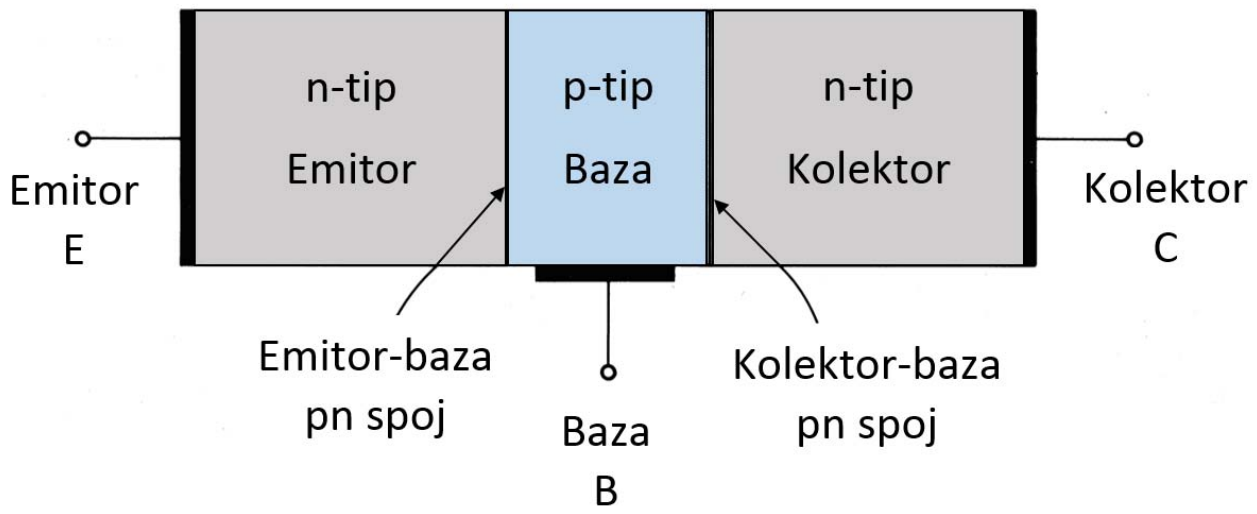
BIPOLARNI TRANZISTORI

Aktivne komponente

- Elektronske komponente sa tri priključka imaju daleko veće primene od komponenti sa dve elektrode kao što je dioda. One nalaze primenu u pojačanju signala, memorijskim kolima, digitalnim kolima.
- Osnovni princip funkcionisanja tranzistora je da se naponom između dve elektrode kontroliše struja koja protiče kroz treću elektrodu.
- U digitalnim kolima napon između dve elektrode menja struju kroz treću elektrodu na takav način da kroz nju ili ne teče struja (otvoreni prekidač) ili protiče velika struja (zatvoreni prekidač). U ovim kolima tranzistor funkcioniše kao prekidač.

Struktura bipolarnog tranzistora

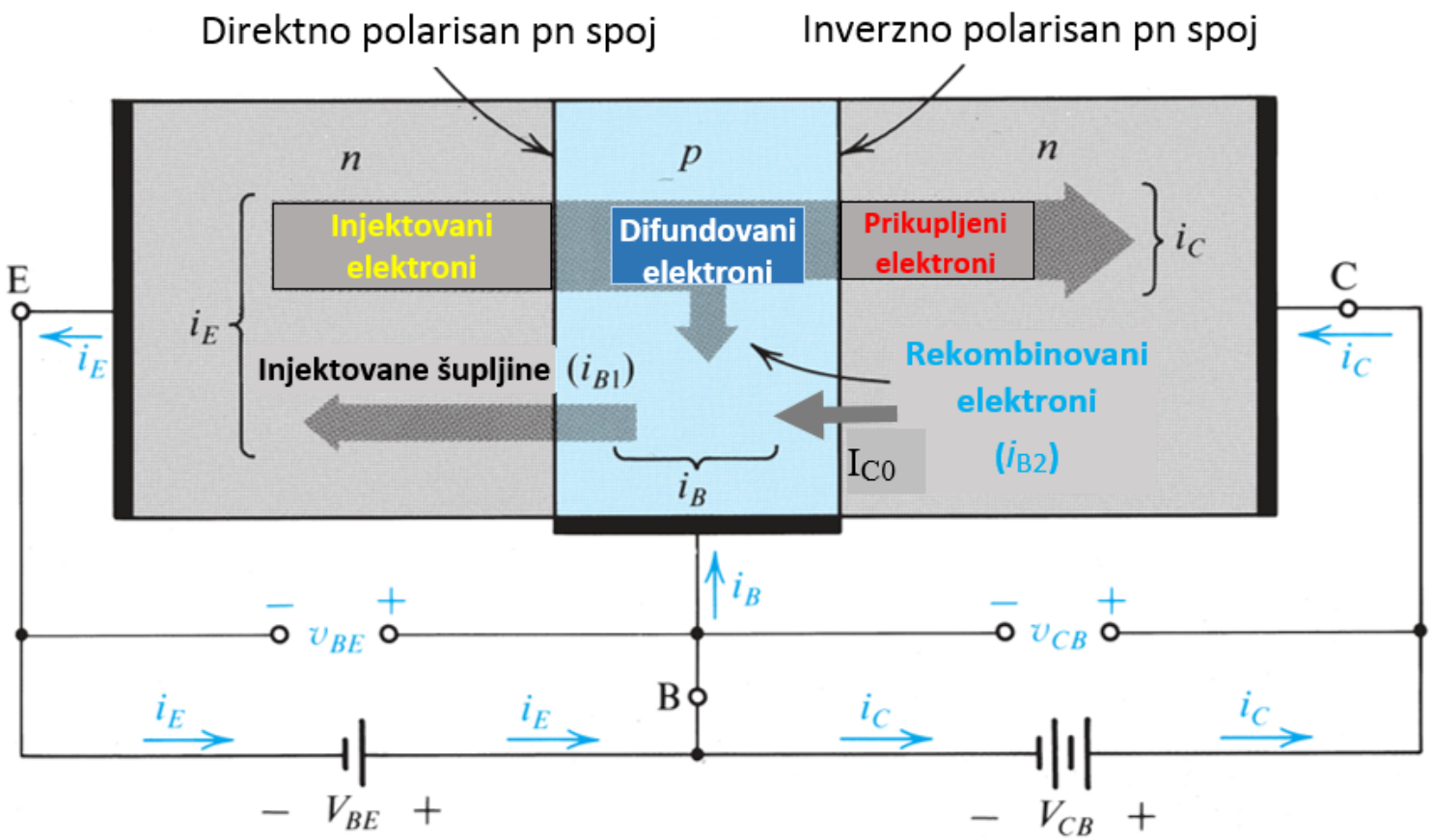
Bipolarni tranzistor sadrži tri oblasti: emitor, baza kolektor. Između baze i emitora je **emitorski pn spoj**, a između baze i **kolektora kolektorski pn spoj**.



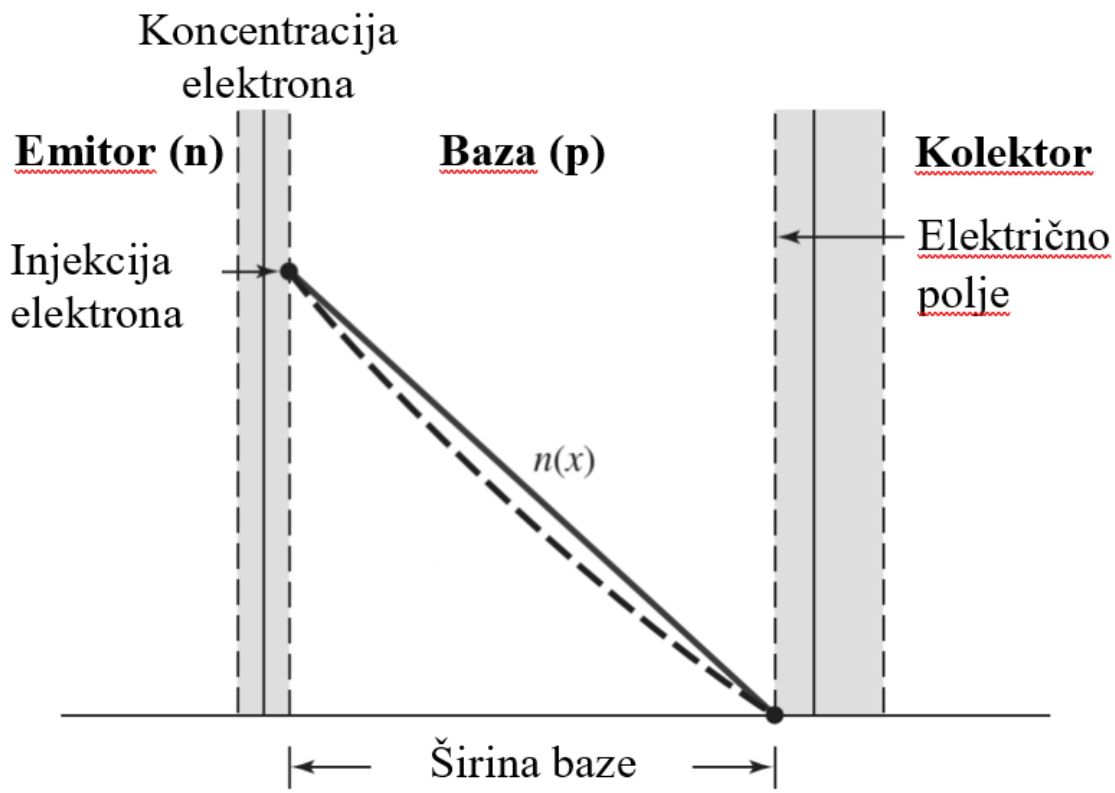
Širina baze bipolarnog tranzistora je veoma mala, reda nekoliko destina mikrometara, i znatno manja od ostalih oblasti. S obzirom da su dva pn spoja bipolarnog tranzistora veoma blizu jedan drugog funkcionisanje tranzistora nije moguće svesti na dve redno vezane diode. Naziv bipolarni tranzistor potiče od činjenice da su nosioci naelektrisanja u oba tipa tranzistora (npn i pnp) i šupljine i elektroni.

Slika prikazuje komponente struja **npn tranzistora** kada je emitorski pn spoj polarisan direktno a kolektorski inverzno. Ovakva polarizacija pn spojeva odgovara **aktivnom režimu rada**, koji se primenjuje za pojačanje signala.

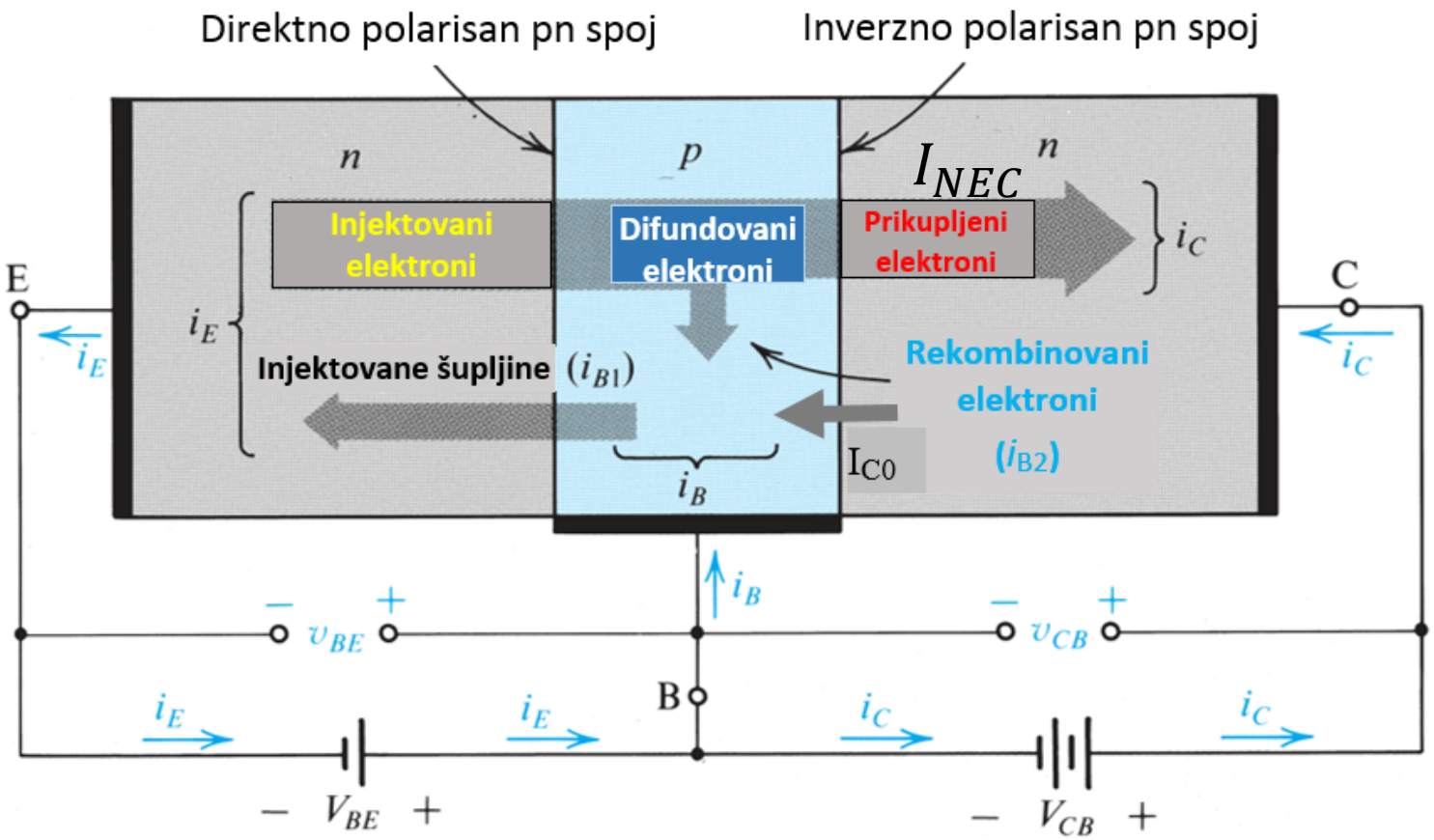
Bipolarni tranzistor nije simetrična komponenta u električnom smislu. Koncentracije nosilaca u pojedinim oblastima značajno se razlikuju. Najveća koncentracija nosilaca naelektrisanja je u emitoru, a najmanjama u kolektoru. Zbog znatno veće koncentracije elektrona u emitoru u odnosu na koncentraciju šupljina u bazi, na emitorskom pn spoju će struja šupljina biti znatno manja u odnosu na struju elektrona.



Kao posledica direktne polarizacije emitorskog pn spoja koncentracija elektrona u bazi na granici emitorskog pn spoja biće eksponencijalno srazmerna naponu v_{BE}. Isto tako usled inverzne polarizacije kolektorskog pn spoja koncentracija elektrona u bazi na granici kolektorskog pn spoja će biti približno nula. Ova velika razlika u koncentraciji elektrona duž baze dovodi do njihovog difuzionog kretanja (kretanje koje nastaje usled razlike u koncentraciji nosiclaca naelektrisanja) duž baze od emitorskom ka kolektorskom pn spoju. Kada elektroni iz emitora dospeju do kolektorskog pn spoja oni bivaju prikupljeni u oblast kolektora električnim poljem na kolektorskom pn spoju. U kolektoru su elektroni većinski nosioci i kreću pod dejstvom električnog polja.



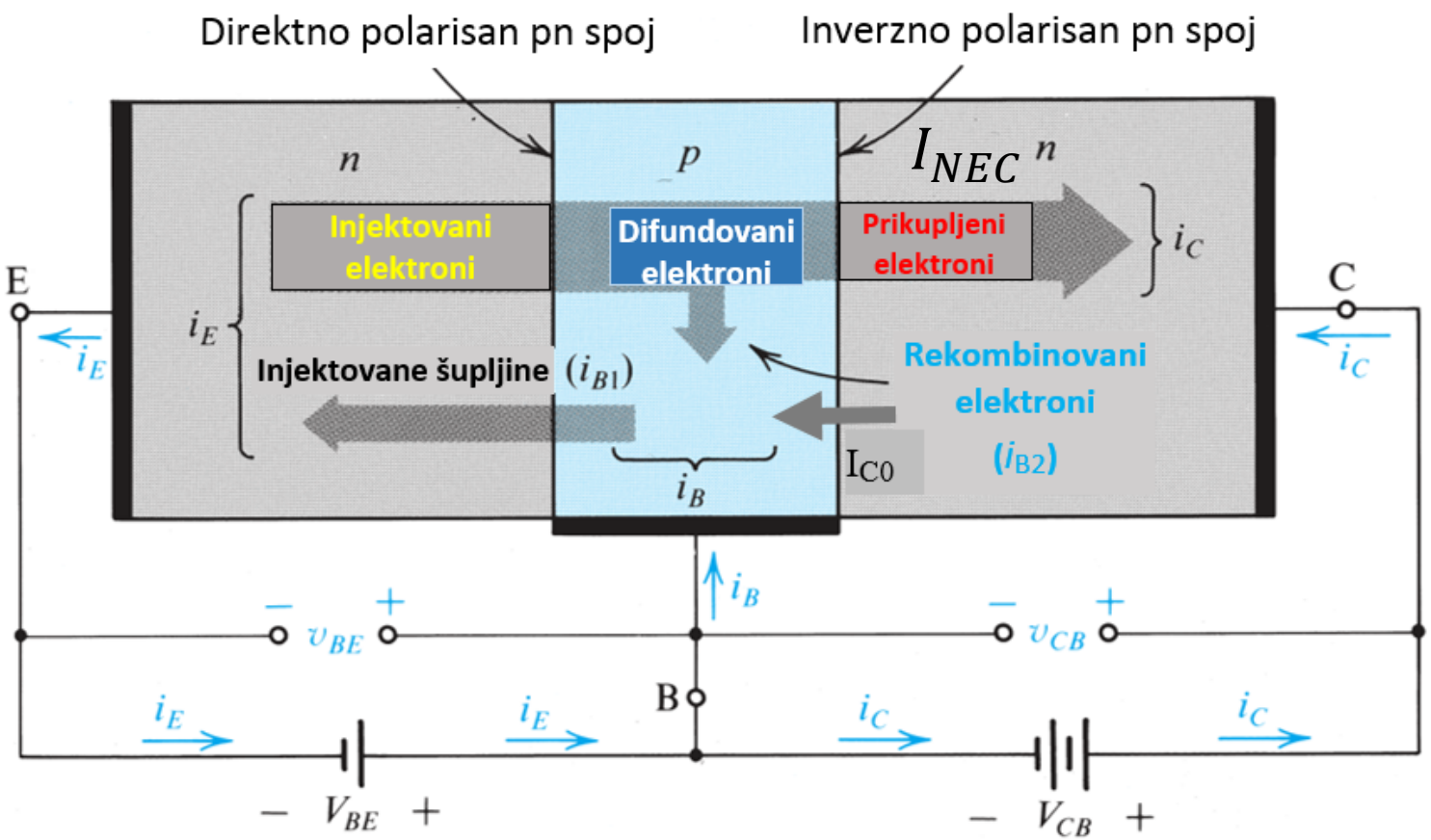
Bipolarni tranzistor je konstruisan na takav način da u aktivnom režimu rada najveći deo struje kolektora čine većinski nosioci naleketrisanja emitora (u ovom slučaju elektrona) koji su prošli kroz emitorski i kolektorski pn spoj i doprli do kolektora, I_{NEC}. Ovo se postiže malom širinom oblasti baze kao i takvom koncentracijom primesa da je najviše dopiran emitor a najmanje kolektor.



Odnos struje koju čine većinski nosioci naleketrisanja emitora koji su došli do kolektora (u slučaju npn tranzistora elektorni) i ukupne struje emitora je **koeficijent strujnog pojačanja u sprezi sa zajedničkom bazom, α**:

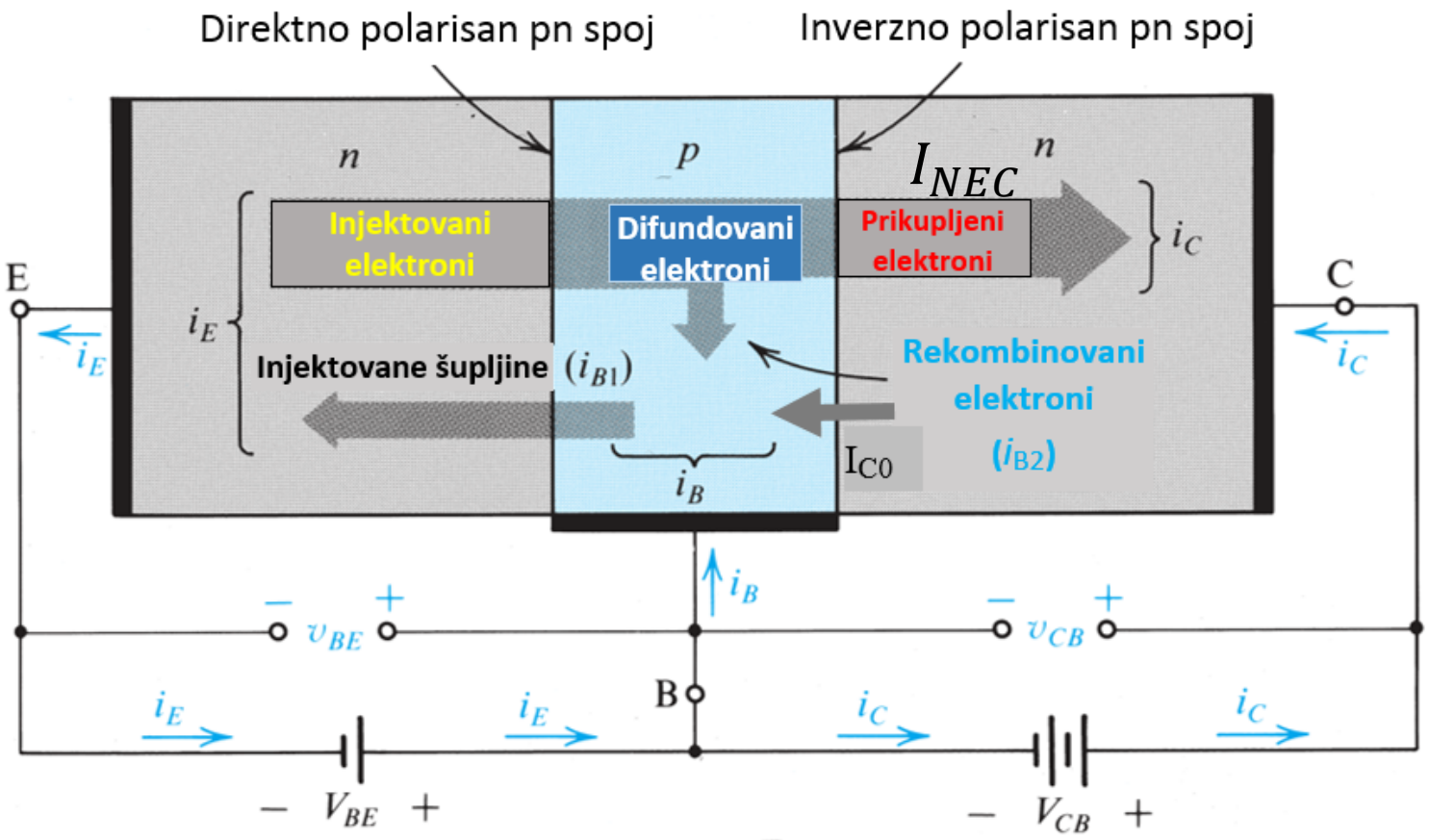
$$I_{NEC} = \alpha \cdot I_E$$

Tipična vrednost α je manja od 1 i približno jednaka 1.



Kada transistor radi u aktivnom režimu rada najveći deo struje kolektora čine većinski nosioci naelektrisanja emitora koji su došli do kolektora. Drugu komponentu struje kolektora čini inverzna struja zasićenja kolektorskog pn spoja, I_{CO}, koja potiče od nosilaca naelektrisanja u bazi i kolektoru.

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{Co}$$



Polazeći od uvedenih smerova za struje tranzistora (struja emitora ističe, struja baze i struja kolektora utiču) i Kirhofovog zakon za struje dolazimo do veze između struja bipolarnog tranzistora

$$I_E = I_C + I_B$$

Kada se gornja jednačina zameni u $I_C = \alpha \cdot I_E + I_{Co}$ dobija se:

$$I_C = \frac{I_{C0}}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B$$

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

$$\boxed{I_C = \beta \cdot I_B + (1+\beta) \cdot I_{C0}}$$

β je **koeficijent strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkim emitorom**.

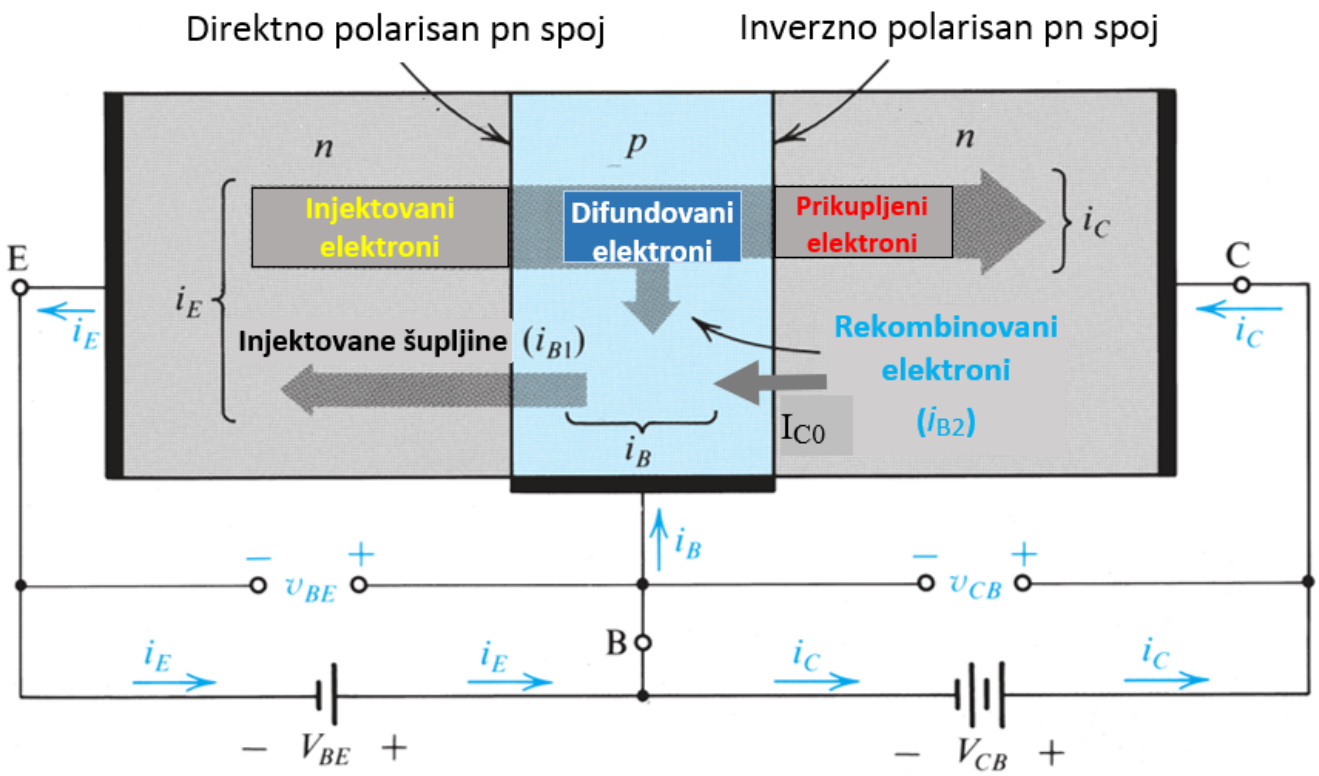
Struja difuzije elektrona u oblasti baze je srazmerna priraštaju koncentracije elektrona duž baze (slika na slajdu 5):

$$I_n \sim \frac{dn}{dx} \quad \Rightarrow \quad I_n \sim \frac{n_p(0)-n_p(w)}{w} \qquad I_n \sim \frac{n_{po}e^{VBE/VT}-0}{w}$$

Gde je: w širina baze, n_{po}- koncentracija elektrona u bazi kada pn tranzistor nije polarisan
Odavde sledi da se struja difuzije elektrona u bazi može izraziti kao:

$$I_n \sim e^{VBE/VT}$$

S obzirom da između struje difuzije u bazi i struje kolektora postoji srazmera izražena preko koeficijenta strujnog pojačanja sledi da struju kolektora možemo da izrazimo kao eksponencijalnu funkciju od napona izmedju baze i emitora.

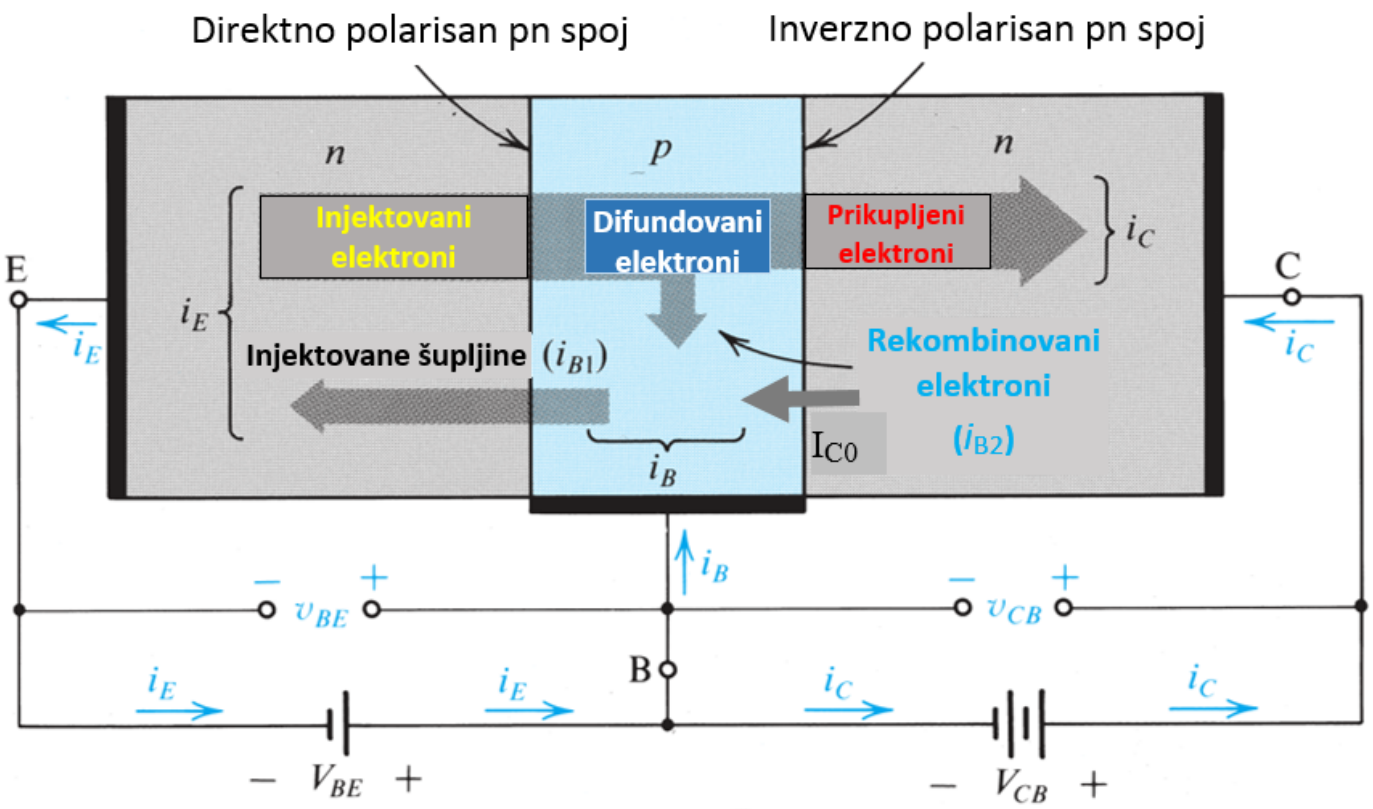


Struja nosilaca naelektrisanja koji su iz emitora injektovani u bazu predstavlja struju direktno polarisanog pn spoja. To znači da je struja elektrona injektovanih iz emitora u bazu eksponenecijalna funkcija od napona na pn spoju $I_n \sim e^{VBE/VT}$. S obzirom da između ove struje i struje kolektora postoji srazmera sledi da struju kolektora možemo da izrazimo kao:

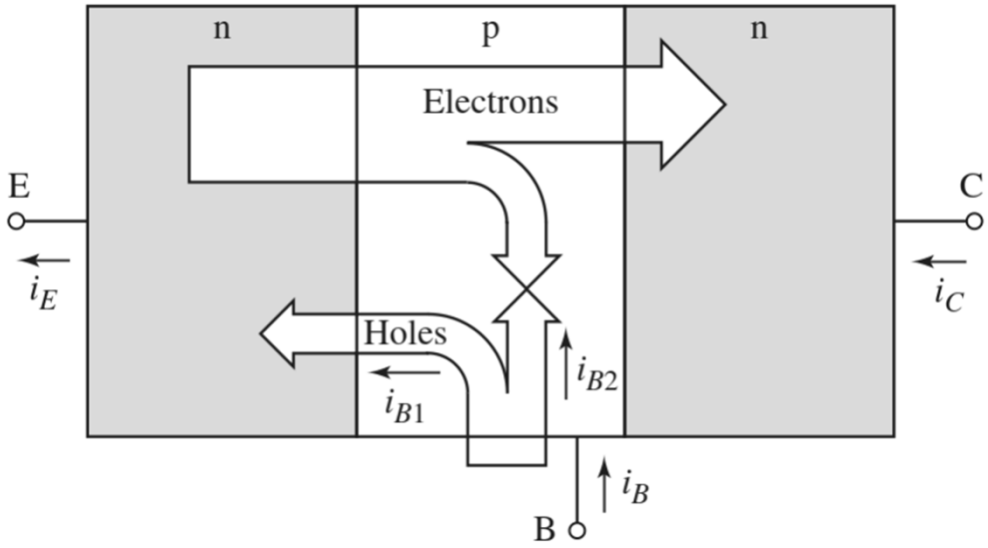
$$\boxed{i_C = I_S \cdot e^{VBE/VT}}$$

gde je I_S konstanta čija vrednost zavisi od dimenizija tranzistora (širine baze i površine poprečnog preseka) i koncetracije nosilaca naelektrisanja u bazi i emitoru.

Struja kolektora zanemarljivo zavisi od napona na kolektorskom pn spoju. **Tranzistor se na izlaznim priključcima ponaša kao strujni generator kontrolisan ulaznim naponom v_{be}.**

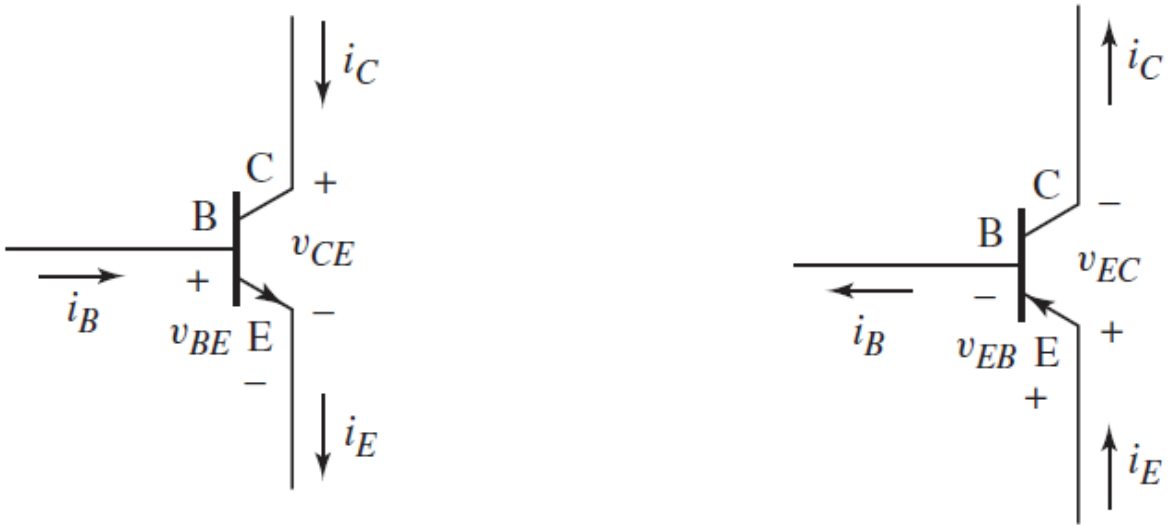


Struja baze ima dve komponente. Prvu komponentu, I_{B1}, čine većinski nosioci baze koji se usled direktne polarizacije emitorskog pn spoja kreću prema emitoru (u slučaju npn tranzistora to su šupljine). Drugu komponentu struje baze, I_{B2}, čine nosioci naleketrisanja koji dolaze u područje baze od spolja da bi nadomestili one nosioce naelektrisanja koji su anulirani rekombinacijom. Obe ove komponente struje su eksponencijalna funkcija napona na emitorskom pn spoju, vbe. Odavde sledi da se struja baze menja u zavisnosti od napona v_{BE} po eksponencijalnom zakonu: $i_B \propto e^{V_{BE}/V_T}$.



Smer struja

Prilikom jednosmerne analize tranzistora najčešće se usvajaju **prirodni smerovi struja tranzistora**, odnosno smerovi struja za koje se uvek dobija pozitivna vrednost u aktivnom režimu rada. Ovi smerovi struja se razlikuju kod npn i pnp tranzistora. Kod npn tranzistora prirodan smer struje emitora je takav da struja ističe, odnosno odgovara smeru strelice na simbolu. Struja kolektora i struja baze npn tranzistora imaju suprotan smer u odnosu na struju emitora, odnosno utiču u tranzistor. Prirodni smerovi struja pnp tranzistora su suprotni u odnosu na prirodne smerove struja npn tranzistora.



npn pnp

Model za velike signale

Prenosna karakteristika bipolarnog tranzistora je: $I_C = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_T}$

$$I_C = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

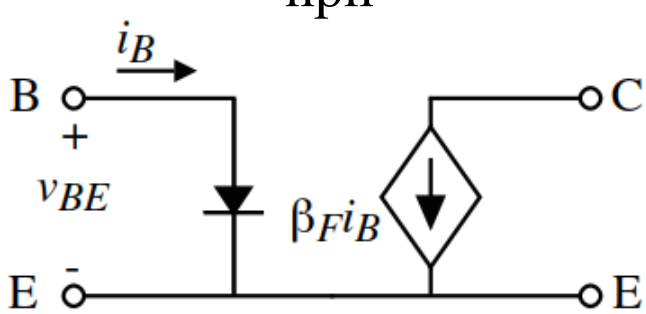
$$I_B = \frac{I_S}{\beta} \cdot e^{V_{BE}/V_T}$$

I_S parametar čija vrednost zavisi od dimenzija tranzistora i koncentracija primesa u bazi.

Ova eksponencijalna zavisnost se modelira kao dioda između baze i emitora.

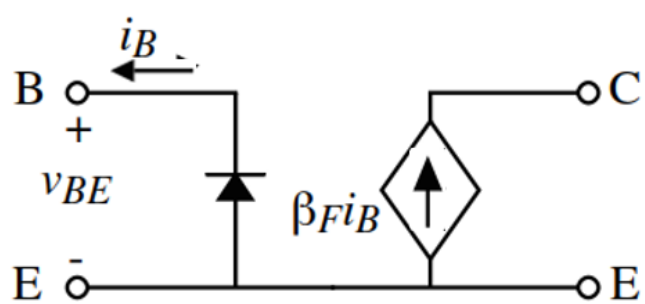
Model za velike signale sadrži diodu između baze i emitora i strujni generator kontrolisan strujom između kolektora i emitora.

npn



$$i_B = \frac{I_s}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_t}\right)$$

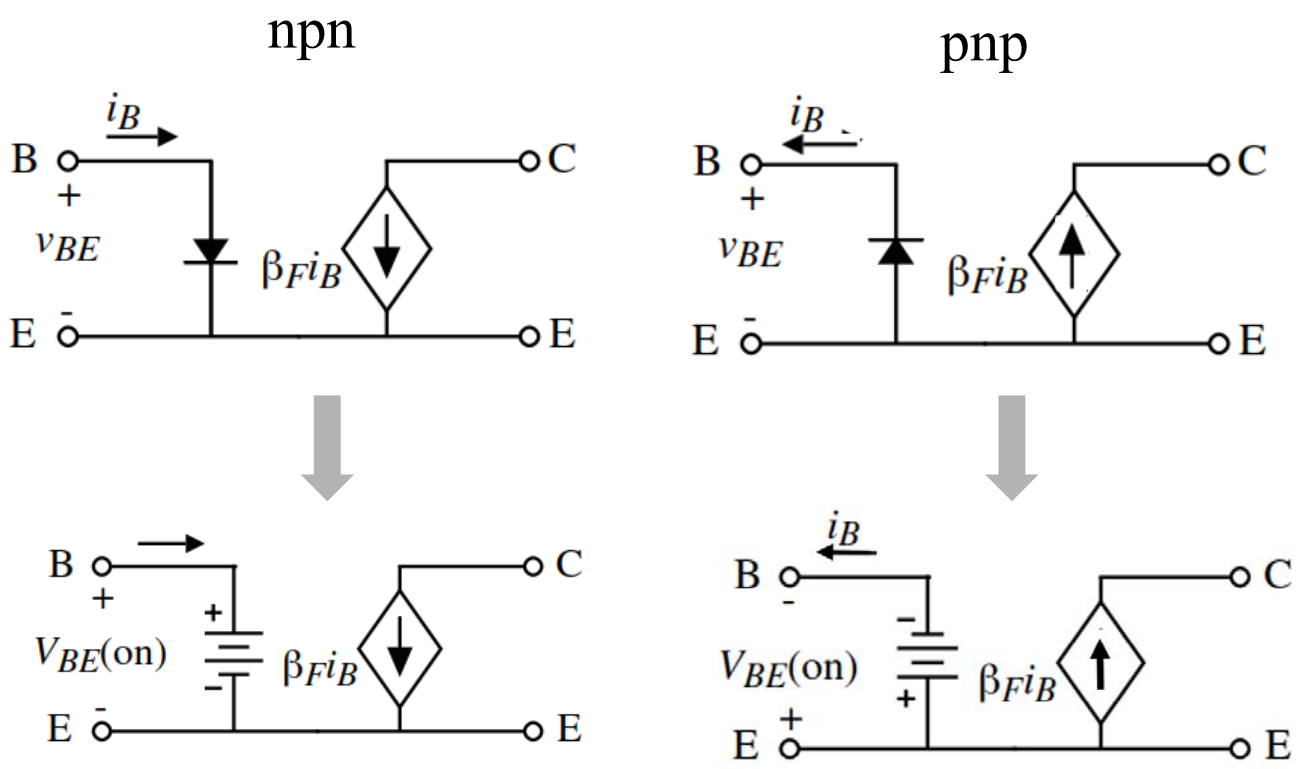
pnp



$$i_B = -\frac{I_s}{\beta_F} \exp\left(-\frac{v_{BE}}{V_t}\right)$$

Model za velike signale

Ukoliko pretpostavimo da je kolo takvo da promene struje baze zanemarivo utiču na napon između baze i emitora v_{BE}, diodu u emotorskoj pn spoju možemo da zamenimo naponskim generatorom V_{BE}. U najvećem broju slučajeva ova aproksimacija je opravdana.



Erlijev efekat

Kada se u aktivnom režimu rada menja inverzni napon polarizacije kolektorskog pn spoja v_{CB}, dolazi do promene širine prelazne oblasti između baze i kolektora. Što je veći napon inverzne polarziacije šira je prelazna oblast kolektorskog pn spoja. Posledica širenja prelazne oblasti kolektorskog pn spoja je da se sužava efektivna širina baze. Usled toga smanjuje se rekombinacija nosilaca koji su injektovani iz emitora u bazu, što dalje ima za posledicu povećanje struje kolektora.

Efekat promene struje kolektora sa promenom napona inverzne polarizacije kolektorskog pn spoja naziva se **Erlijev efekat**. Ovaj efekat se modeluje sledećom jednačinom:

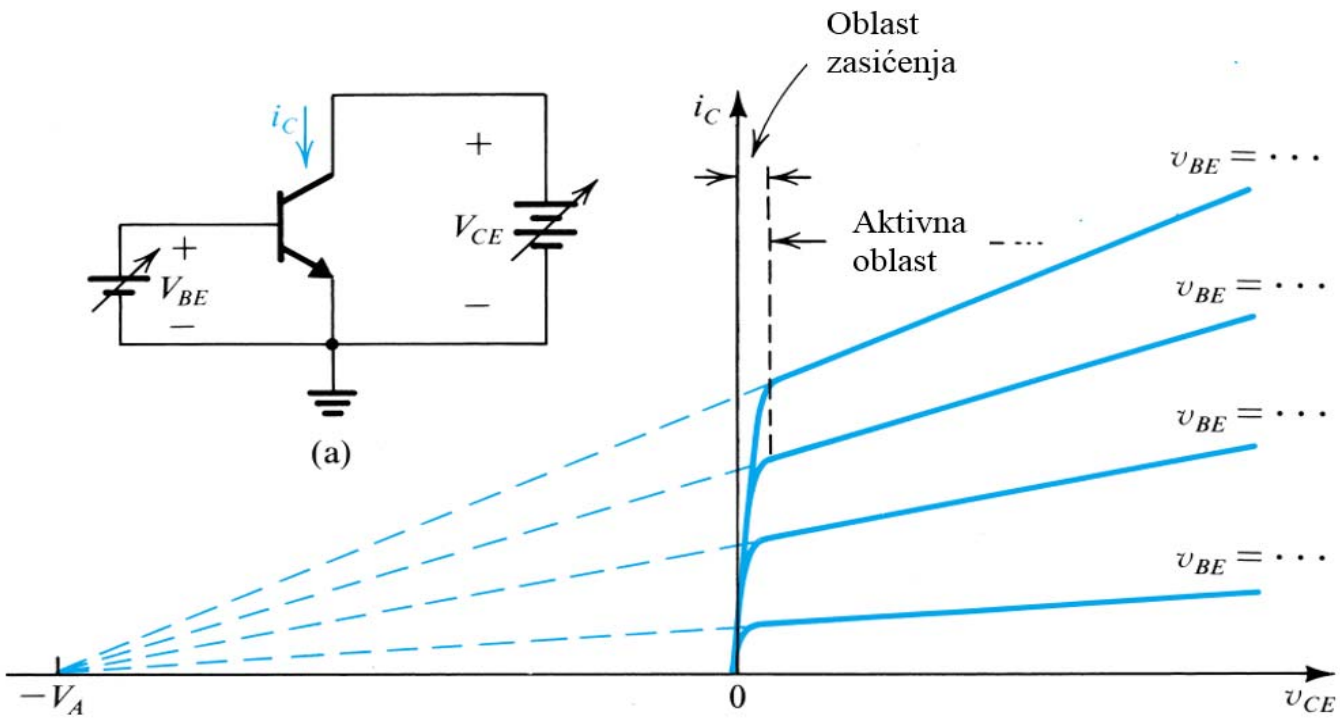
$$I_C = I_S \cdot \left(e^{V_{BE}/V_T}\right) \cdot \left(1 + \frac{V_{CB}}{V_A}\right)$$

parametar V_A je Erlijev napon

Erlijev efekat

Vrednost Erlijevog napona se kreće u opsegu od 50 do 300 V. Ukoliko promene napona V_{CE} nisu velike Erlijev efekat može da se zanemari. S obzirom da je u aktivnom režimu rada najčešće $V_{BE} << V_{CB}$ u praksi se koristi nešto izmenjena jednačina za modelovanje Erlijevog efekta u kojoj je VCB zamenjeno sa izlaznim naponon V_{CE}.

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



Erlijev efekat

Zavisnost struje kolektora od napona V_{CE} modelira se **izlaznom otpornošću**, $\boldsymbol{r_o}$, koja se određuje kao:

$$r_o = \left.\frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C}\right|_{V_{BE} = const}$$

Iz izraza

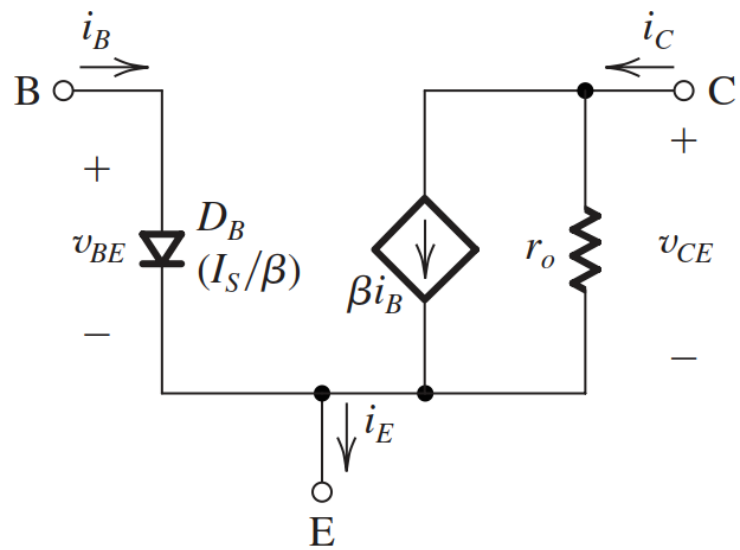
$$I_C = I_S \cdot \left(e^{V_{BE}/V_T}\right) \cdot \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

sledi da je izlazna otpornst jednaka:

$$r_o = \left(\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}}\right)^{-1} = \left(\frac{I'_C}{V_A}\right)^{-1} = \frac{V_A}{I'_C}$$

gde je I'_C struja kolekotra u radnoj tački kada nebi postojao Erlijev efekat.

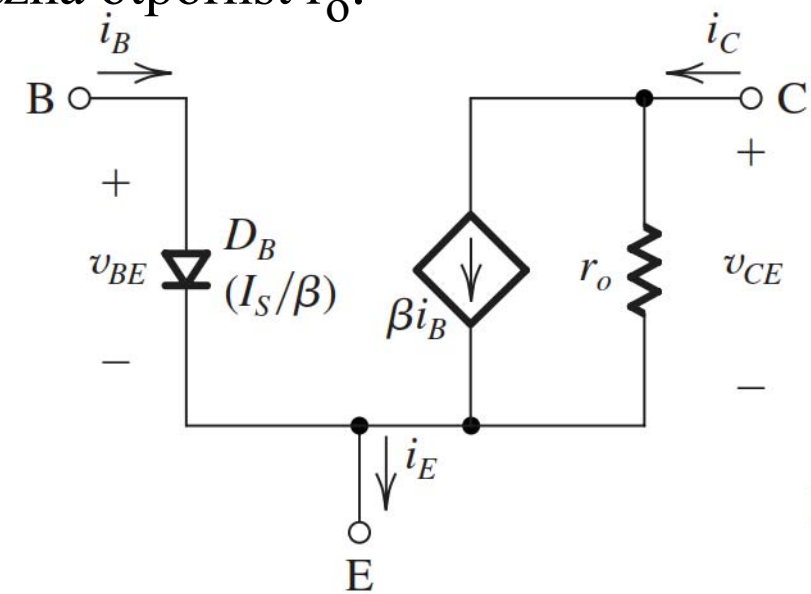
$$I'_C = I_S \cdot \left(e^{V_{BE}/V_T}\right)$$

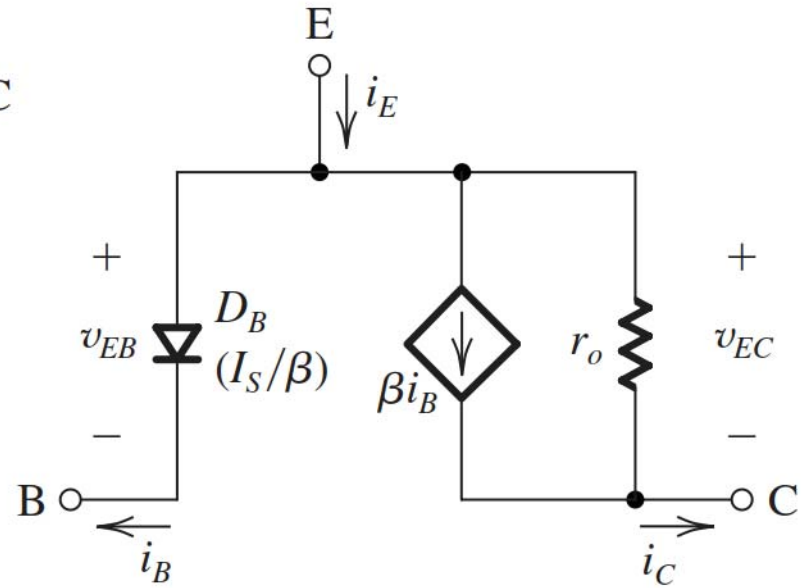


$$\boxed{r_o = \frac{V_A}{I'_C}}$$

Model za velike signale

Ukoliko se uzme u obzir Erlijev efekat modelu za velike signale se dodaje izlazna otpornst r_o.





$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right)e^{v_{BE}/V_T}$$

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

$$r_o = V_A/(I_S e^{V_{BE}/V_T})$$

$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right)e^{v_{EB}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T}\left(1 + \frac{v_{EC}}{|V_A|}\right)$$

$$r_o = |V_A|/(I_S e^{V_{EB}/V_T})$$

Režimi rada tranzistora

Režim zakočenja i zasićenja imaju primenu u digitalni elektronskim kolima. U analognim elektronskim kolima koristi se aktivni režim rada jer u tom režimu rada tranzistor obavlja funkciju pojačanja signala. Inverzni aktivni režim nema primenu u elektronici.

Režim Rada	Emitorski pn spoj	Kolektorski pn spoj
Zakočenje	Inverzno polarisan	Inverzno polarisan
Aktivni	Direktno polarisan	Inverzno polarisan
Inverzni aktivni	Inverzno polarisan	Direktno polarisan
Zasićenje	Direktno polarisan	Direktno polarisan

Režimi rada tranzistora

Zakočenje tranzistora nastupa kada je struja emitora jednaka nuli. To praktično znači da će proticati samo struja inverznog zasićenja, I_{C0}, na kolektorskom pn spoju i da će struja baze biti jednaka struji kolektora.

$$I_E = 0$$

$$I_C = -I_B = I_{C0}$$

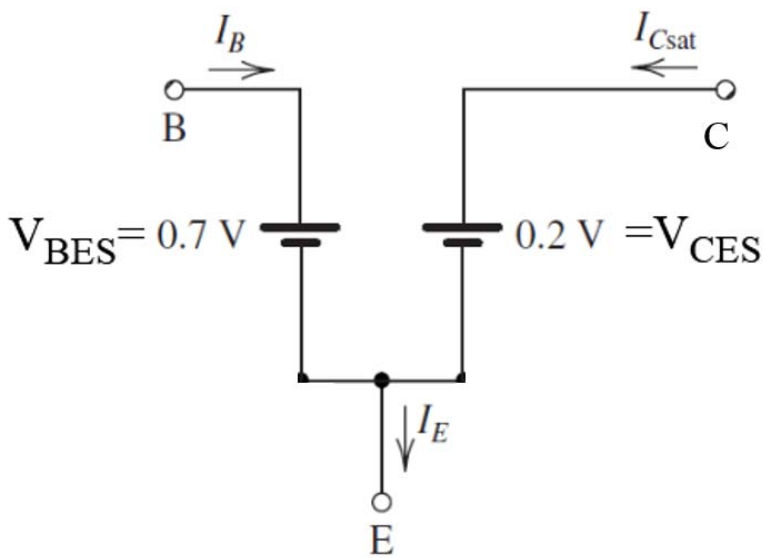
Ukoliko je struja baze jednka nuli tranzistor neće automatski biti u zakočenju. U tom slučaju struja kolektora germanlijumskog tranzistora biće dosta veća od inverzne struje zasićenja, dok će kod silicijumkog tranzistora struja kolektora biti približno jednaka inverznoj struji zasićenja.

Režimi rada tranzistora

Kada je tranzistor u zasićenju oba pn spoja su direktno polarisana. Napon na direktno polarisanom emitorskom pn spoju biće veći nego napon na direktno polarisanom kolektorskom pn spoju zato što je emitor jače dopiran. Tipične vrednosti ovih napona su V_{BES}=0,7 V i V_{BCS}=0,5 V.

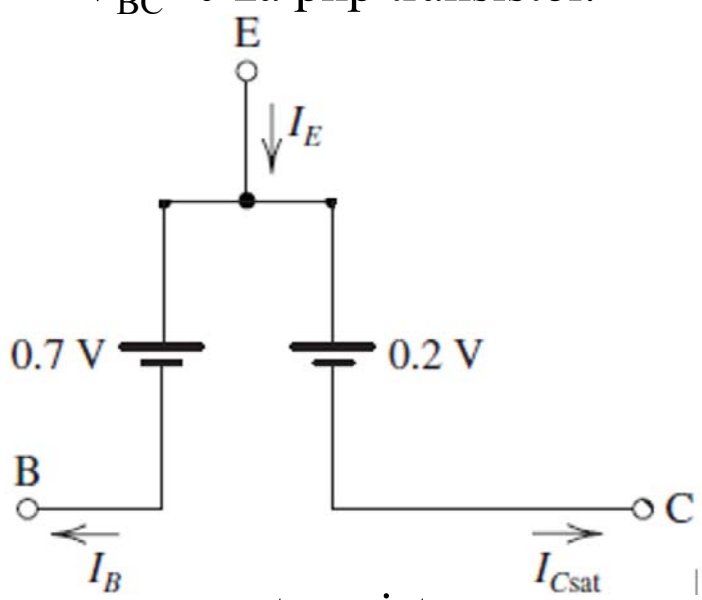
Direktno polarisani pn spojevi se modeliraju naponskim generatorima pri čemu se u modelu umesto naponskog generatora V_{BCS} navodi napon između kolektora i emitora u zasićenju: $V_{CES}=V_{BES}-V_{BCS}$ =0,2 V. Smatra se da je tranzistor u zasićenju kada je:

$V_{BC}>0$ za npn, odnosno



npn tranzistor

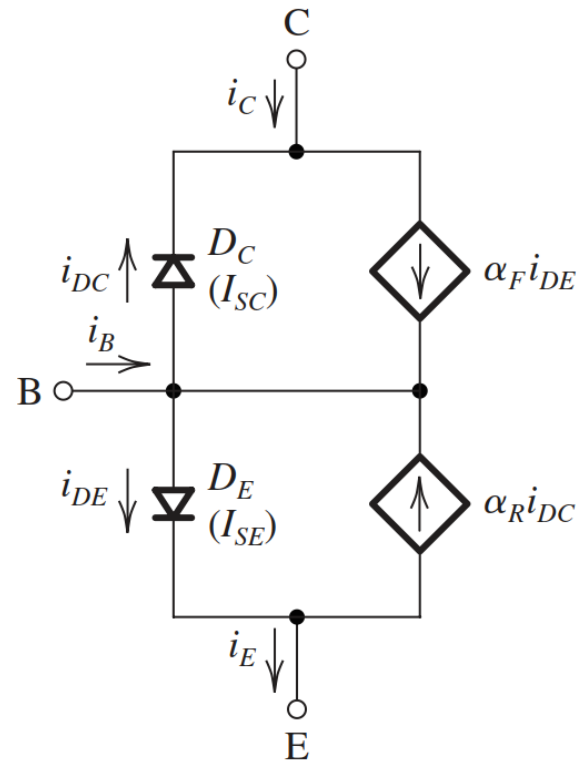
$V_{BC}<0$ za pnp transistor.



pnp tranzistor

Ebers-Molov model

Ebers-Molov model se zasniva na superpoziciji struja pn spojeva tranzistora. Model sadrži dve idealne diode i dva strujna generator kontrolisana strujom. Svaki od ova četiri elementa prikazuje određenu komponentu struje. Diode modeluju struju koju čine nosioci naelektrisanja iz oblasti koje sačinjavaju pn spoj. Sa druge strane strujni generatori kontrolisani strujom modeluju komponentu struje kroz pn spoj koju čine nosioci naelektrisanja koji su dospeli iz oblasti koja ne pripada pn spoju.



$$I_E = I_{DE} - \alpha_R \cdot I_{DC}$$

$$I_C = -I_{DC} + \alpha_F \cdot I_{DE}$$

α_F je **koeficijent strujnog pojačanja** za spregu sa zajedničkom bazom **u aktivnoj oblasti** (emitorski pn spoj direktno polarisan, kolektorski inverzno),

α_r je **koeficijent strujnog pojačanja** za spregu sa zajedničkom bazom **u inverzno aktivnoj oblasti** (kolektorski pn spoj direktno polarisan, emitorski inverzno)

Ebers-Molov model

Nakon primene Šoklijeve jednačine za pn spoj

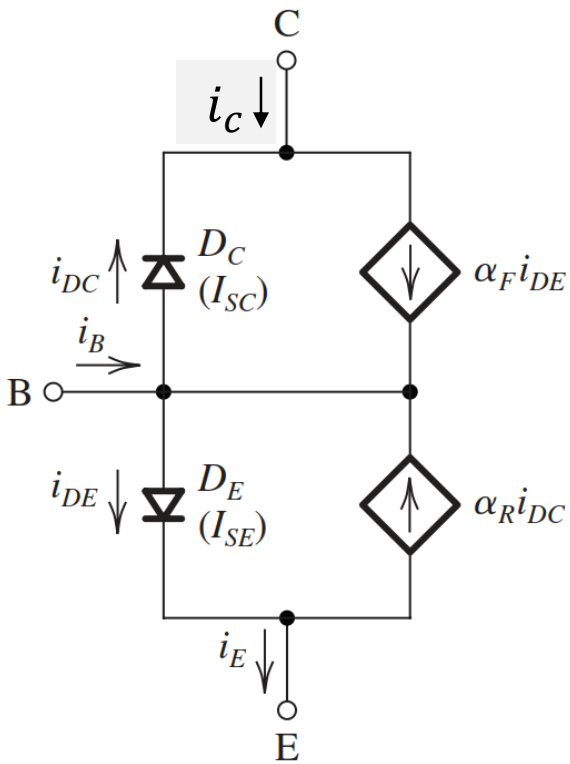
$$i_{DC} = I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right)$$

$$i_{DE} = I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right)$$

dolazimo do sledećih izraza za Ebers-Molov model:

$$i_E = I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) - \alpha_R \cdot I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right)$$

$$i_C = -I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right) + \alpha_F \cdot I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right)$$



I_{CS} je inverzna struja zasićenja kolektorskog pn spoja kada je emitorski pn spoj kratkospojen.

I_{ES} je inverzna struja zasićenja emitorskog pn spoja kada je kolektorski pn spoj kratko spojen.

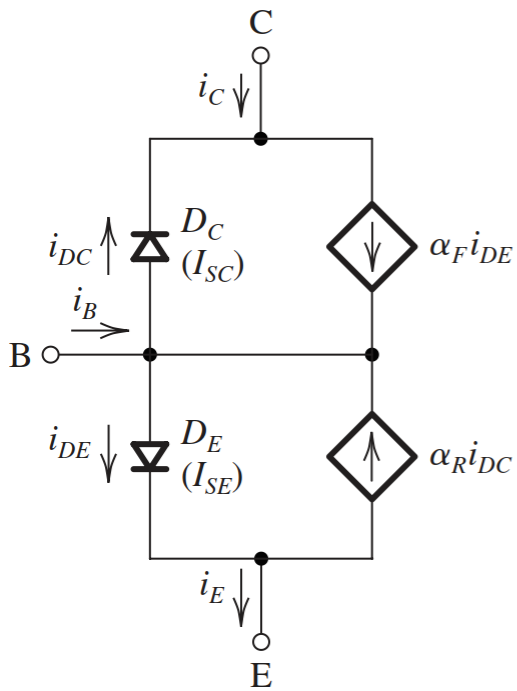
Ebers-Molov model

Ebers-Molov model važi za sva četiri režima rada tranzistora.

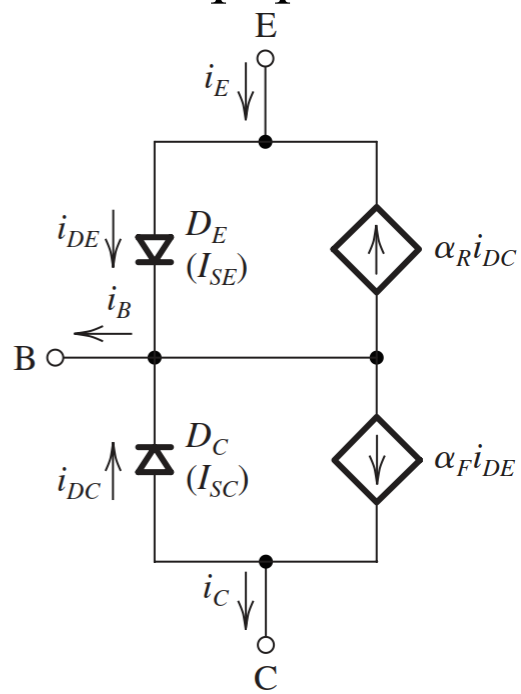
Inverzne struje zasićenja oba pn spoja i koeficijenti strujnog pojačanja za dva režima rada su međusobno povezani sledećom jednačinom.

$$\alpha_F \cdot I_{ES} = \alpha_r \cdot I_{CS}$$

npn

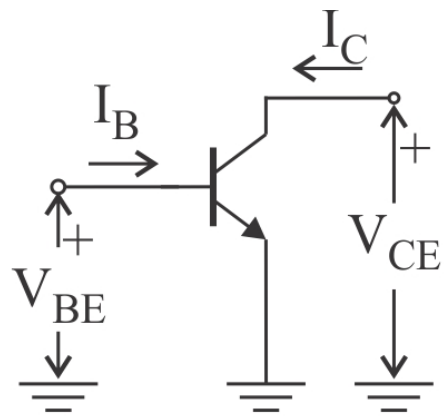


pnp



Aktivni četvoropol

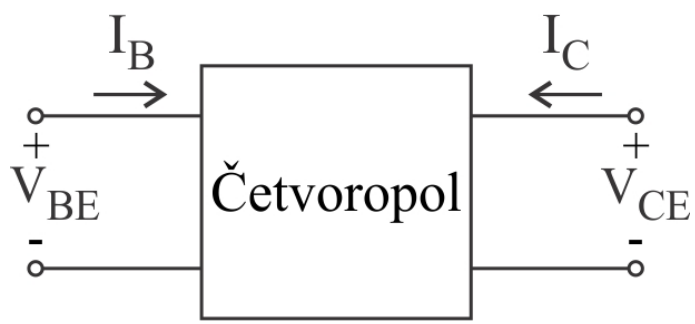
Tranzistor u bilo kojoj konfiguraciji (sprezi) predstavlja **aktivni četvoropol**, što znači da je opisan sa dve karakteristike. Prilikom kreiranja karakteristika dve od ukupno četiri veličine četovorpola su nezavisno promenjive, a dve su zavisno promenjive. Kada se razmatra sprega sa zajedničkim emitorom usvaja se da nezavisno promenjive budu ulazna struja (struja baze, i_B) i izlazni napon (napon kolektor-emitor, v_{CE}). Mogu se snimiti i drugačije zavisnosti između napona i struja sprege sa zajedničkim emitorom, ali se u praksi koriste ove jer su najjednostavnije za merenje.



$$i_B = f_1(v_{BE}, v_{CE})$$

$$i_C = f_2(i_B, v_{CE})$$

Pošto su karakteristike tranzistora funkcije od dve promenjive one bi mogle da se predstavi u tri dimenzije ali se u praksi predstavljaju kao više karakteristika ili familija karakteristika. Svaka od karakterisitka u familiji karakteristika dobija se kada jedna od dve nezavisno promenjive ima konstantnu vrednost.

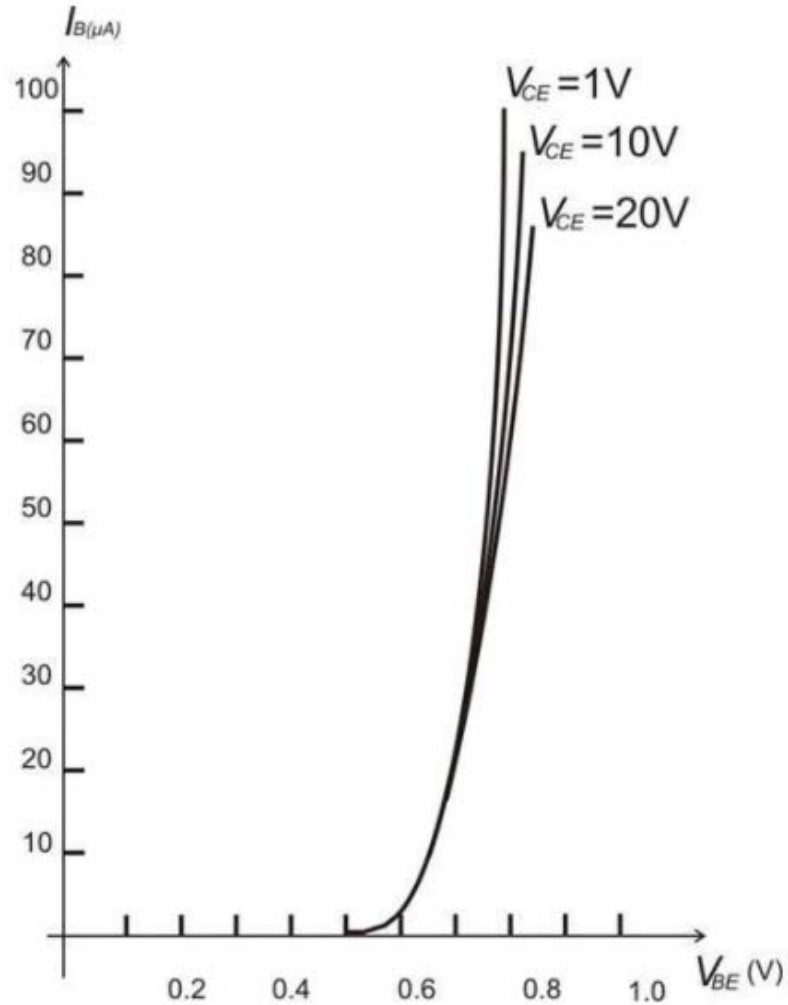


Ulazna karakteristika

Ulazna karakteristika daje zavisnost **ulazne struje**, i_B, od **ulaznog napona**, v_{BE}, pri čemu je **izlazni napona**, V_{CE}, konstantan. Ova karakteristika odgovara strujno naponskoj karakteristici diode. Struja baze se zanemarivo menja sa promenom vrednosti napona V_{CE}.

Za zadatu vrednost V_{BE} promene napona V_{CE} jednake su promenanama napona V_{CB}, jer je $V_{CE}=V_{BE}+V_{CB}$.

Kada se poveća napona inverzne polarizacije kolektorskog pn spoja, V_{CB}, dolazi do povećanja širine prelazne oblasti kolektorskog pn spoja i smanjenja efektivne širine baze. Samim tim smanjuje se rekombinacija nosilaca naelektrisanja u bazi i smanjuje struja baze.



Izlazna karakteristika

Izlazna karakteristika daje zavisnost **izlazne struje** (struje kolektora, $\boldsymbol{i_C}$) od **izlaznog napona** (napon kolektor-emitor, $\boldsymbol{v_{CE}}$) pri konstantnoj vrednosti **ulazne struje** (struja baze, $\boldsymbol{i_B}$). Kada je tranzistor u aktivnom režimu rada karakteristike su približno horizontalne i ravnomerno raspoređene zavisno od vrednosti struje baze. Na izlaznoj karaketistici se mogu uočiti oblasti polarizacije za koje je tranzistor u zasićenju, zakočenju ili aktivnoj oblasti rada. Tranzistor je u aktivnoj oblasti rada za vrednosti napona v_{CE} veće od nekoliko desetina volti (obično 0,2 V) i za struje kolektora veće od nule.

DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

POLARIZACIJA

- **Polarizacija** je postupak priključenja tranzistora na napajanje da bi se obezbedile odgovarajuće vrednosti jednosmernih napona i struja na tranzistoru.
- Jednosmerni naponi i struje podešavaju se izborom vrednosti jednosmernog naponskog generatora i otpornika u kolu.
- Potrebno je obezbediti da tranzistor bude u željenom režimu rada. Ukoliko tranzistor radi kao pojačavač onda je polarisan u aktivnoj oblasti rada.
- Od vrednosti jednosmerenih struja i napona tranzistora zavise parametri modela za naizmenični režim a samim tim i karakteristike pojačavača. Znači funkcija polarizacije nije samo da obezbedi odgovarajući režim rada tranzistora već i odgovarajuće vrednosti parametara za naizmenični režim.

DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

Stabilizacija radne tačke

- Jednosmerne struje i naponi u kolu menjaće se pod dejstvom spoljnjih faktora od kojih su najbitniji:
  - Promena temperature
  - Varijacije jednosmernog napajanja
  - Fabričke tolerancija u vrednostima parametara tranzistora i elemenata kola

- Uticaj temperature je posebno kritičan jer karakteristike bipolarnog tranzistora značajno zavise od temperature a mogu da dovedu do kumulativnog procesa koji prouzrokuje potpunu promenu radne tačke. Sa promenom temperature menjaju se sledeći parametri tranzistora:
  - Napon na emitorskom spoju $\boldsymbol{V_{BE}}$, (smanjuje se porastom temperature za 2mV/C^o)
  - Inverzna kolektorska struja zasićenja $\boldsymbol{I_{CO}}$, (uvećava se 2 puta pri porastu od 10 C^0)
  - Koeficijent strujnog pojačanja β.

DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

Stabilizacija radne tačke

- Jednosmerne struje i naponi u kolu menjaće se pod dejstvom spoljnjih faktora od kojih je najbitniji uticaj temperature. Kada poraste temperatura na tranzistoru dolazi do uvećanja struja tranzistora usled promene vrednosti parametara tranzistora (I_{CO}, β, V_{BE}).
- Uvećanje struja tranzistora dovodi do uvećanja snage dispacije na tranzistoru, P_D. Snaga disipacije je mera brzine kojom se električna energija pretvara u toplotnu. Kao posledica uvećanja snage disipacije temperatura se još više povećava i nastaje kumulativan proces u toku koga vrlo brzo poraste temperatura na tranzistoru. Dolazi do promene radne tačke tranzistora a u kranjem slučaju i do uništenja komponente usled pregrevanja.
- Jedan od zadataka polarizacije je da obezbedi **stabilnost radne tačke tranzistora** na promene temperature. Uticaj temperature na radnu tačku se prati preko promene jedne veličine a to je kolektorska struja I_C.

$$T \nearrow \;\Rightarrow\; \beta \nearrow,\; I_{CO} \nearrow, V_{BE} \nearrow \;\Rightarrow\; I_C \nearrow \;\Rightarrow\; P_D \nearrow \;\Rightarrow\; T \nearrow$$

DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

Stabilizacija radne tačke

• Stabilnost radne tačke tranzistora sagledava se preko zavisnosti kolektorske struje od temperature. Da bi se dobio analitički izraz za zavisnost struje kolektora od temperature potrebno je za dato kolo odrediti izvode struje kolektora po parametrima koji se menjaju sa temperaturom. Ovi parcijalni izvodi se nazivaju **koeficijenti stabilnosti kolektorske struje** (obeleženi sa S_I, S_V, S_β).

$$I_C = f\left(I_{CO,} V_{BE,} \beta\right)$$

$$\frac{dI_C}{dT} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \cdot \frac{dI_{C0}}{dT} + \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \cdot \frac{dV_{BE}}{dT} + \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \cdot \frac{d\beta}{dT}$$

$$S_I = \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \qquad S_U = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \qquad S_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta}$$

$$\frac{dI_C}{dT} = S_I \cdot \frac{dI_{C0}}{dT} + S_V \cdot \frac{dV_{BE}}{dT} + S_\beta \cdot \frac{d\beta}{dT}$$

$$\Delta I_C \approx \frac{dI_C}{dT} \cdot \Delta T = \left(S_I \frac{dI_{C0}}{dT} + S_V \frac{dV_{BE}}{dT} + S_\beta \frac{d\beta}{dT} \right) \cdot \Delta T$$

DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

Stabilizacija radne tačke

• U izrazu za priraštaj struje kolektora sa promenom temperature pojavljuju se koeficijenti stabilnosti kolektorske struje (S_I, S_V, S_β) i izvodi pojedinih parametara tranzistora po temperaturi (V_{BE}, I_{C0}, β).

$$\Delta I_C \approx \frac{dI_C}{dT} \cdot \Delta T = \left(S_I \frac{dI_{C0}}{dT} + S_V \frac{dV_{BE}}{dT} + S_\beta \frac{d\beta}{dT} \right) \cdot \Delta T$$

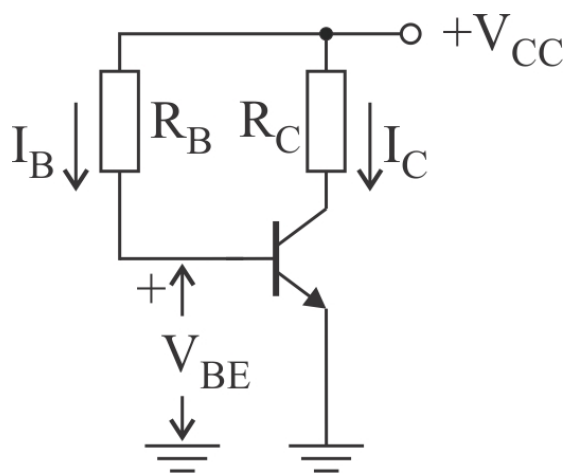
Izvodi parametara po temperaturi zavise od konstrukcije tranzistora i njih daje proizvođač. Na vrednosti ovih izvoda se ne može uticati.

Sa druge strane na koeficijente stabilnosti može se uticati jer zavise od konfiguracije kola i vrednosti komponenata. Oni praktično daju uvid u to na koji način pojedini elementi kola utiču na stabilnost radne tačke sa promenom temperature.

DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

Stabilizacija radne tačke

Prilikom sračunavanja koeficijenata temperaturne stabilnosti koristi se tačniji izraz za zavisnost struje kolektora od struje baze. Ovaj izraz uzima u obzir i uticaj inverzne struje zasićenja kolektorskog sopja I_{C0}. Vrednost ove struje je zanemariva u odnosu na struju baze ali se značajno menja sa promenom temperature.



$$\boxed{I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{C0}}$$

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

$$I_C = \frac{\beta (V_{CC} - V_{BE})}{R_B} + (1+\beta) I_{C0}$$

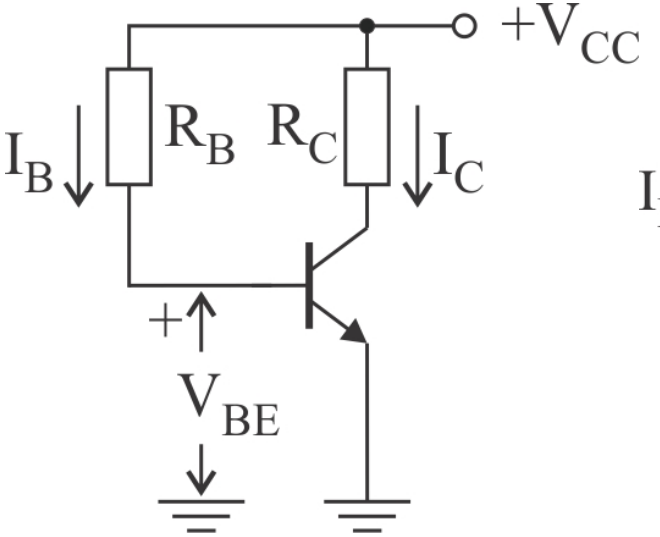
$$S_I = \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} = 1 + \beta; \qquad S_V = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = -\frac{\beta}{R_B};$$

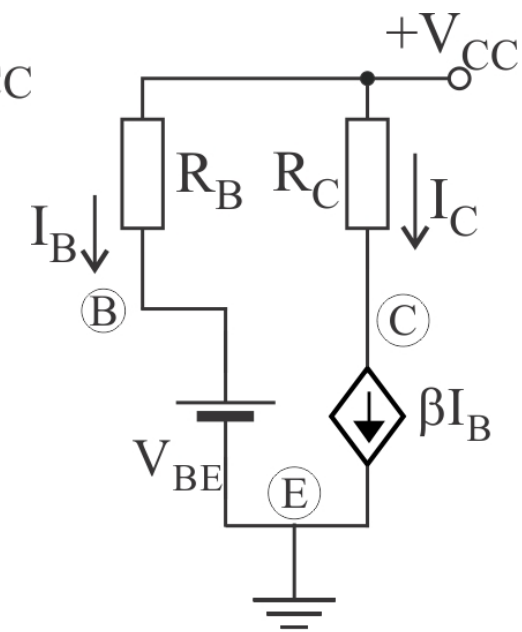
$$S_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_B} + I_{C0}$$

DC polarizacija

Osnovna polarizacija

- Jednosmerna analiza ovog kola može se uraditi primenom Kirhofovih zakona za struju i napon nakon što se tranzistor zameni modelom za velike signale.
- U praksi se umesto rešavanja nelinarne jednačine primenjuje aproksimativni model koji polazi od činjenice da se u aktivnom režimu rada napon između baze i emitora V_{BE} veoma malo menja.





Pri proračunu radne tačke najpre se odredi struja baze, nakon toga I_C i na kraju V_{CE}.

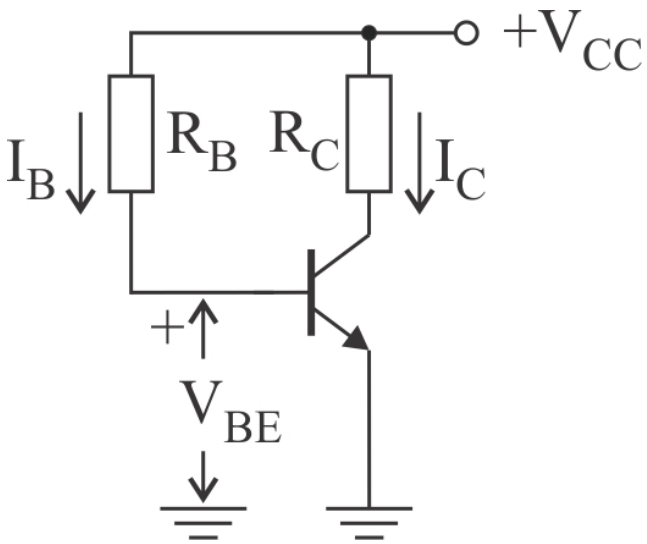
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot \beta \cdot I_B$$

DC polarizacija

Osnovna polarizacija

Ovo kolo je osetljivo na promene sledećih parametara tranzistora: V_{BE} i koeficijenta strujnog pojačanja β. Ta dva parametra tranzistora se značajno menjaju sa temperaturom. Zbog toga se ovaj tip polarizacije retko koristi u praksi.



$$\left.\begin{aligned} I_C &= \beta \cdot I_B \\ V_{BE} &= const \end{aligned}\right\} \text{Jednačine modela}$$

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

$$I_C = \beta \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot \beta \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

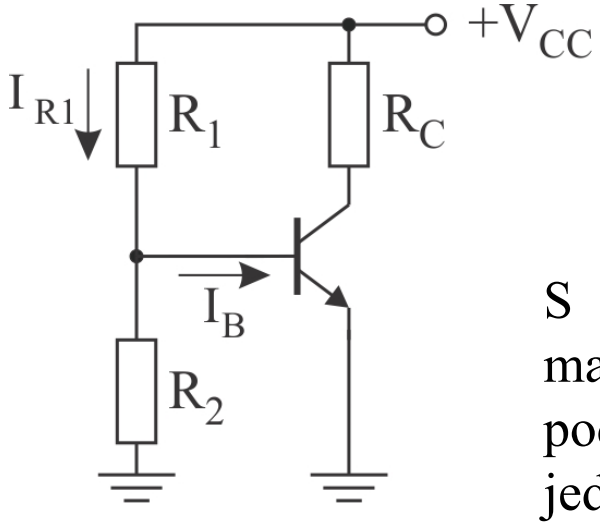
Prilikom porasta temperature menja se položaj radne tačke na taj način što se I_C povećava a V_{CE} smanjuje.

$$T \nearrow \ \beta \nearrow \ V_{BE} \searrow \implies I_C \nearrow V_{CE} \searrow$$

DC polarizacija

Polarizacija razdelnikom napona

Uvođenjem razdelnika napona u kolu baze dobija se znatno stabilinije kolo u odnosu na prethodno kolo ukoliko se otpornici R_1 i R_2 dimenzionišu na adekvatan način. Naime ove otpornosti bi trebale da budu što manje da napon između baze i emitora , V_{BE} nebi zavisio od struje baze, već samo od R_1, R_2 i V_{CC}. U tom slučaju važiće:



$$I_{R1}, I_{R2} \gg I_B$$

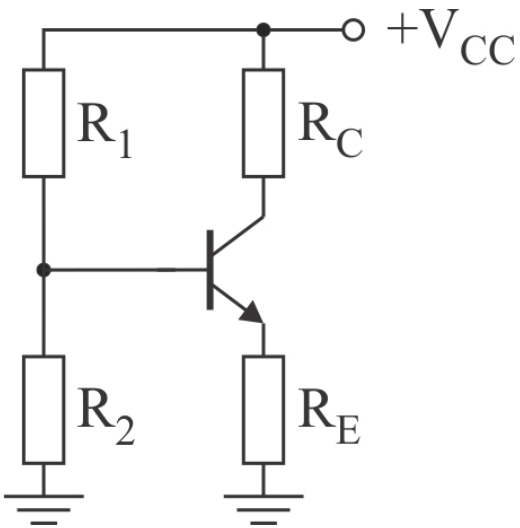
$$V_{BE} = V_B \approx V_{CC} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

S obzirom da napon na emitorskom spoju, V_{BE}, vrlo malo odstupa od nominalne vrednosti neophodno je podesiti odnos otpornika R_1 i R_2 tako da V_B u gornjoj jednačini za razdelnik napona bude približno 0,7 V. U suprotnom tranzistor neće biti u aktivnom režimu rada.

DC polarizacija

Polarizacija degeneracijom emitora

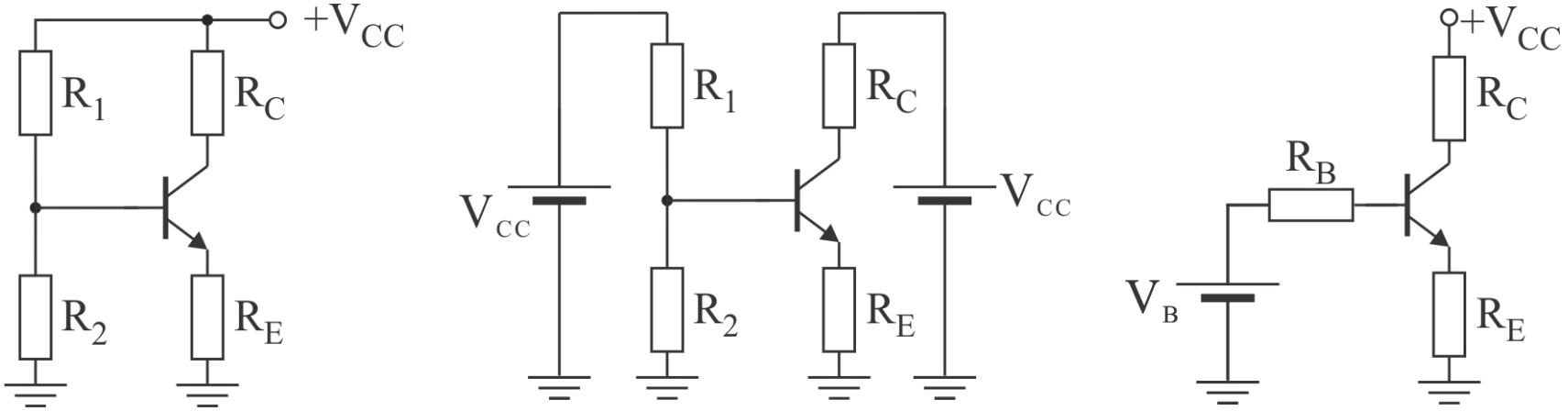
Uvođenjem otpornika R_E između emitora i mase uspostavlja se negativna povratna sprega za jednosmernu struju.



Negativna povratna sprega znači vraćenje signala sa izlaza na ulaz tako da se oduzima od ulaznog signala. U ovom slučaju izlaz je na emitoru a ulaz na bazi tranzistora. Negativnom povratnom spregom umanjuje se svaka promena signala na izlazu (pozitivna ili negativna). Ukoliko se iz bilo kojeg razloga poveća izlazna struja I_C doći će do povećanja pada napona na otporniku R_E, odnosno napona na emitoru, V_E. S obzirom da je napon na bazi približno konstantan (odredjen sa R_1i R_2) sledi da će doći do smanjenja ulaznog napona V_{BE}. Ovo dalje ima za posledicu da uvećanje struje I_C usled porasta temperature bude umanjeno.

$T \nearrow \quad \beta, I_{CO} \nearrow \quad I_C \nearrow \quad V_E \nearrow \quad V_{BE} \searrow \quad I_C \searrow$

DC polarizacija



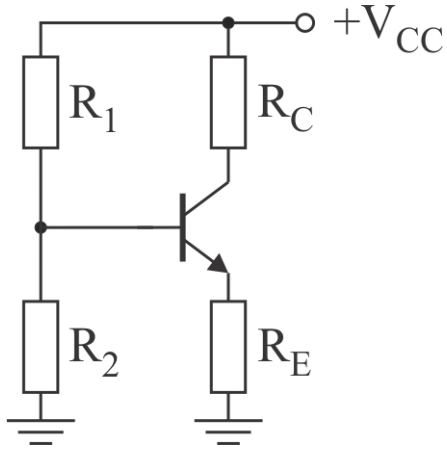
$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \qquad R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Ovo kolo se najjednostavnije analizira primenom Tevenenove teoreme na elemente povezene u kolu baze.

$$V_{BB} - R_B \cdot I_B - V_{BE} - R_E \cdot (1 + \beta) I_B = 0 \quad \Rightarrow \quad I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{(1 + \beta) \cdot R_E + R_B}$$

DC polarizacija

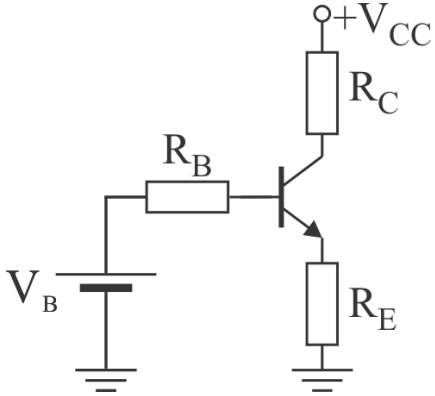
Ukoliko se smanji ekvivalentna Tevenenova otpornost dvopola na ulazu, RB, dobijamo da struja kolektora ne zavisi od β. To znači da je kolo mnogo stabilnije.



$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \qquad R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\boxed{R_1 || R_2 << (1+\beta) \cdot R_E} \quad \Rightarrow \quad I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{(1+\beta) \cdot R_E + R_B} \approx \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

Da bi Tevenenova otpornost bila mala potrebno je da i otpornosti R_1 i R_2 budu male. To sa druge strane ima za posledicu smanjenje pojačanja pojačavača jer se sa smanjenjem R_1 i R_2 smanjuje i strujno pojačanje (deo ulazne struje utiče kroz ova dva otpornika umesto na ulaz pojačavača).



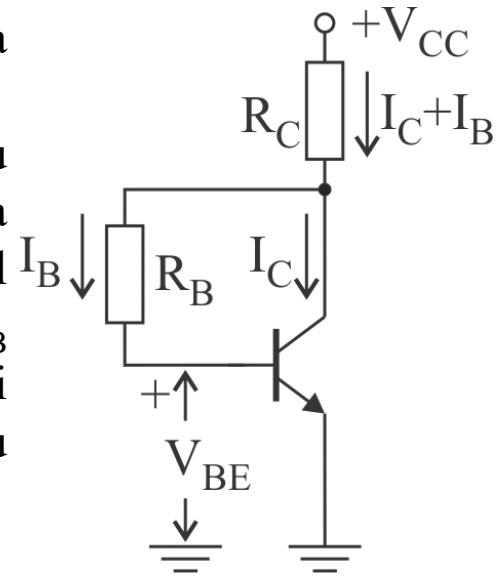
Pravilo kojim se postiže kompromis između pojačanja i stabilnosti kola iskazan je sledećom jednačinom: $R_1 || R_2 = R_B \approx 0{,}1 \cdot (1+\beta) \cdot R_E$

DC polarizacija

Polarizacija sa naponskom povratnom spregom

Kod ove vrste polarizacije napon na bazi je uvek manji od napona na kolektoru jer je $V_C = V_B + R_B \cdot I_B$. Na taj način obezbeđeno je da kolo bude uvek u aktivnom režimu bez obzira na promene struja (V_{CE}>0,7V).

Ovim kolom realizuje se negativna povratna sprega za jednosmernu struju. Ukoliko se iz bilo kog razloga poveća struja kolektora povećaće se pad napona na otporniku R_C i smanjiće se potencijal kolektora. Usled toga smanjiće se i pad napona na otporniku R_B (V_C-V_{BE}) a samim tim i struja baze tranzistora. Zahvaljujući povratnoj sprezi pomeranje radne tačke biće mnogo manje u odnosu na kolo kada nema povratne sprege.



$$V_{CC} - R_C \cdot (I_C + I_B) - R_B \cdot I_B - V_{BE} = 0$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = \beta \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1+\beta) \cdot R_C} \approx \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{R_B + \beta \cdot R_C}$$

$T \nearrow \quad \beta, I_{CO} \nearrow \quad I_C \nearrow \quad V_C \searrow \quad I_B \searrow$

Da bi se umanjio uticaj koeficijenta strujnog pojačanja β na struju kolektora, dimenzionisanje elemenata se obavlja na sledeći način:

$$\boxed{R_C \gg \frac{R_B}{\beta}} \quad \Rightarrow \quad I_C \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C}$$

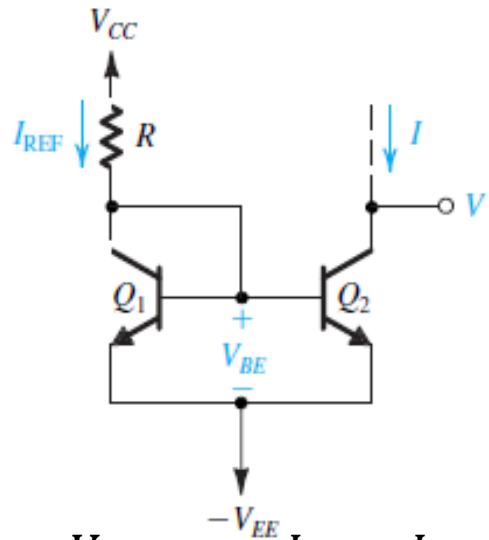
Polarizacija izvorom konstantne struje

U integrisanim kolima se uglavnom primenjuje polarizacija zasnovana na primeni izvora konstantne struje.

Ovde je prikazana najjednostavnija varijanta izvora konstantne struje koja se zove **strujno ogledalo** (slika desno Q_1 i Q_2). Ovo kolo obebeđuje konstantnu struju I sve dok je tranzistor Q_2 u aktivnoj oblasti, a to zavisi od napona na njegovom kolektoru.

Tranzistori u strujnom ogledalu Q_1 i Q_2 su identičnih karakteristika. S obzirom da su im emitorski pn spojevi povezani paralelno, kroz ova dva tranzistora će teći identične struje (ako se zanemari uticaj V_{CE}, odnosno Erlijev efekat).

Struja koja teče kroz otpornik R, I_{REF}, biće veća od izlazne struje I za struje baza tranzistora $I_{B1}+I_{B2}$. Pri dovoljno velikoj vrednosti β ove struje se mogu zanemariti.



$$V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

$$\beta_1 = \beta_2 \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{REF} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = (2+\beta)\cdot I_B$$

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - (-V_{EE}) - V_{BE}}{R}$$

$$V_{CC}, V_{EE} \gg V_{BE} \qquad I_{REF} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R}$$

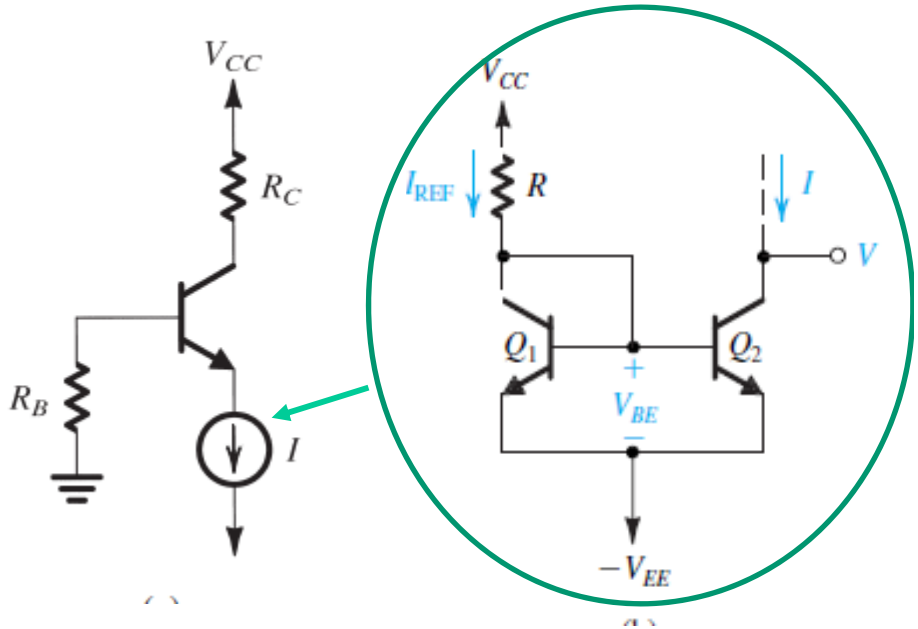
$$\beta \gg 1 \qquad I = \beta \cdot I_B \approx I_{REF}$$

$$\boxed{I \approx I_{REF} \approx \frac{V_{CC}+V_{EE}}{R}}$$

Polarizacija izvorom konstantne struje

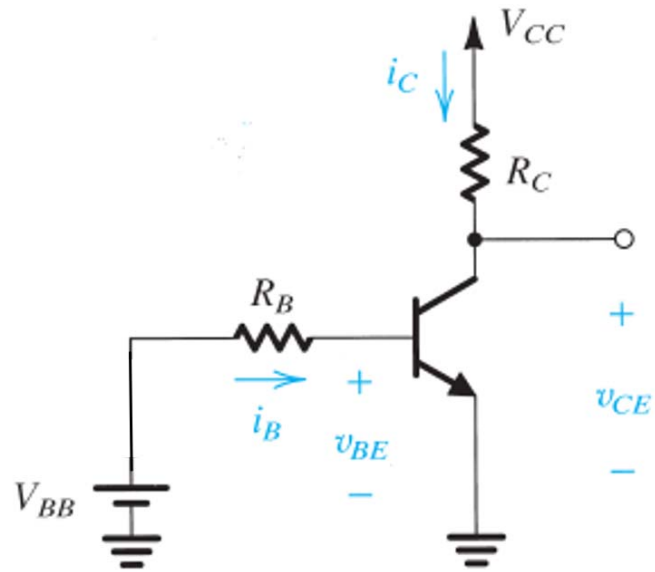
Na slici levo je prikazan tranzistor polarisan izvorom konstantne struje (strujni generator prikazan na ovoj slici je realizovan izvorom konstantne struje sa desne slike).

Prednost ovakvog tipa polarizacije je da struje tranzistora zavise samo od izvora konstantne struje. U ovom slučaju R_B i R_C neće uticati na struju kolektora. Jedino o čemu se mora voditi računa je da izvor konstantne struje ne izađe iz aktivne oblasti rada.



Analiza kola grafičkom metodom

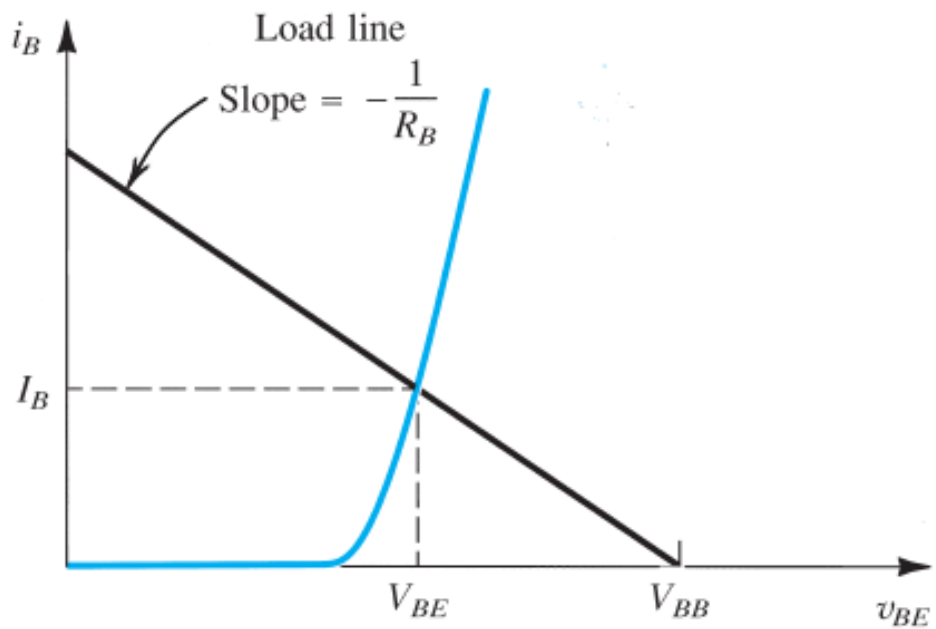
Primenom Kirhofovog zakona za napon nalazimo vezu između i_B i v_{BE}. Ukoliko je poznata ulazna karakteristika može se grafički odrediti struja baze u radnoj tački.



$$v_{BE} = V_{BB} - i_B \cdot R_B$$

$$i_B = \frac{V_{BB} - v_{BE}}{R_B}$$

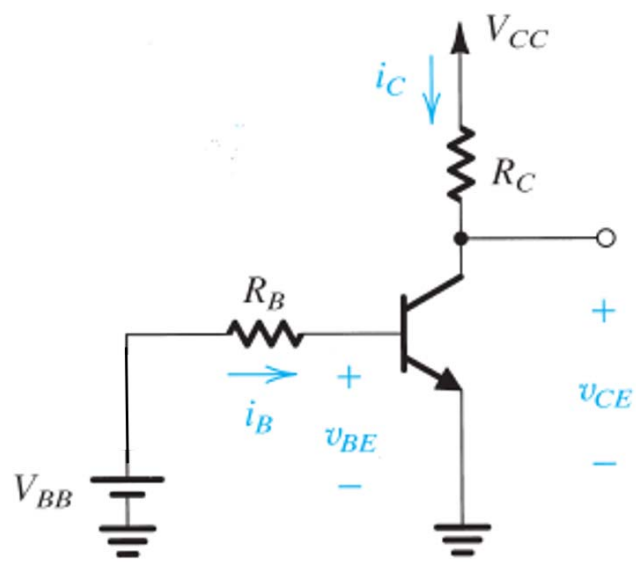
Jednačina radne prave
u polju ulaznih karakteristika



Analiza kola grafičkom metodom

Na isti načim, primenom Kirhofovog zakona za napon nalazimo vezu između izlaznih veličina: i_C i v_{CE}. Ukoliko je poznata izlazna karakteristika može se odrediti **mirna radna tačka**, Q.

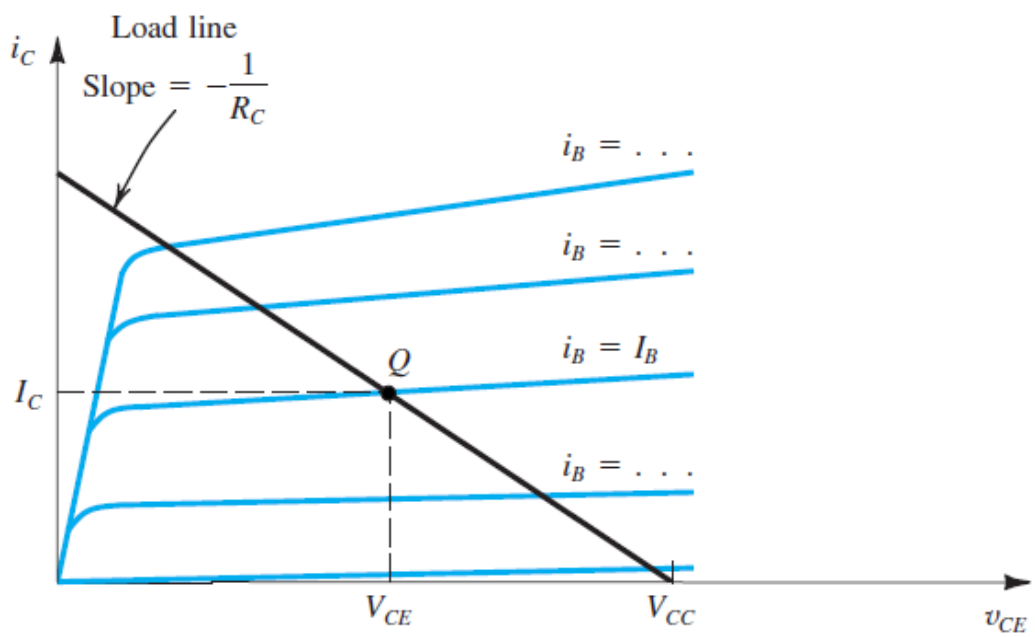
Mirna radna tačka definisana je sa jednosmernim izlaznim naponom, V_{CE}, i jednosmernom izlaznom strujm I_C.



$$v_{CE} = V_{CC} - i_C \cdot R_C$$

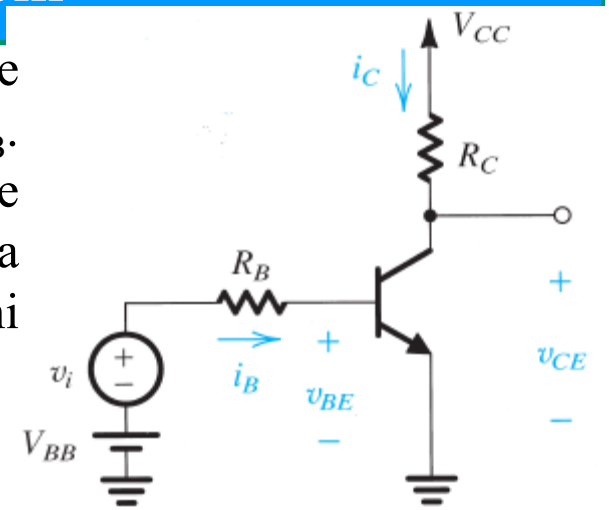
$$i_C = \frac{V_{CC} - v_{CE}}{R_C}$$

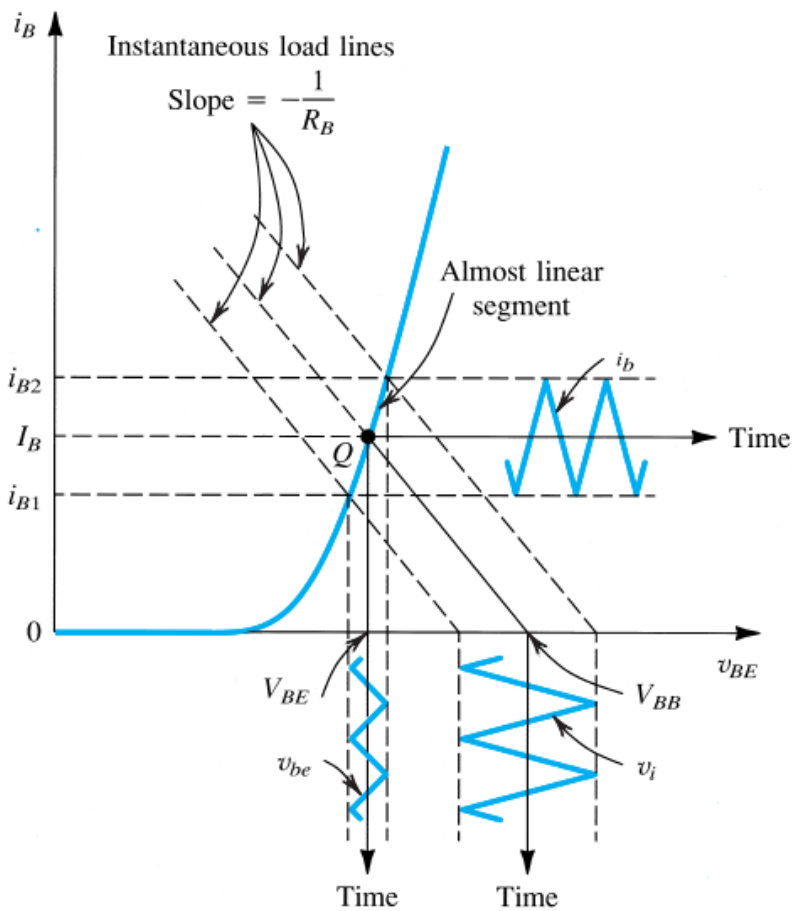
Jednačina radne prave
u polju izlaznih karakteristika

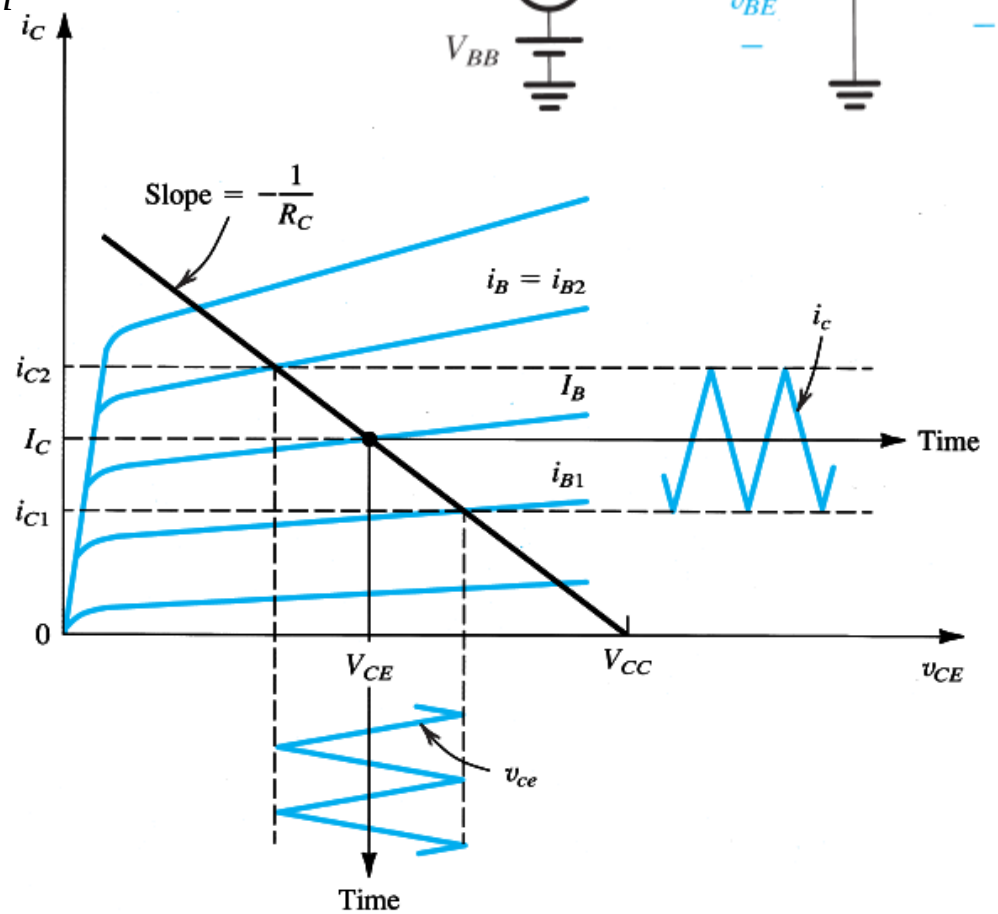


Analiza kola grafičkom metodom

Pod dejstvom promenjivog napona v_i menja se položaj radne prave, pri čemu njen nagib ostaje svo vreme isti i iznosi $1/R_B$. Istovremeno se menja i položaj radne tačke Q duž ulazne karakteristike. Kao posledica ovih promena nastaje promenjiva komponenta struje i_b čiji talasni oblik je približno isti kao talasni oblik koji generiše naizmenični generator v_i.

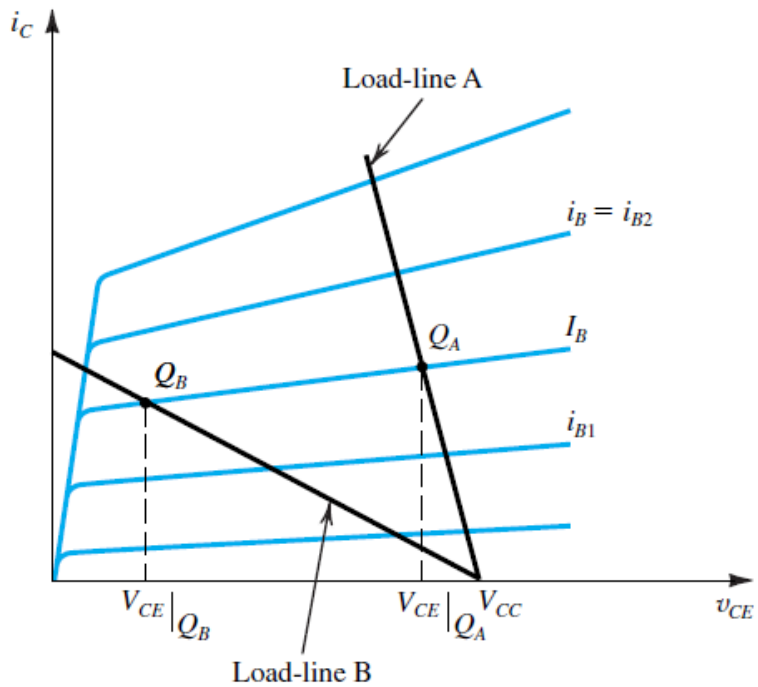






Analiza kola grafičkom metodom

Izbor radne tačke je veoma bitan za korektno funkcionisanje kola. Optimalna radna tačka bi trebala da bude na sredini aktivne oblasti rada.Ukoliko je blizu oblasti zasićenja (radna tačka Q_B) ili zakočenja (radna tačka Q_A) amplituda napona na izlazu je smanjena a pri većim vrednostima ulaznog signala javljaju se izobličenja.



Osnovna pitanja

1. **Koeficijenti strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom i za spregu sa zajedničkim emitorom** (7-9).
2. **Model za velike signale** (14, 15).
3. **Režimi rada bipolarnog tranzistora** (20-22)**.**

Ostala ispitna pitanja

1. **Erlijev efekat** (16-18)**.**
2. **Ebers-Molov model** (23)**.**
3. **Ulazna i izlazna karakteristika bipolarnog tranzistora** (27,28)**.**
4. **Koeficijenti stabilnosti kolektorske struje** (32, 33).
5. **Polarizacija degradacijom emitora** (38,40).
6. **Polarizacija naponskom povratnom spregom** (41)**.**