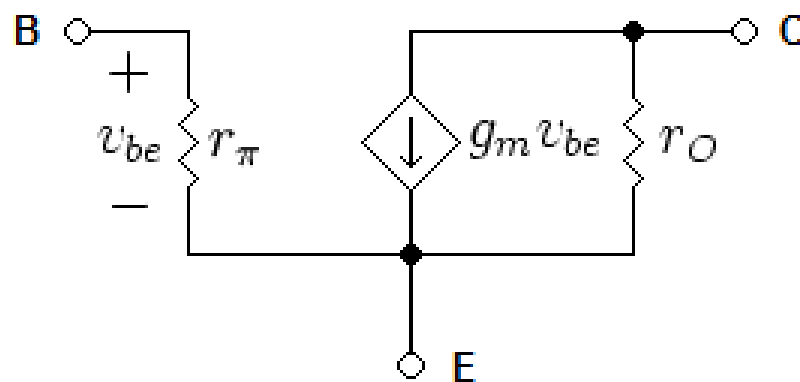
$$r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m}$$

Izlazna otpornost tranzistora

Izlazna otpornost tranzistora se definiše za male promene struje I_C i napona V_{CE} kao:

$$r_{ce} = \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{v_{BE}=\text{const}} = \left. \left(\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right)^{-1} \right|_{v_{BE}=\text{const}}$$
$$r_{ce} = \left. \left(\frac{I_S \left(e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1 \right)}{V_A} \right)^{-1} \right|_{v_{BE}=\text{const}} = \frac{V_A}{I_S \left(e^{\frac{V_{BEQ}}{V_T}} - 1 \right)}$$
$$r_{ce} = \frac{V_A \left(1 + \frac{V_{CEQ}}{V_A} \right)}{I_{CQ}} = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$
$$r_{ce} \approx \frac{V_A}{I_{CQ}} \quad V_A \gg V_{CEQ}$$

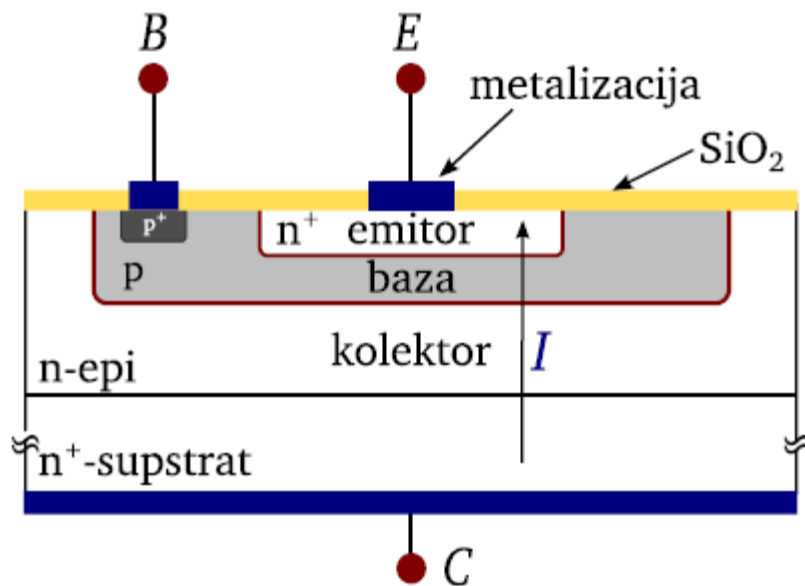
Model za male signale NPN i PNP Bipolarnih tranzistora



$$r_{ce} = r_o$$

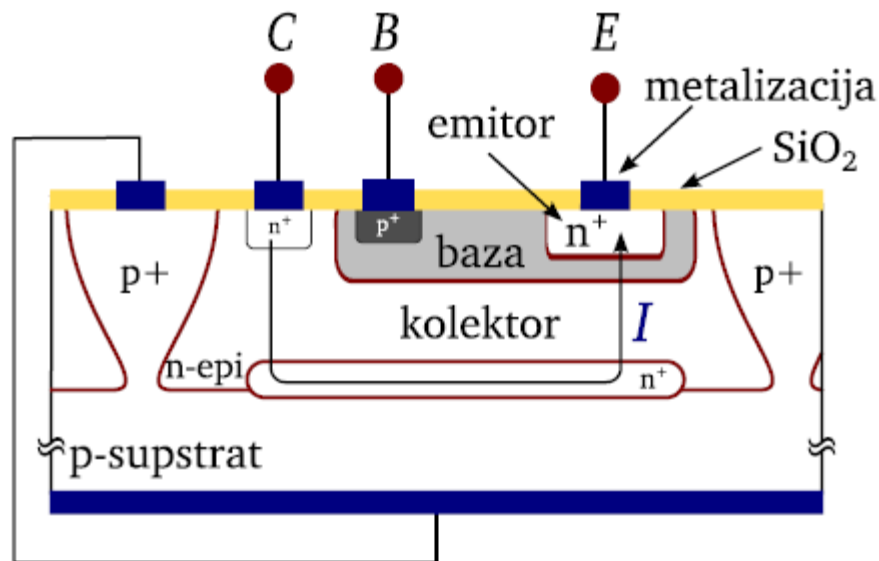
Fabrikacija diskretnog bipolarnog tranzistora

Bipolarni tranzistor kao diskretna komponenta (neintegrirana u integralno kolo) sa pravi tako što se na jako dopirani supstrat (osnovu) nanosi slabo dopirani epitaksijalni sloj koji služi kao kolektor. Baza i emitor se formiraju uzastopnim difuzijama u tom sloju, pri čemu dodatna p^+ difuzija unutar baze obezbeđuje bolji kontakt između tela baze i metalizacije.

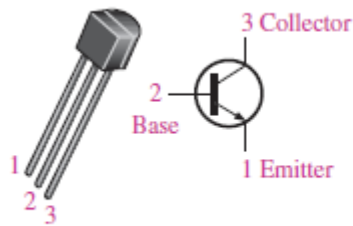


Fabrikacija integrisanog bipolarnog tranzistora

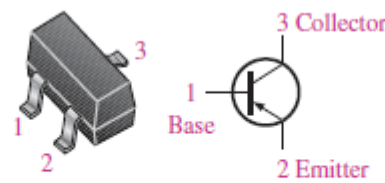
Bipolarni tranzistor kao integrisana komponenta (integrirana u integralno kolo) sa pravi tako što se na slabo dopiranom supstratu pravi epitaksijalni sloj u kome se zatim prave uzastopne difuzije. Električna izolacija između integriranih komponenti se postiže spajanjem supstrata na najniži potencijal u kolu, čime je pn spoj koji čine supstrat i epitaksijalni sloj inverzno polarisan.



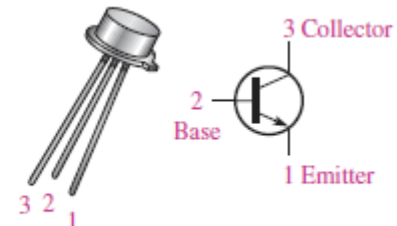
Izgledi različitih kućišta bipolarnog tranzistora



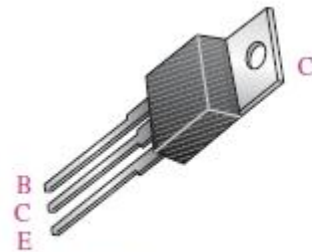
(a) TO-92



(b) SOT-23



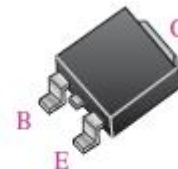
(c) TO-18. Emitter is closest to tab.



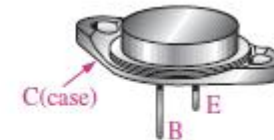
(a) TO-220



(b) TO-225



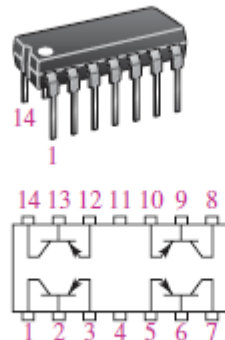
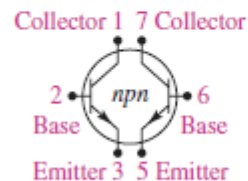
(c) D-Pack



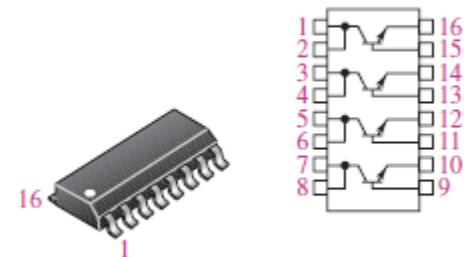
(d) TO-3



(a) Dual metal can. Emitters are closest to tab.



(b) Quad dual in-line (DIP) and quad flat-pack. Dot indicates pin 1.



(c) Quad small outline (SO) package for surface-mount technology

Osnove elektronike

III semestar

BIPOLARNI TRANZISTOR