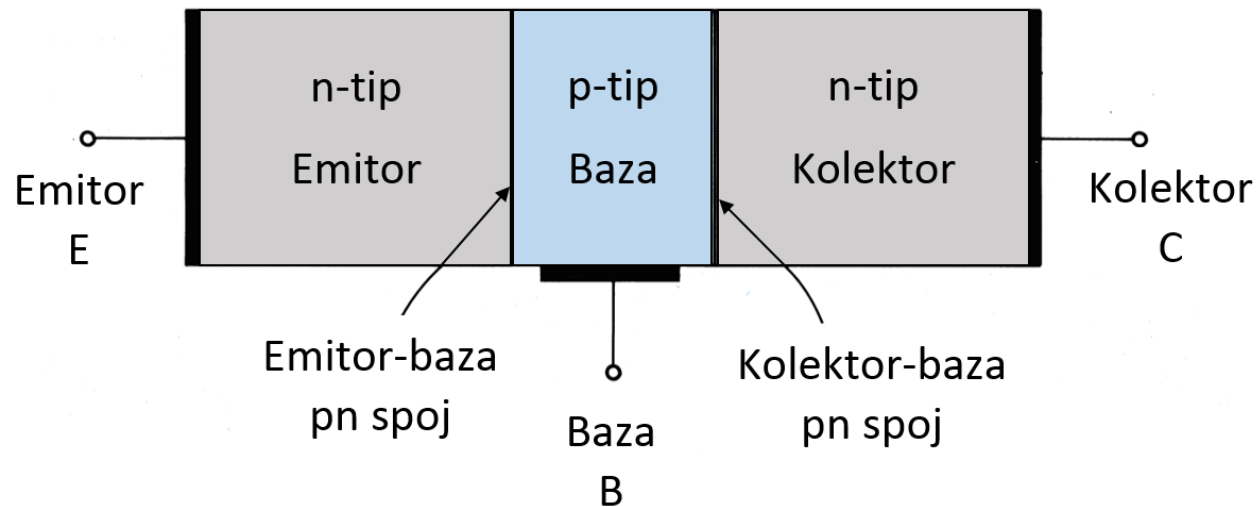


# BIPOLARNI TRANZISTORI

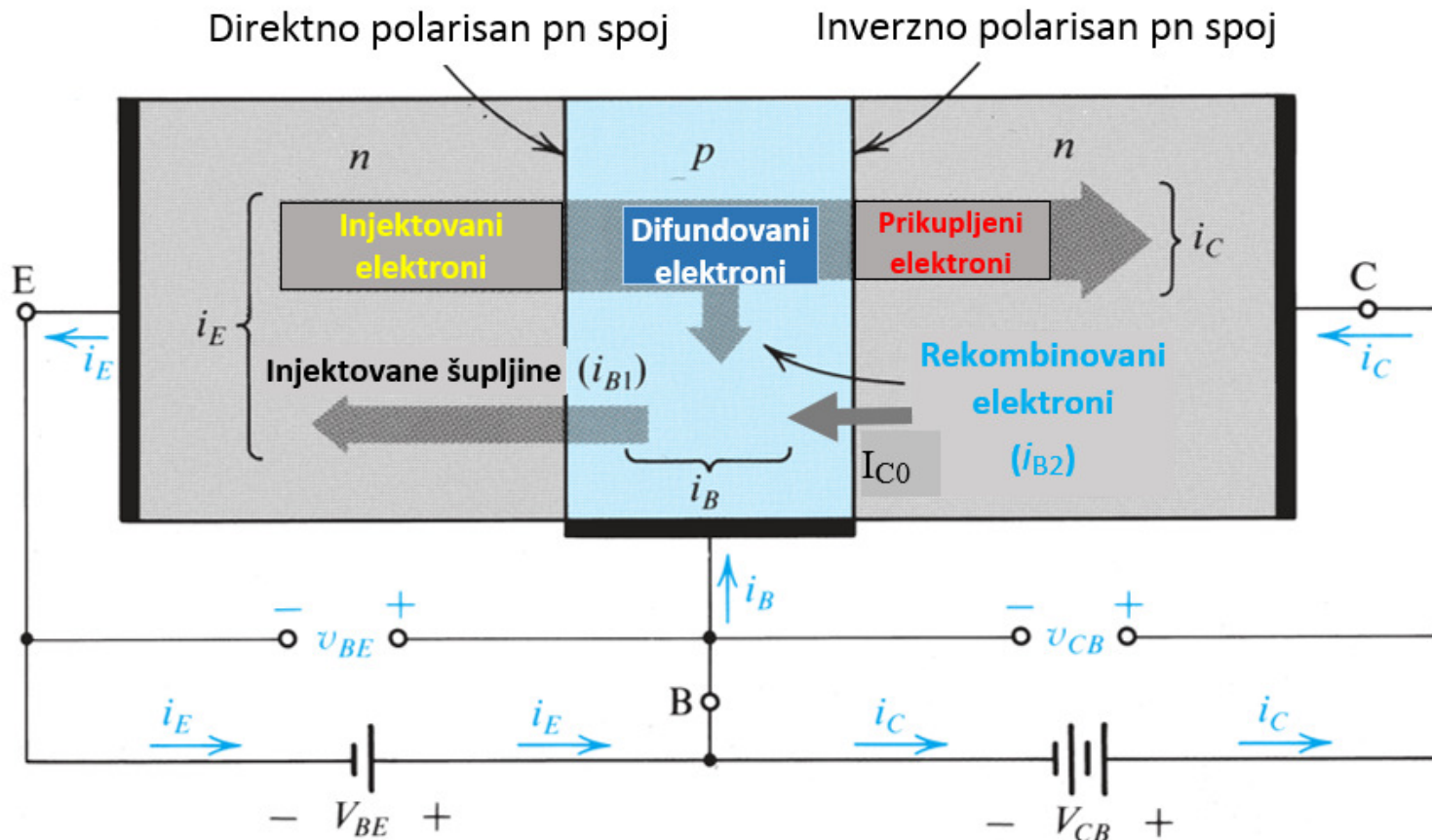
## Aktivne komponente

- Komponente sa tri priključka imaju daleko veće primene od komponenti sa dve elektrode kao što je dioda. One nalaze primenu u pojačanju signala, u 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). Praktično tranzistor funkcioniše kao prekidač.

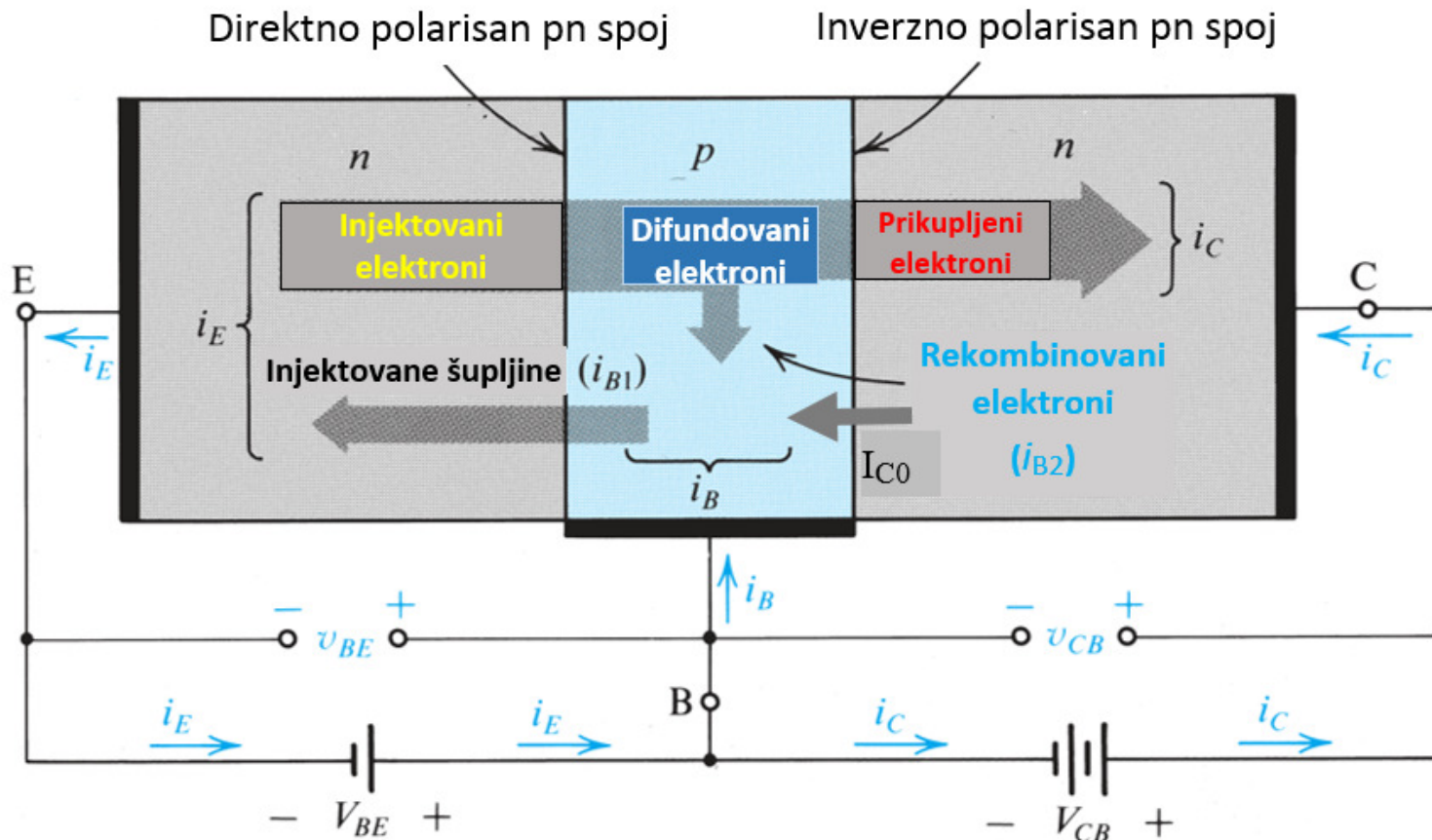
Struktura bipolarnog tranzistora. Sadrži tri oblasti: emitor, baza kolektor. Između baze i emitora je emitorski pn spoj, a između baze i kolektora kolektorski pn spoj.



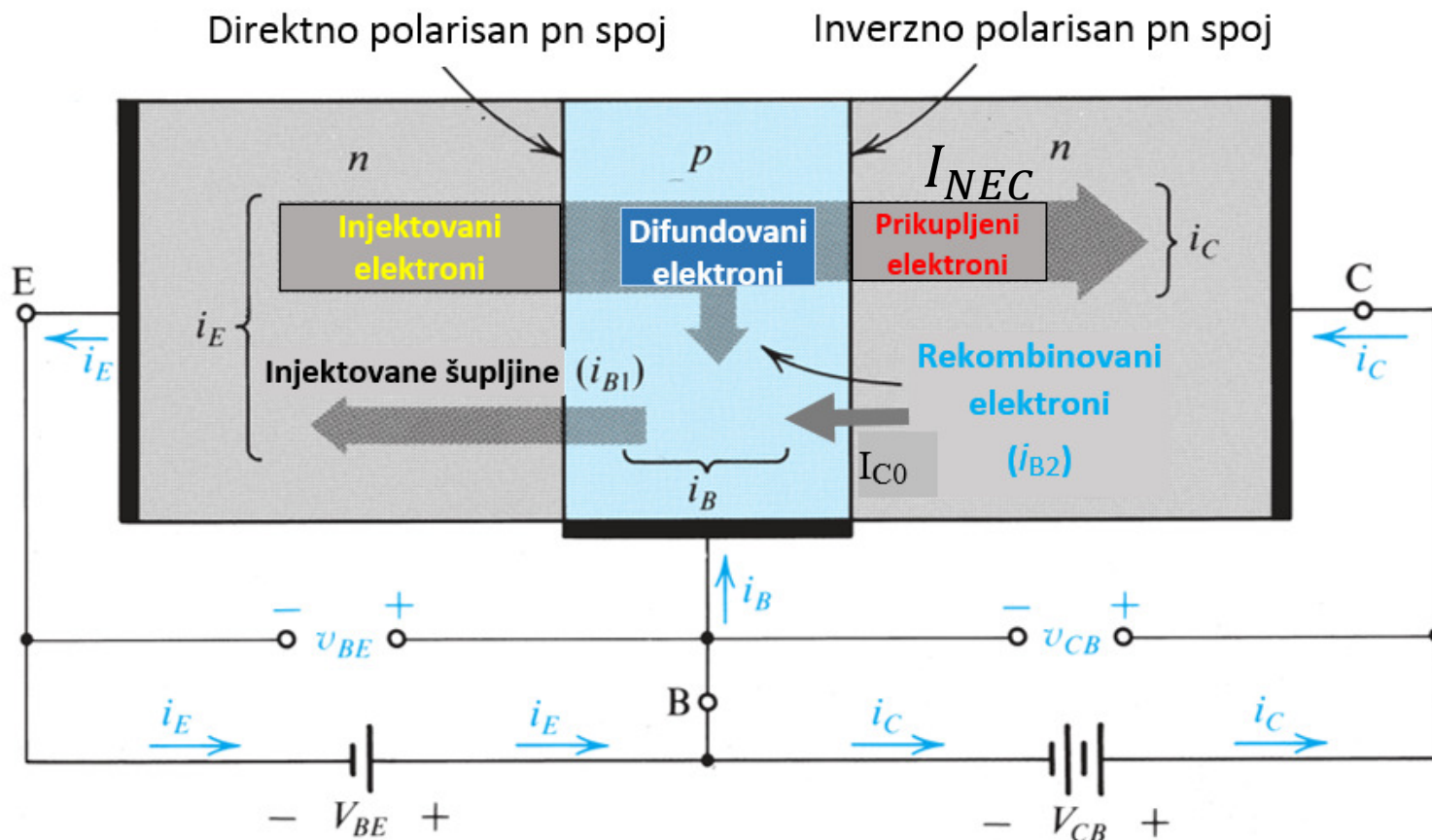
Slika prikazuje komponente struja bipolarnog tranzistora kada je emitorski pn spoj polarisan direktno a kolektorski inverzno.



Kao posledica direktne polarizacije emitorskog pn spoja koncentracija elektrona na spoju baze i emitora biće eksponencijalno srazmerna naponu  $V_{BE}$ . Isto tako usled inverzne polarizacije kolektorskog pn spoja koncentracija elektrona na spoju kolektor baza biće jednaka nuli. Ova velika razlika u koncentraciji elektrona duž baze dovodi do difuzije elektrona u pravcu kolektora.

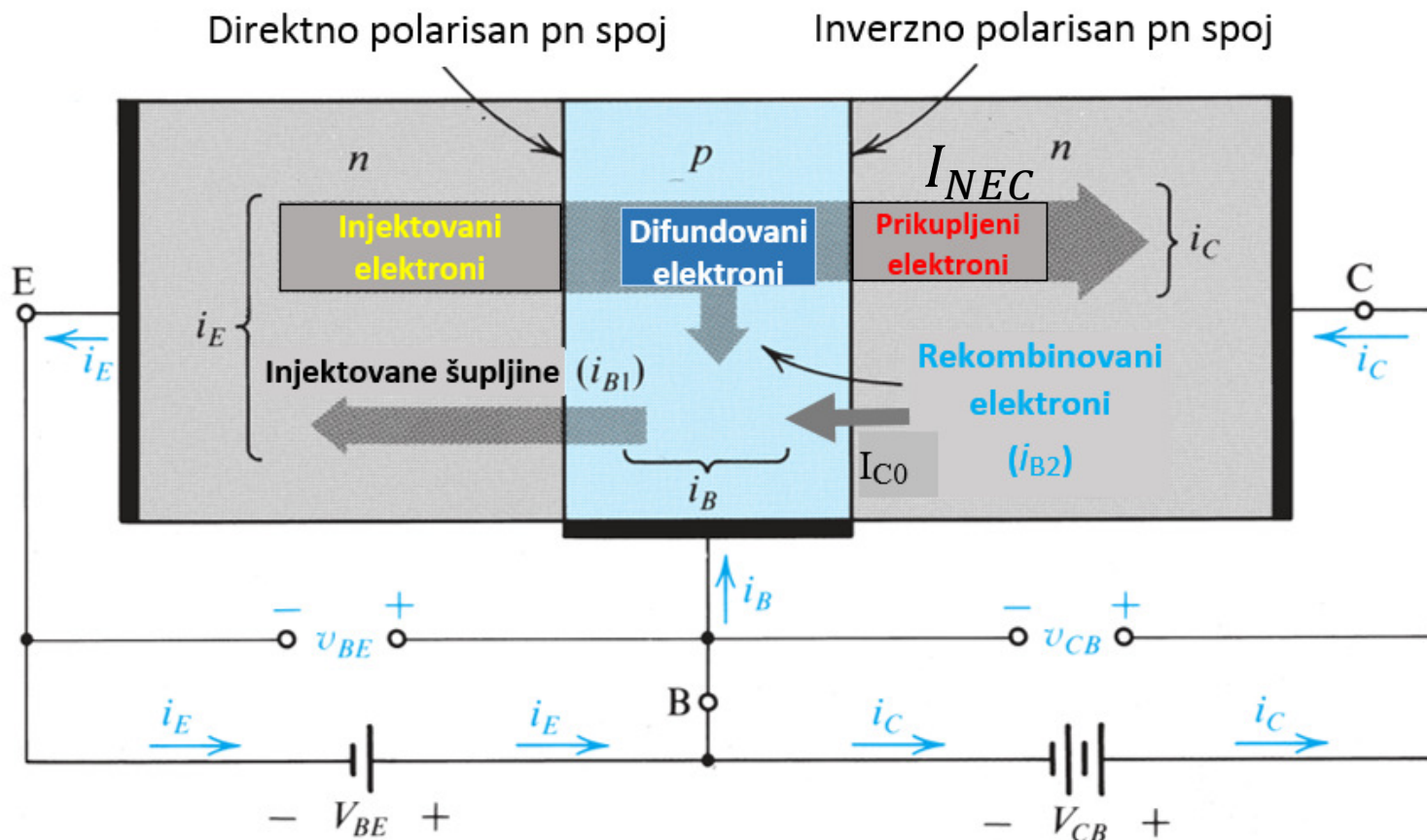


Bipolarni tranzistor je konstruisan na takav način da u aktivnom režimu rada najveći deo struje kolektora čine većinski nosioci naleketrisanja emitora koji su prošli kroz emitorski i kolektorski pn spoj i doprli do kolektora,  $I_{NEC}$ . Ovo se postiže malom širinom oblasti baze kao i takvom koncentracijom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



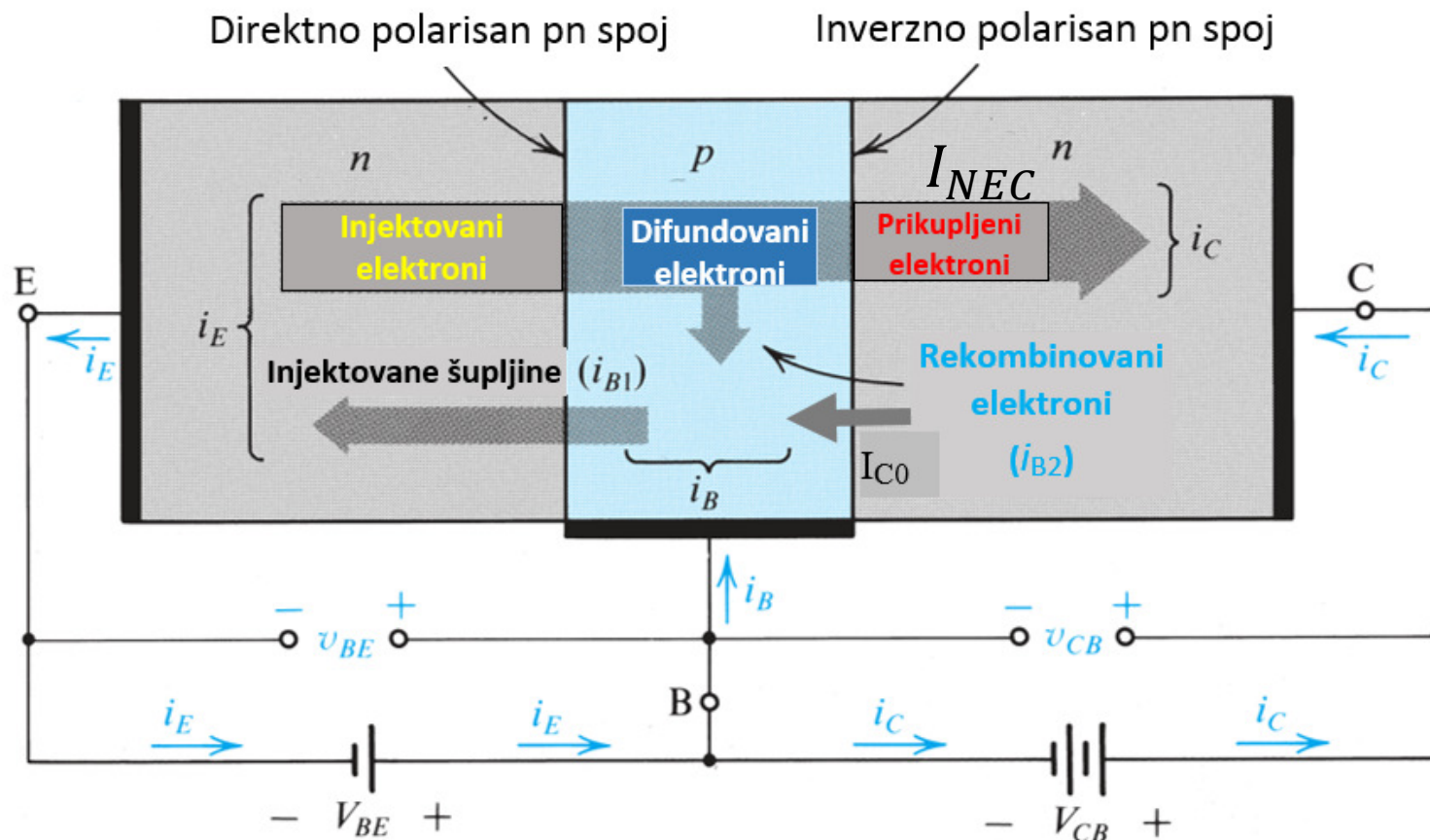
Odnos struje struje koju čine većinski nosioci naleketrisanja emitora koji su došli do kolektora i ukupne struje emitora je **koeficijent strujnog pojačanja u sprezi sa zajedničkom bazom,  $\alpha$** :

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



Kada tranzistor radi u aktivnom režimu rada najveći deo struje kolektora čine većinski nosioci naleketrisanja emitora koji su došli do kolektora. Drugu komponentu struje kolektora čini inverzna struja zasićenja kolektorskog pn spoja.

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{C0}$$





Na osnovu Kirhofovog zakon za struje dolazimo do veze između struja bipolarnog tranzistora

$$I_E = I_C + I_B$$

Kada se u gornju jednačinu zameni  $I_C = \alpha \cdot I_E + I_{C0}$  dobija se:

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

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

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

**$\beta$  je koeficijen strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkim emitorom.**

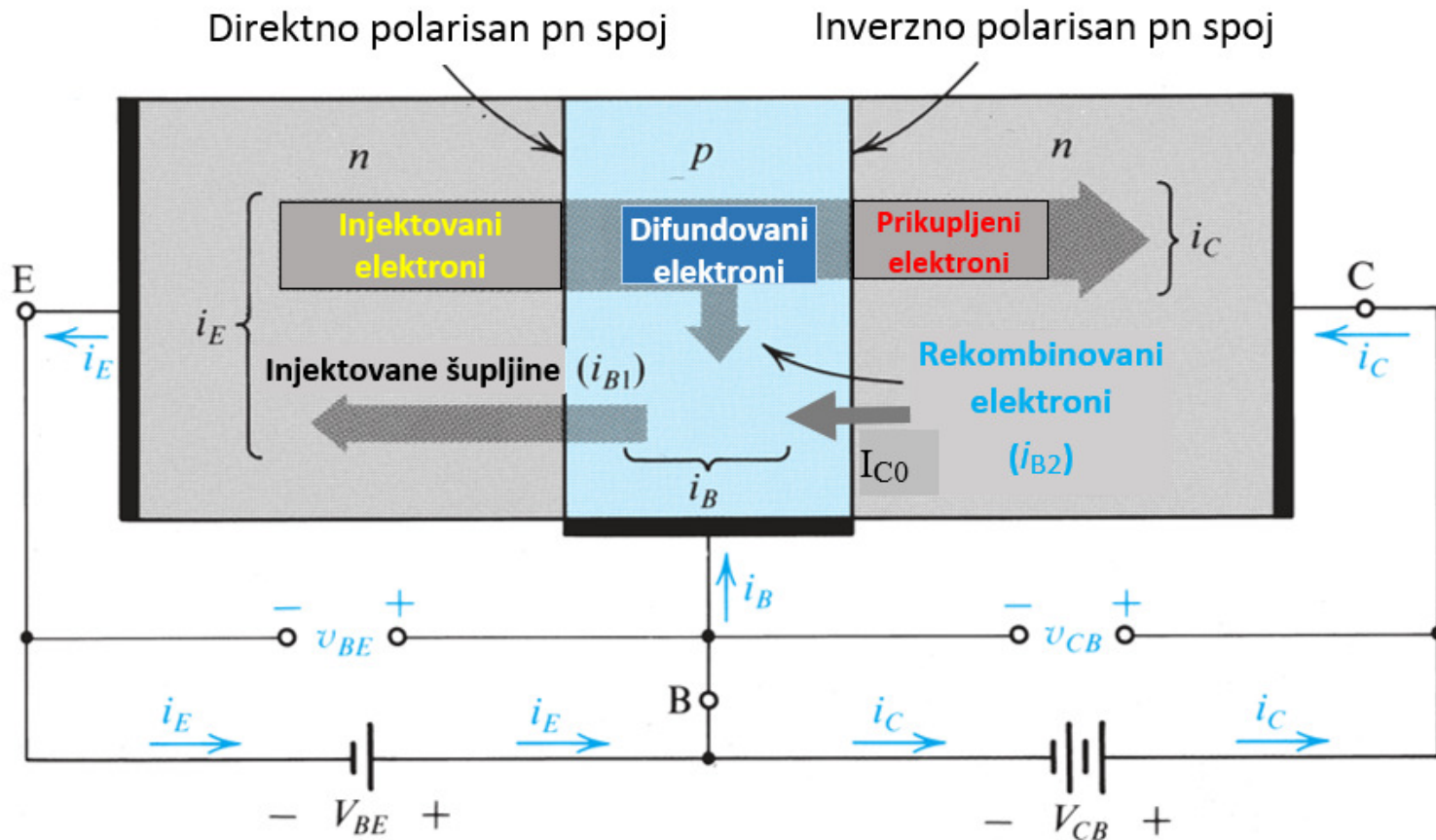
Struja difuzije elektrona u oblasti baze je srazmerna priraštaju koncentracije elektrona:

$$I_n \sim \frac{dn}{dx} \Rightarrow I_n \sim \frac{n_p(0) - n_p(w)}{w} \quad I_n \sim \frac{n_{p0} e^{V_{BE}/VT} - 0}{w}$$

Odavde sledi da je struja difuzije elektrona u bazi jednaka

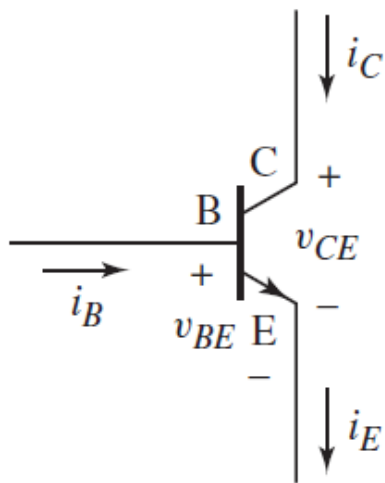
$$I_C = I_S \cdot e^{V_{BE}/VT}$$

gde je  $I_S$  struja zasćenja, čija vrednost zavisi od dimenzija tranzistora (širine baze i površine poprečnog preseka) i koncentracije nosilaca naelektrisanja u bazi i emitoru.

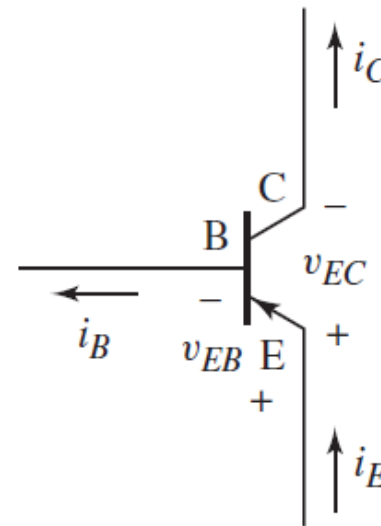


## Smer struja

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

## 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.

<b>Režim Rada</b>	<b>Emitorski pn spoj</b>	<b>Kolektorski pn spoj</b>
<b>Zakočenje</b>	Inverzno	Inverzno
<b>Aktivni</b>	Direktno	Inverzno
<b>Inverzni aktivni</b>	Inverzno	Direktno
<b>Zasićenje</b>	Direktno	Direktno

## Režimi rada tranzistora

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

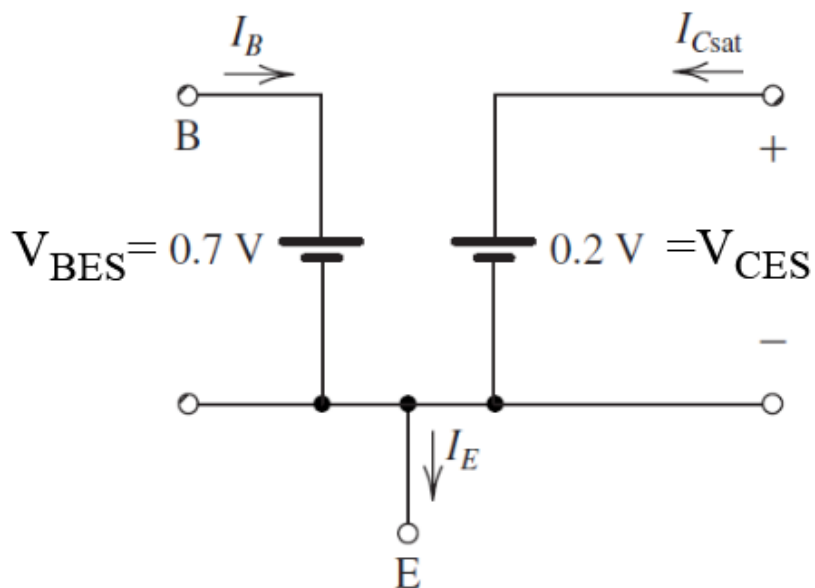
$$I_E = 0$$

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

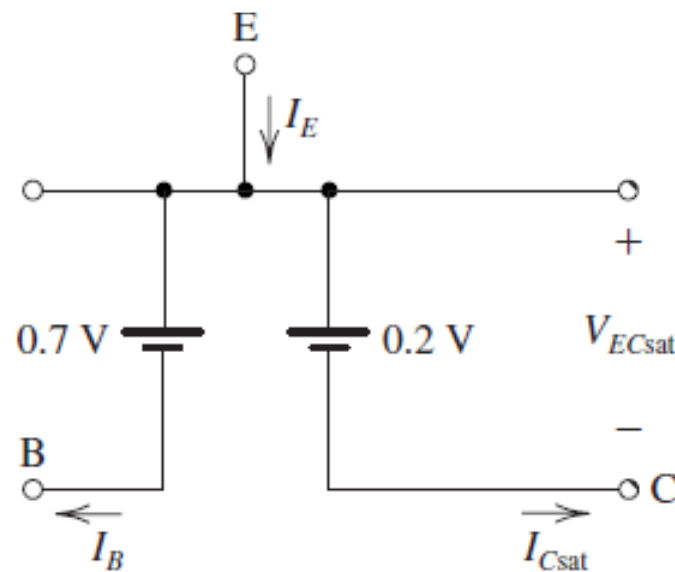
## Režimi rada tranzistora

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  $V_{BES}=0,7\text{ V}$  i  $V_{BCS}=0,5\text{ V}$ . Direktno polarisani pn spojevi se modeliraju naponskim generatorima. Smatra se da je tranzistor u zasićenju kada je:

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



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

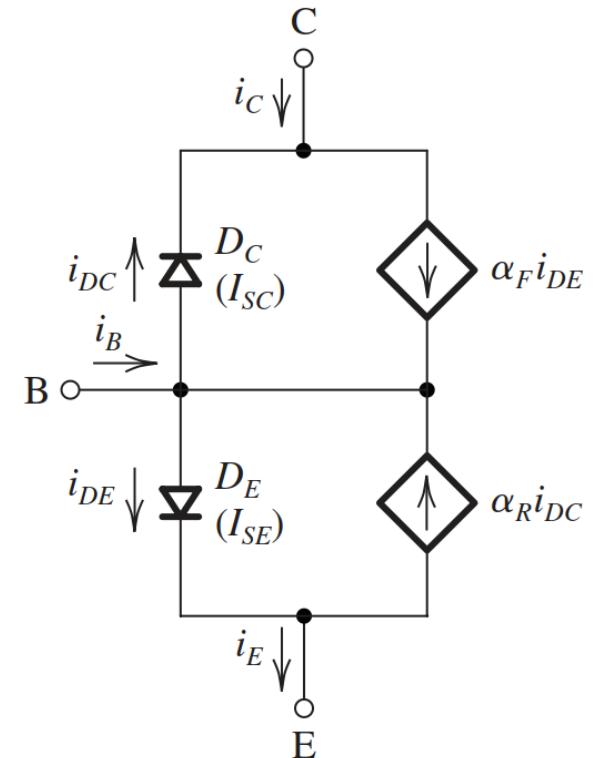


## Ebers-Molov model

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 samog pn spoja. Sa druge strane strujni generatori kontrolisani strujom modeluju struju koju čine nosioci naelektrisanja iz drugog pn spoja.

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

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



## Ebers-Molov model

Nakon primene Šoklijeve jednačine za pn spoj dolazimo do sledećih izraza za Ebers-Molov model:

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

$\alpha_F$  je koeficijent strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom u aktivnoj oblasti,

$\alpha_R$  je koeficijent strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom u inverzno aktivnoj oblasti,

$I_{C0}$  je inverzna struja zasićenja kolektorskog pn spoja kada je emitorski pn spoj kratkospojen.

$I_{E0}$  je inverzna struja zasićenja emitorskog pn spoja kada je kolektorski pn spoj kratko spojen.

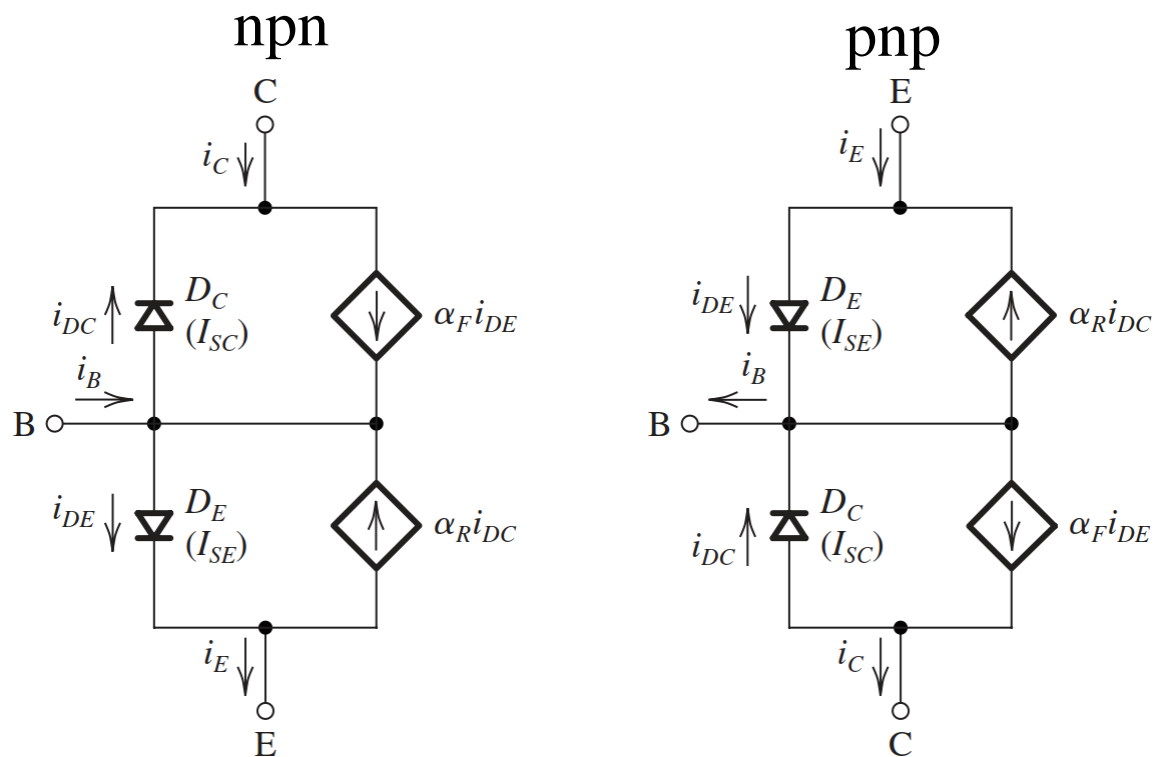


## Ebers-Molov model

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.

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



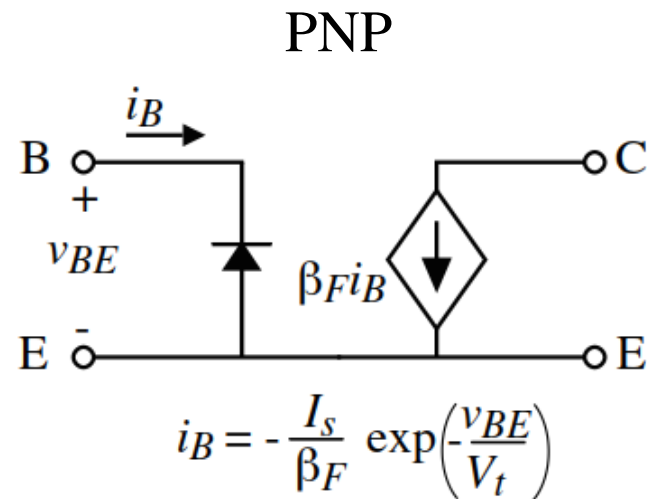
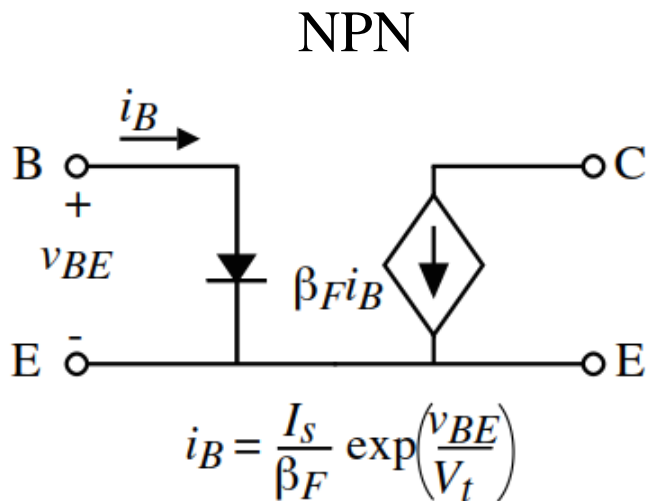
## Model za velike signale

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

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

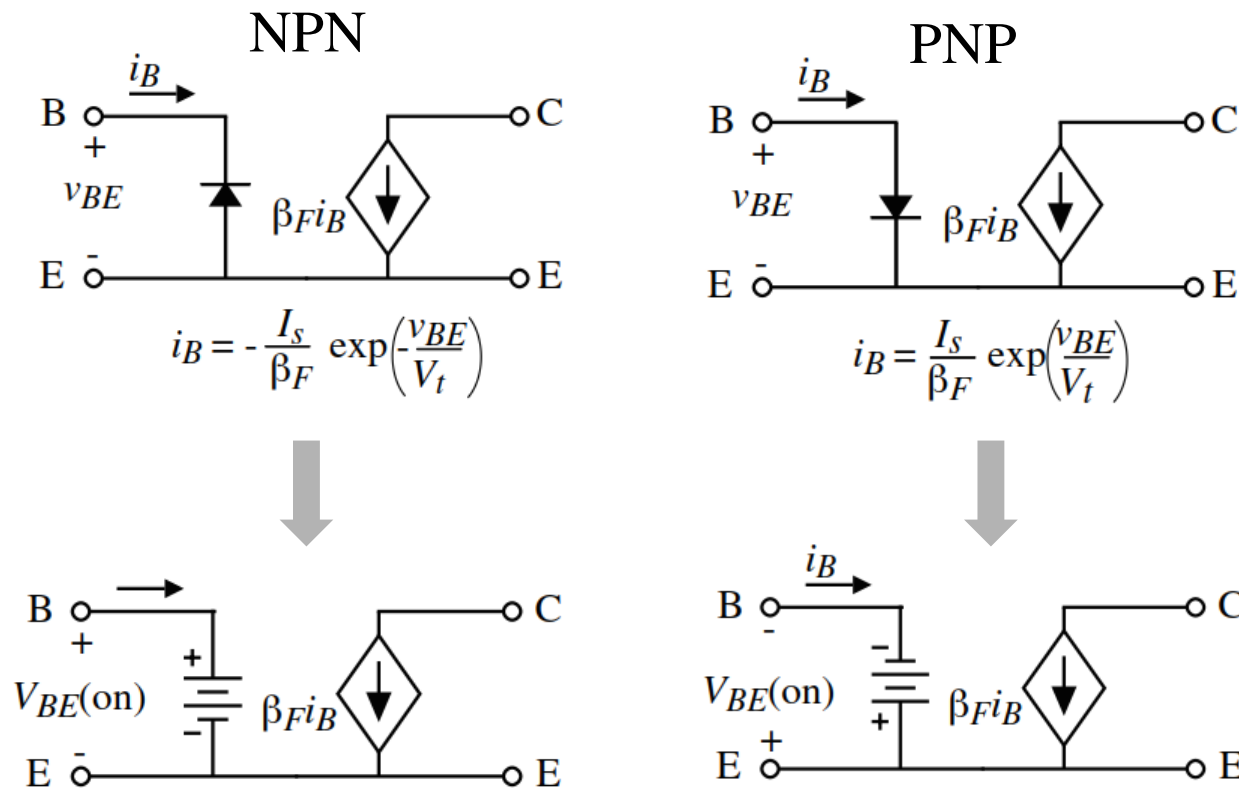
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$I_B = \frac{I_S}{\beta} \cdot e^{V_{BE}/V_T}$  Ova eksponencijalna zavisnost se modelira kao dioda između baze i emitora.



## Model za velike signale

Ukoliko pretpostavimo da je kolo takvo da promene napona  $V_{BE}$  zanemarivo utiču na struju baze diode u emotorskoj pn spoju možemo da zamenimo naponskim generatorom  $V_{BE}$ . U najvećem broju slučajeva ova aproksomacija je opravdana



## Erlijev efekat

Kada se u aktivnom režimu rada menja inverzni napon polarizacije kolektorskog pn spoja VCB, dolazi do promene širine prelazne oblasti između baze i kolektora. 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:

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

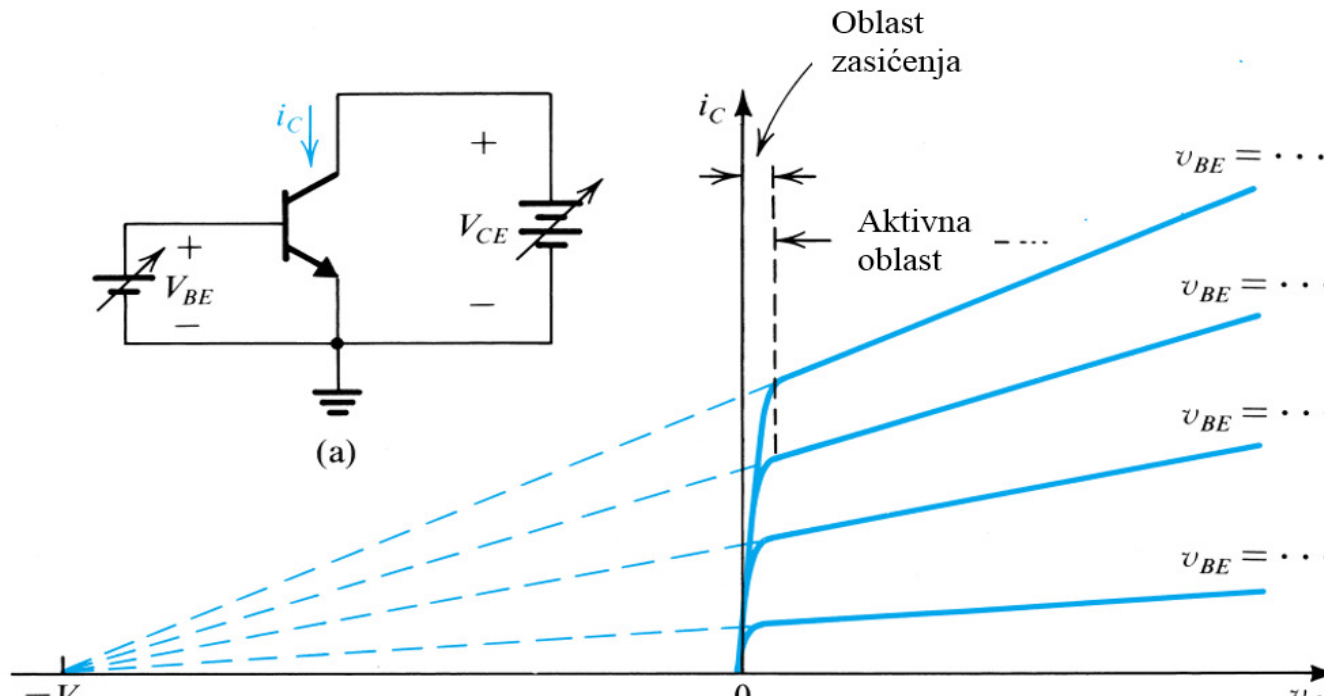
parametar  $V_A$  je Erlijev napon,

$I_S$  inverzna struja zasićenja pri nultom naponu  $V_{CE}$ .

## Erliev efekt

Red veličine Erlievog napona je oko 100 V. Ukoliko promene napona VCE nisu velike Erliev efekt može da se zanemari. S obzirom da je u aktivnom režimu rada najčešće  $V_{BE} \ll V_{CB}$  u praksi se koristi nešto izmenjena jednačina za modelovanje Erlievog efekta u kojoj je VCB zamenjeno sa izlaznim naponom VCE.

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



## Erlijev efekat

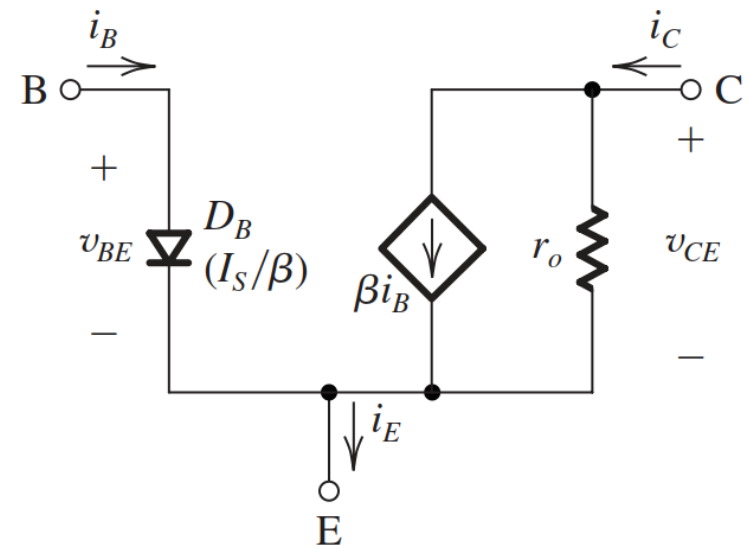
Zavisnost struje kolektora od napona  $V_{ce}$  modelira se izlaznom otpornošću,  $r_o$ , koja se određuje kao:

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

Izlazna otpornost se može odrediti kao:

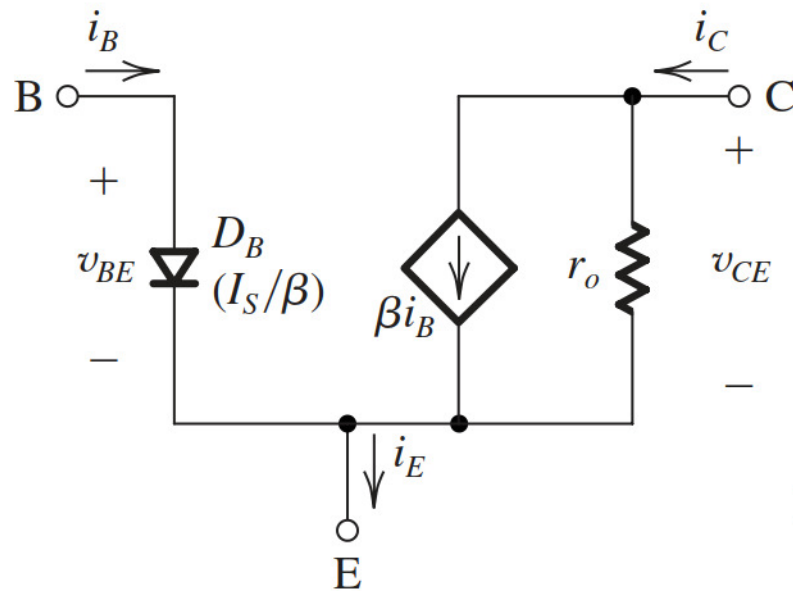
$$r_o = \frac{V_A}{I'_C}$$

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



## Model za velike signale

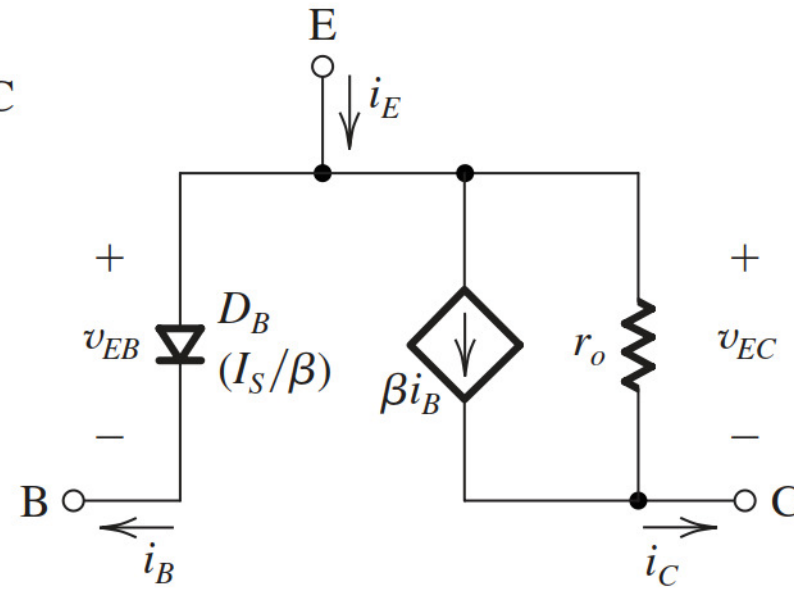
Ukoliko se uzme u obzir Erlijev efekat modelu se dodaje izlazna otpornost  $r_o$ .



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

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

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



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

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

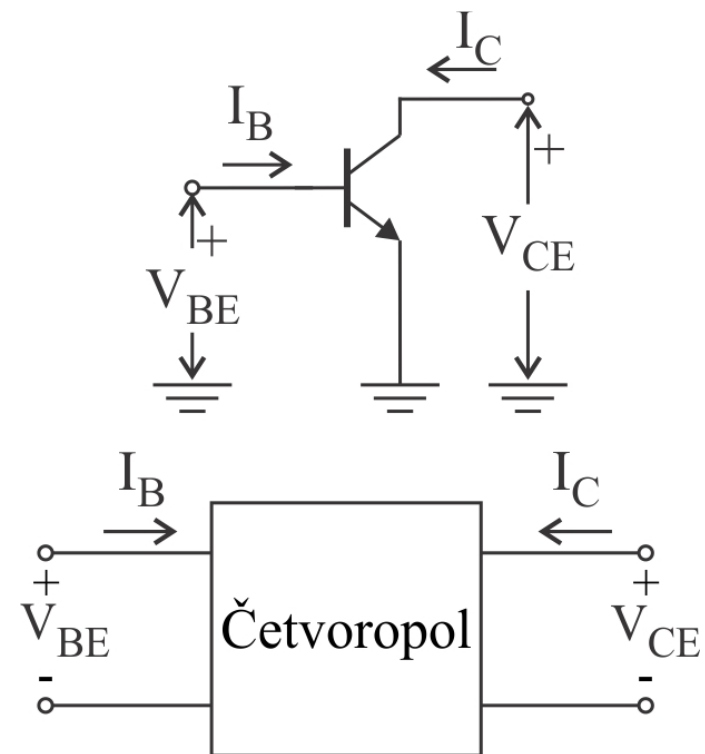
$$r_o = |V_A| / (I_S e^{v_{EB}/V_T})$$

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 četvorpola 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 sprega sa zajedničkim emitorom, ali se u praksi koriste ove jer su najjednostavnije za merenje.

$$V_{BE} = f_1(I_B, V_{CE})$$

$$I_C = f_2(I_B, V_{CE})$$

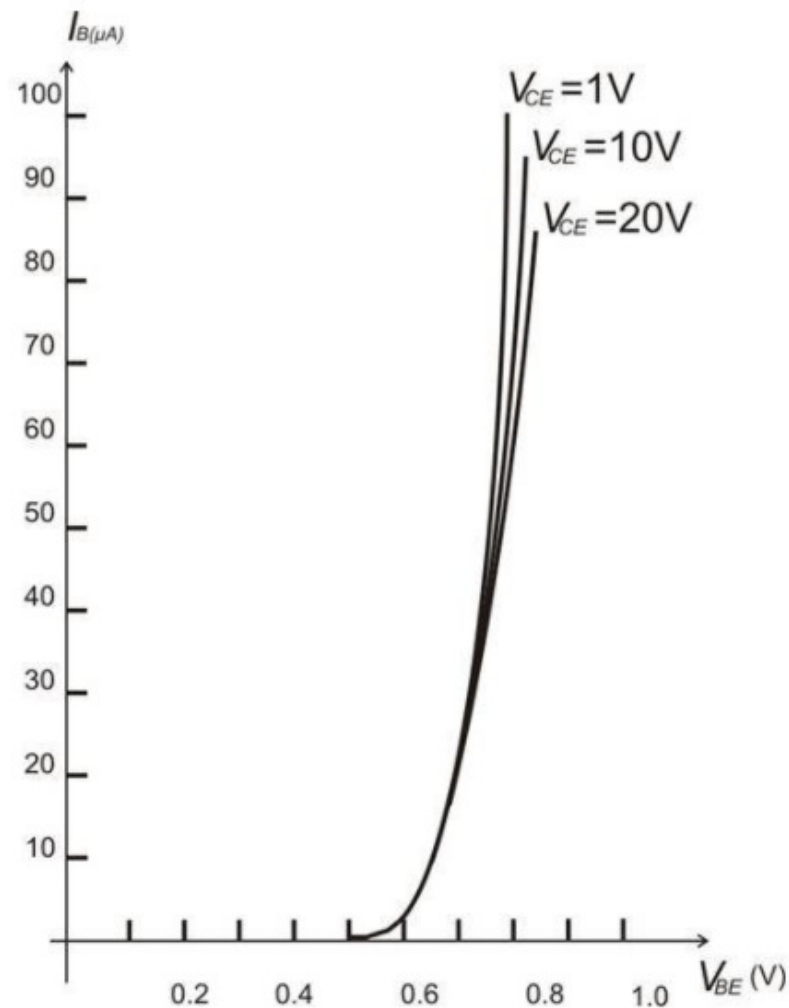
Pošto su karakteristike tranzistora funkcije od dve promenjive one bi mogle da se predstavi u tri dimenzije ali se u praksi predstavljaju kao familija karakteristika. Pri tome se za jednu od dve nezavisno promenjive usvaja konstantna vrednost.





## Ulazna karakteristika

Ulazna karakteristika daje zavisnost ulazne struje,  $I_B$ , od ulaznog napona,  $V_{BE}$ , pri čemu je izlazni napon,  $V_{CE}$ , konstantan. Ova karakteristika odgovara strujno naponskoj karakteristici diode. Struja baze se zanemarivo menja sa promenom vrednosti napona  $V_{CE}$ . Usled povećanja napona inverzne polarizacije kolektorskog pn spoja,  $V_{CE}$ , 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,  $I_C$ ) od izlaznog napona (napon kolektor-emitor,  $V_{CE}$ ) pri konstantnoj vrednosti ulaznog napona (struja baze,  $I_B$ ). Kada je tranzistor u aktivnom režimu rada karakteristike su približno horizontalne i ravnomerno raspoređene zavisno do vrednosti struje baze. Na izlaznoj karakteristici 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.

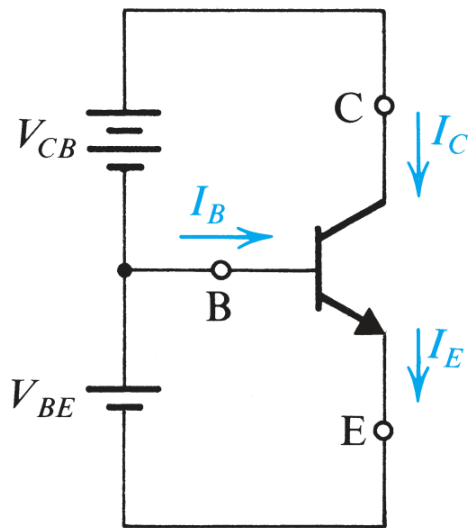


# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

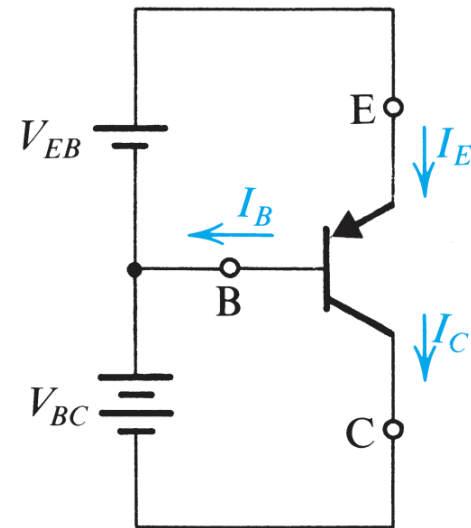
## POLARIZACIJA

- **Polarizacija** je priključenje tranzistora na izvor jednosmernog napona da bi se doveo u željeni režim rada.
- Ukoliko tranzistor radi kao pojačavač onda je polarisan u aktivnoj oblasti rada za koju je emitorski pn spoj direktno polarisan a kolektorski pn spoj inverzno polarisan.
- Od vrednosti jednosmerenih struja tranzistora zavise parametri modela za naizmenični režim a samim tim i karakteristike pojačavača. Znači funkcija polarizacije nije samo da obezbedi odgovarajući režim tranzistora već i odgovarajuće vrednosti jednosmernih struja i napona na tranzistoru.
- Jednosmerni naponi i struje podešavaju se izborom vrednosti izvora jednosmernog napona i otpornika.

npn tranzistor



pnp tranzistor

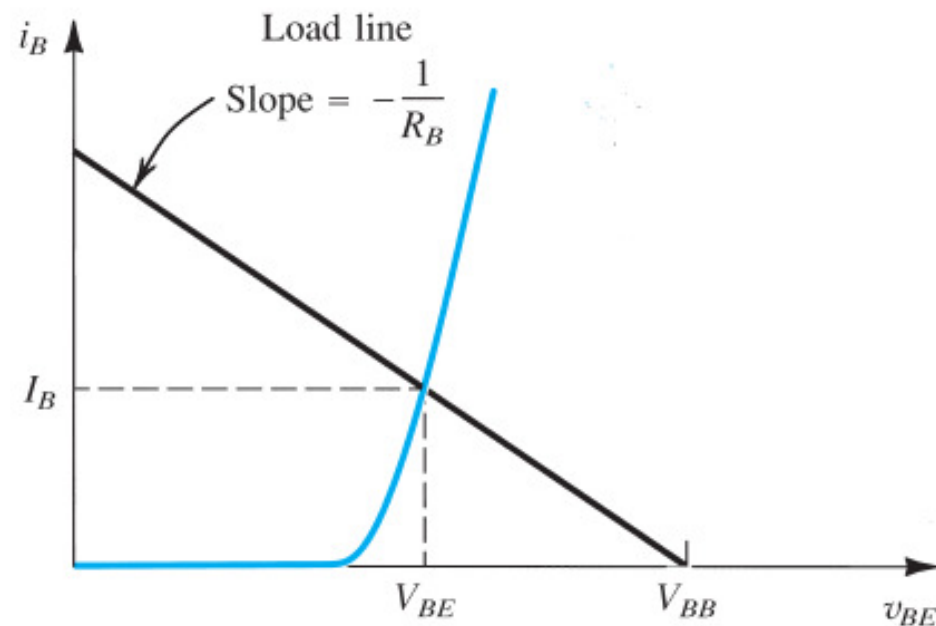
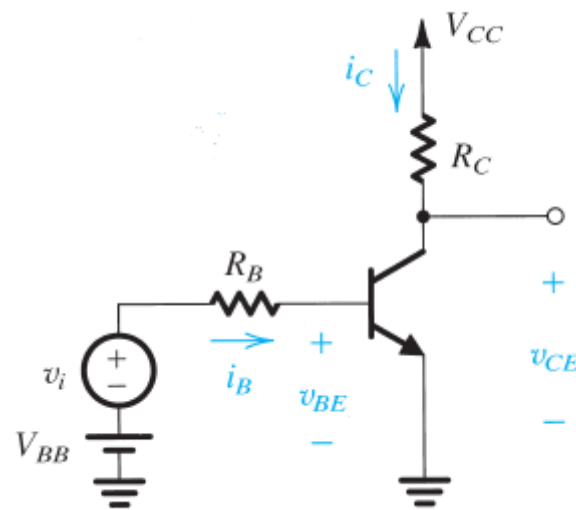


## Analiza kola grafičkom metodom

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.

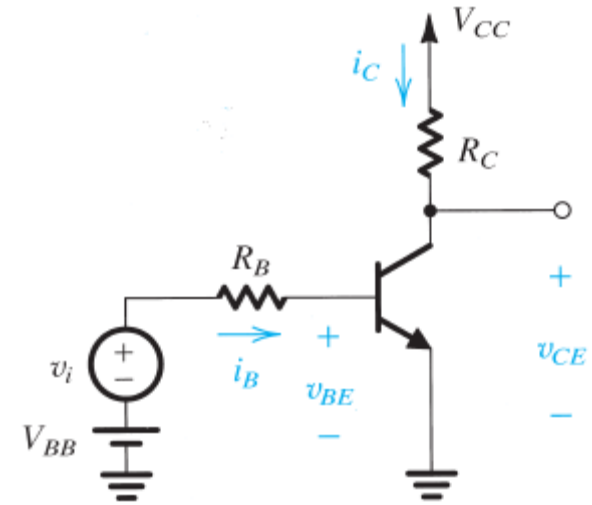
$$v_{BE} = V_{BB} - i_B \cdot R_B$$

$$i_B = \frac{V_{BB}}{R_B} - \frac{1}{R_B} \cdot v_{BE}$$



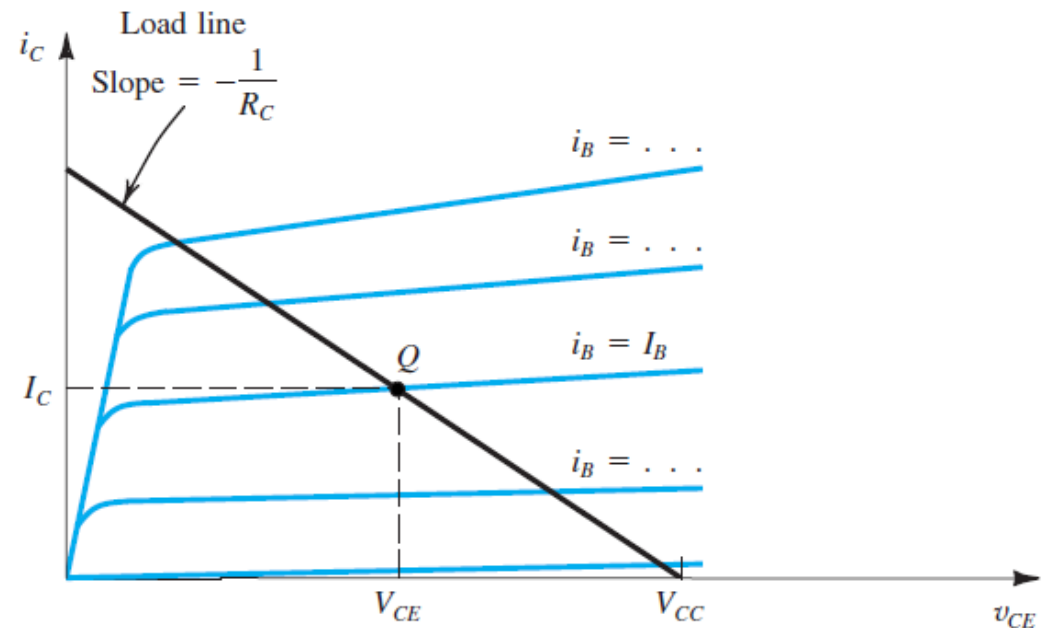
## Analiza kola grafičkom metodom

Na isti način, 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**.

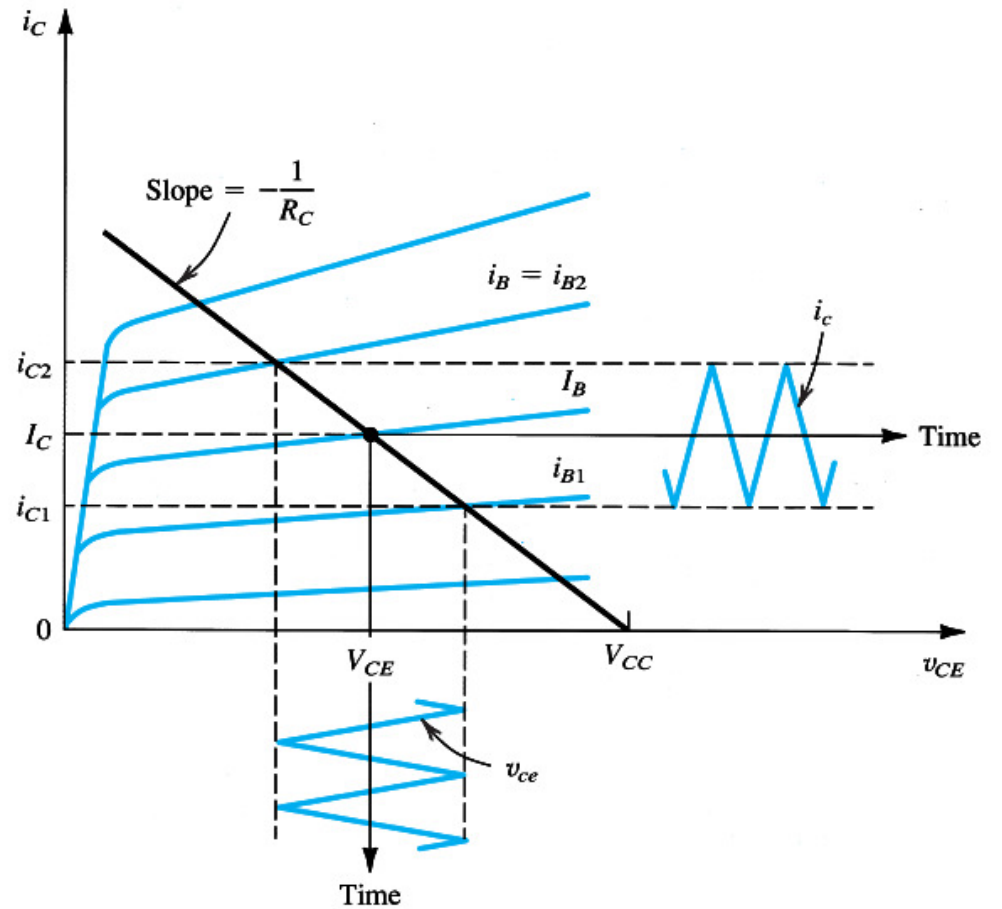
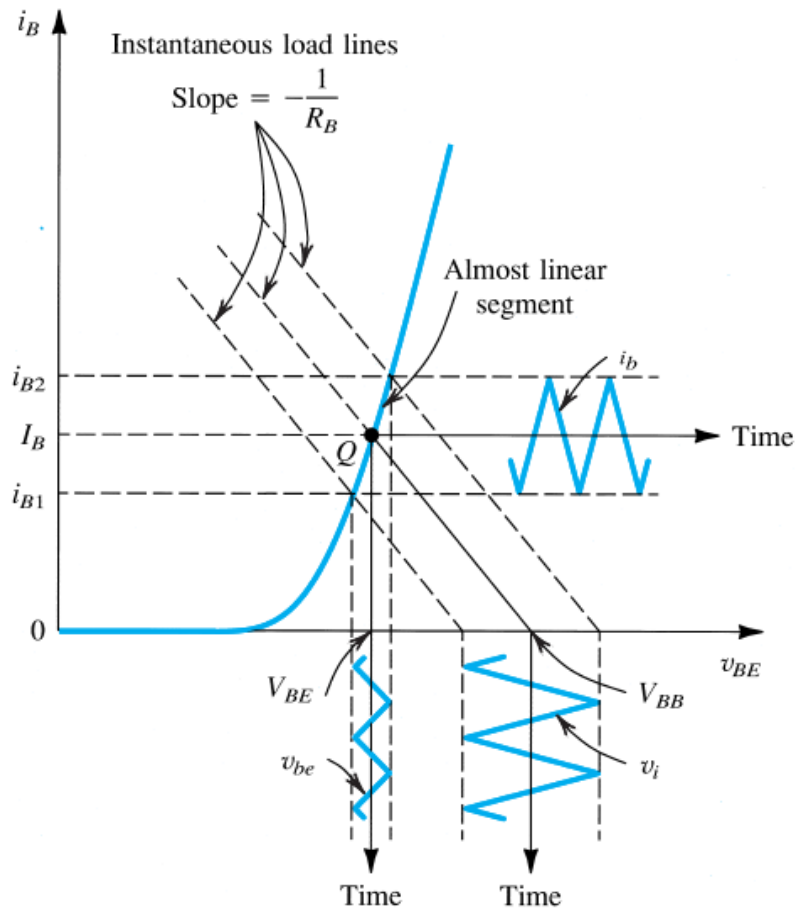


$$v_{CE} = V_{CC} - i_C \cdot R_C$$

$$i_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{1}{R_C} \cdot v_{CE}$$

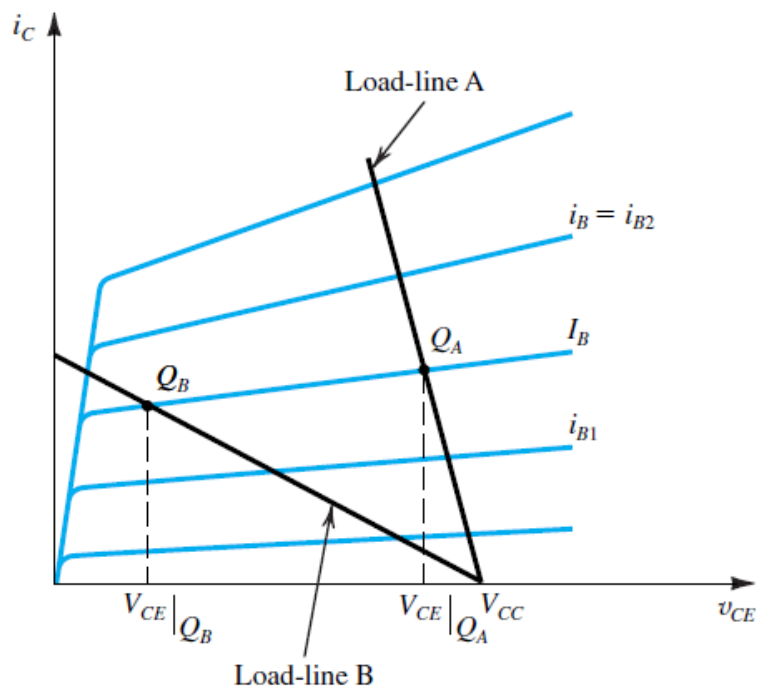


# Analiza kola grafičkom metodom



## Analiza kola grafičkom metodom

Izbor odgovarajuće radne tačke je veoma bitan za 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 i moguća su izobličenja pri većim vrednostima signala.

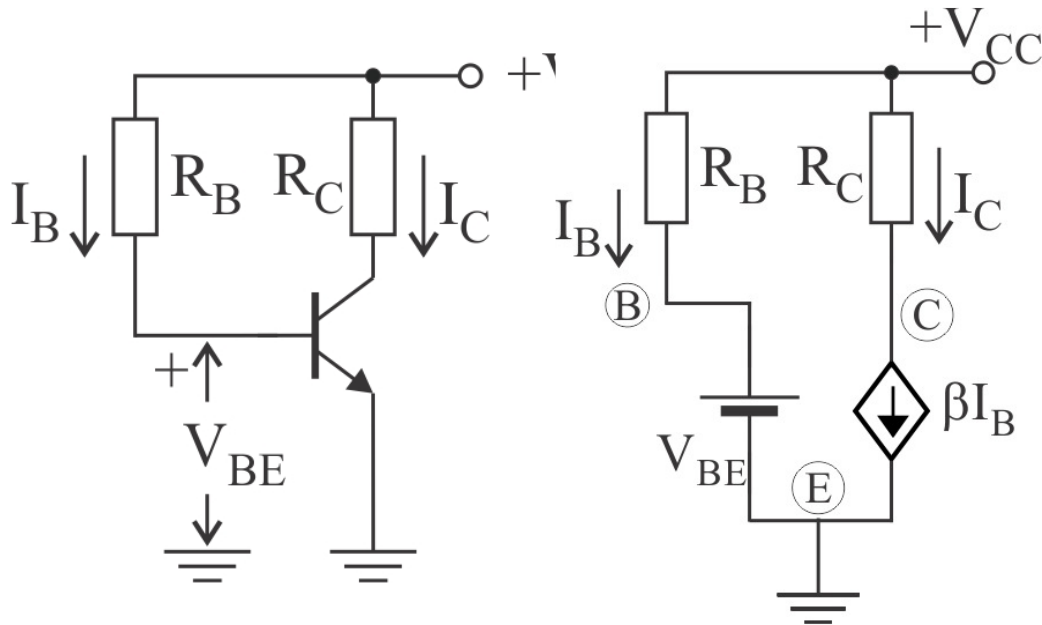




# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

## 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 nelinearne jednačine primenjuje aproksimativni model koji polazi od činjenice da se u aktivnom režimu rada napon između baze i emitora veoma malo menja.



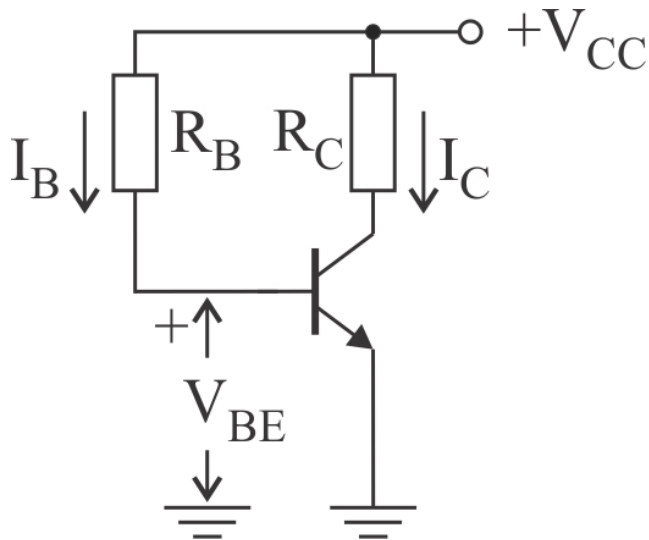
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

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

## b) DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

### Osnovna polarizacija

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



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

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

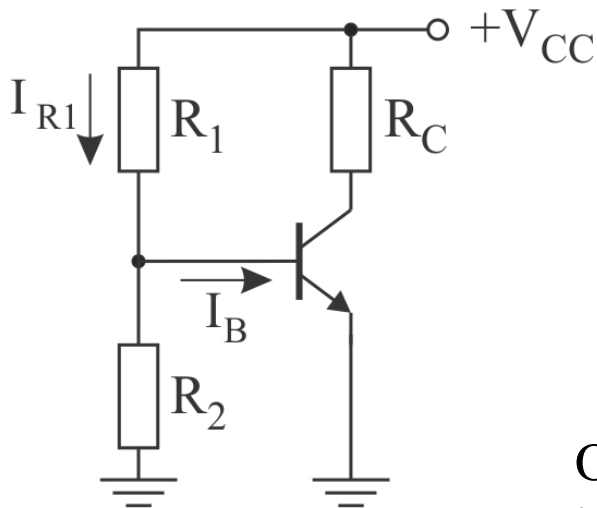
$$T \nearrow \beta \nearrow I_C \nearrow V_{CE} \searrow$$

# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

## Polarizacija razdelnikom napona

Vrednosti otpornika u kolu baze,  $R_1$  i  $R_2$ , su reda kilooma i znatno manje od vrednosti otpornika koji se koristi u kolu osnovne polarizacije (reda megaoma).

Promene struje kolektora  $I_C$  i napona kolektor emitor  $V_{CE}$  usled promena koeficijenta strujnog pojačanja  $\beta$  su značajno umanjene u odnosu na prethodno kolo za polarizaciju koje koristi jedan otpornik u kolu baze.



$$\frac{V_{CC}}{R_1} \gg I_B \Rightarrow I_{R1} \gg I_B$$

$$I_{R1} \gg I_B \Rightarrow V_B \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

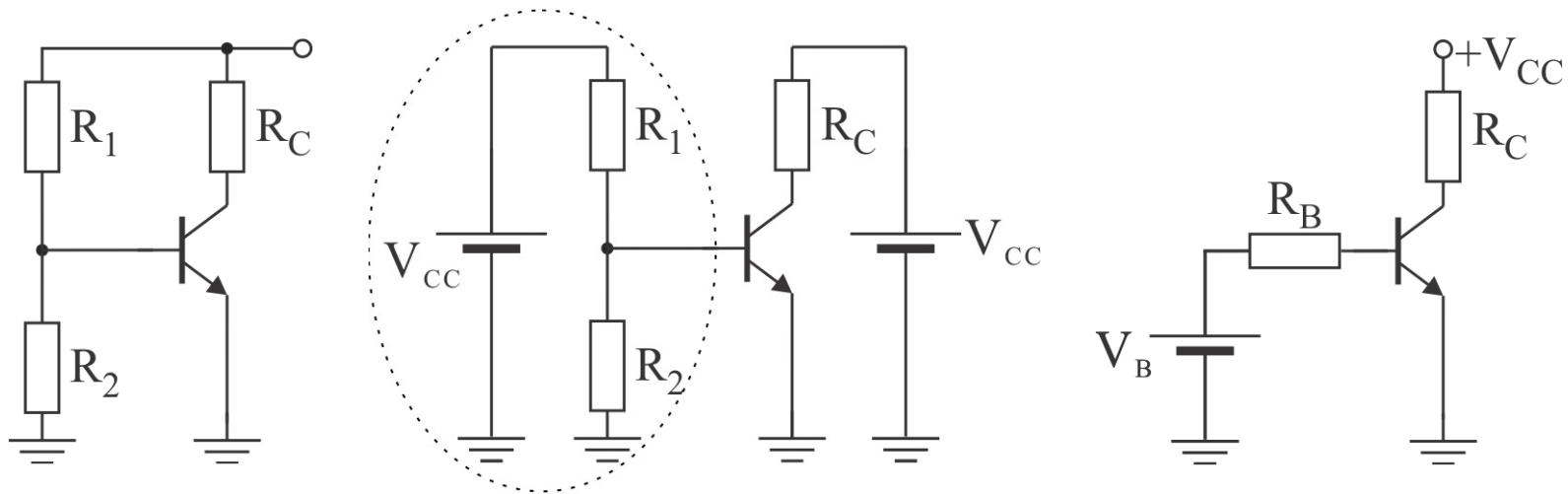
$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T} \approx I_S \exp \frac{V_{BB}}{V_T}$$

Ovi izrazi su primenjivi jedino ukoliko si otpornici  $R_1$  i  $R_2$  dovoljno mali i ako je zadovoljen uslov da je  $V_{CC}/R_{C1} \gg I_B$

# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

## Polarizacija razdelnikom napona

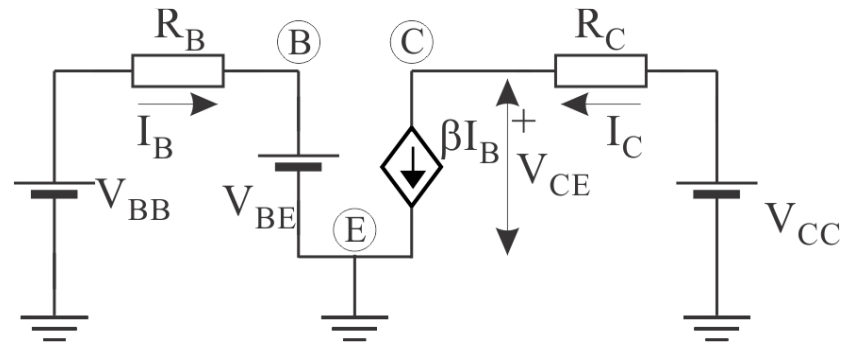
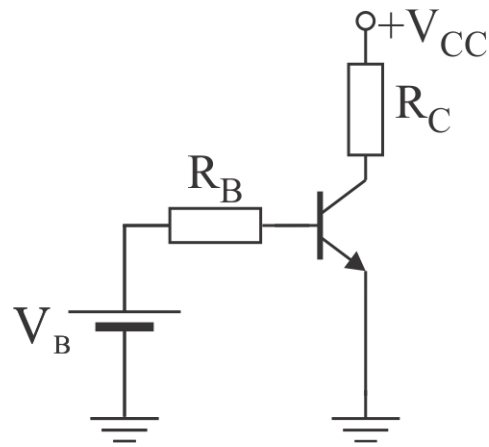
Tačnija analiza kola mora da uzme u obzir i struju baze. Ovo kolo se najjednostavnije analizira ukoliko se u kolu baze formira ekvivalentni Tevenenov generator.



Elementi Tevenenovog generatora su:  $V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$   $R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

## Polarizacija razdelnikom napona



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad I_C = \beta \cdot I_B = \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad V_{CE} = V_{CC} - \beta \frac{(V_{BB} - V_{BE})}{R_B}$$

Na kraju treba proveriti da li je tranzistor u aktivnom režimu.

Ovaj uslov je zadovoljen ukoliko je  $V_{CE} > V_{CES}$ .

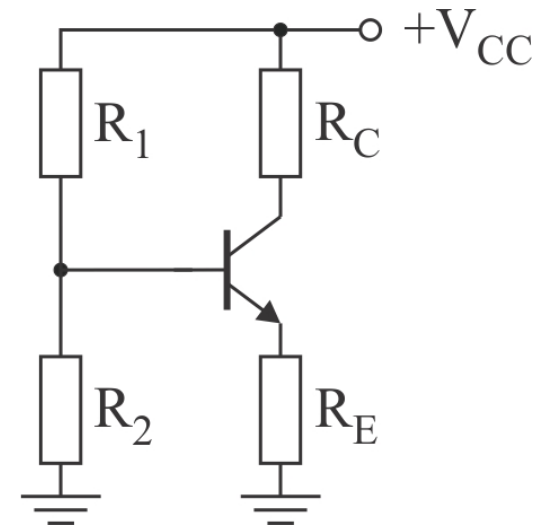
# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

## Polarizacija degeneracijom emitora

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

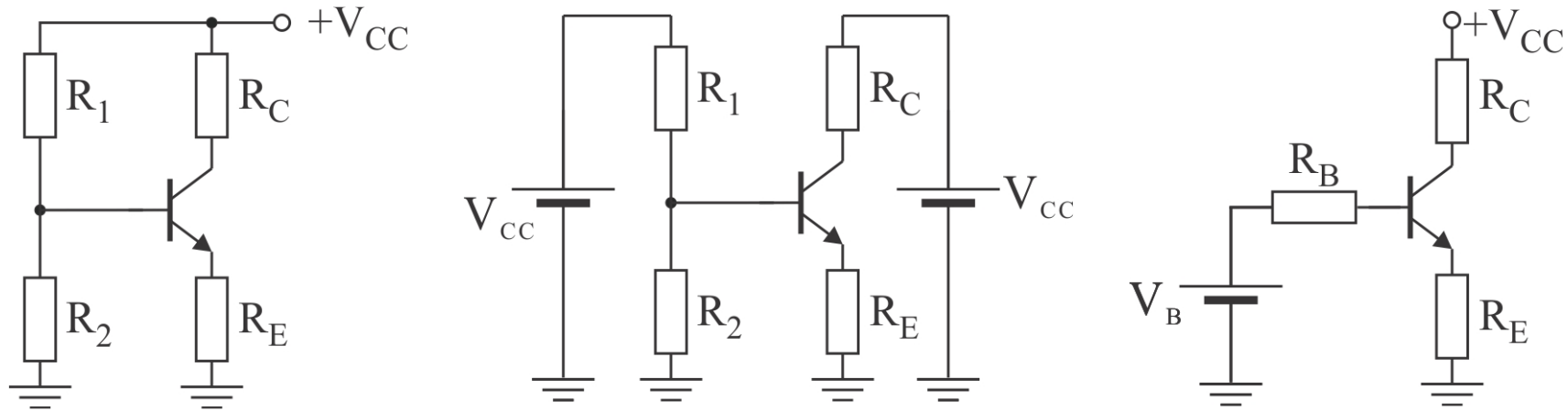
Negativna povratna sprega znači vraćenje signala sa izlaza na ulaz na taj način da se umanjuje svaka promena signala na izlazu.

Ukoliko se iz bilo kojeg razloga poveća izlazna struja  $I_C$  doći će do povećanja pada napona na otporniku  $R_E$ , a samim tim do smanjenja ulaznog napona  $V_{BE}$ .



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

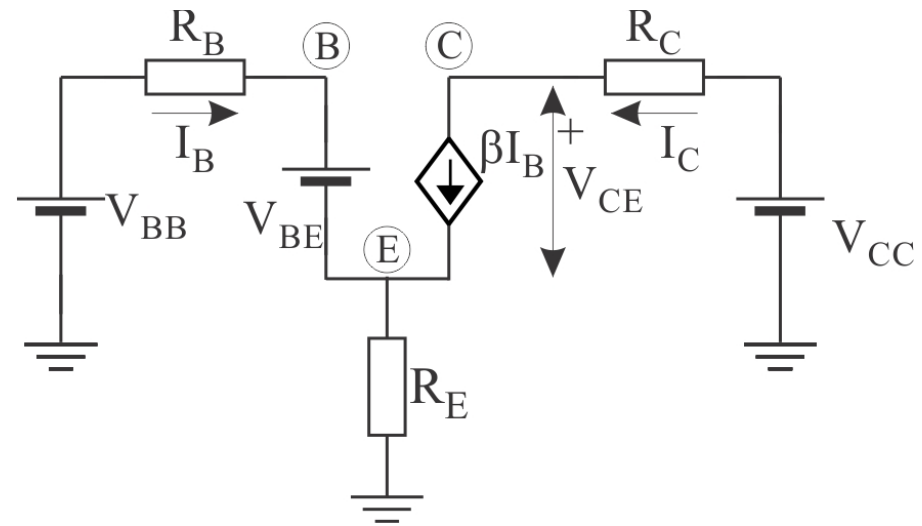
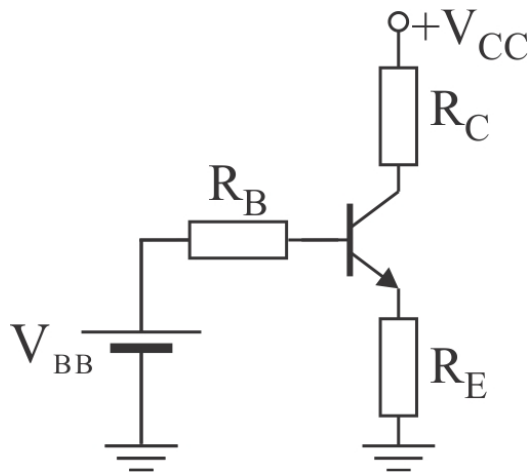
## DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale



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

Ovo kolo se najjednostavnije analizira primenom Tevenenove teoreme na elemente povezane u kolu baze. Na kraju treba proveriti da li je BC spoj inverzno polarisan ( $V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} < V_\gamma$  za NPN).

# DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale



$$V_{BB} = V_{BE} + I_B \cdot R_B + I_E \cdot R_E$$

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

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



## DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

Ukoliko se smanji ekvivalentna Tevenenova otpornost dobijamo da struja kolektora ne zavisi od  $\beta$ . To znači da je kolo mnogo stabilnije.

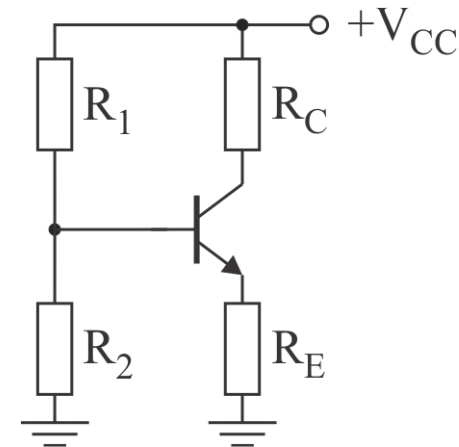
$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

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

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.

Pravilo kojim se postiže kompromis između pojačanja i stabilnosti kola iskazan je sledećom jednačinom:

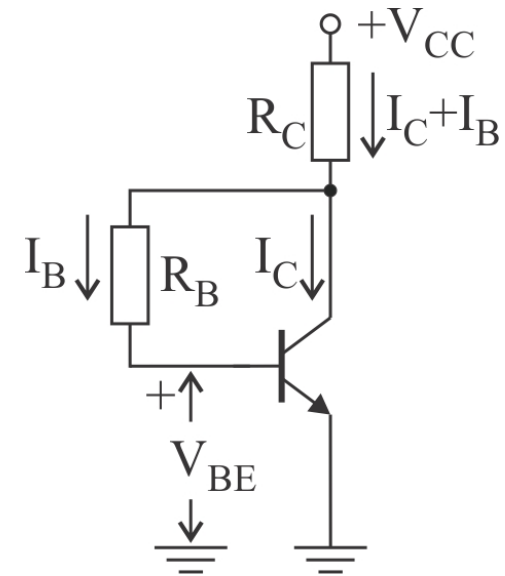
$$R_1 \parallel R_2 = R_B \approx 0,1 \cdot (1 + \beta) \cdot R_E$$



## b) DC polarizacija – analiza / model BJT za velike signale

### Polarizacija sa naponskom povratnom spregom

U ovom kolu jednosmerna ulazna struja,  $I_B$  zavisi od jednosmerne izlazne struje  $I_C$  usled povratne sprege. Ukoliko se iz bilo kojeg 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.



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

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

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

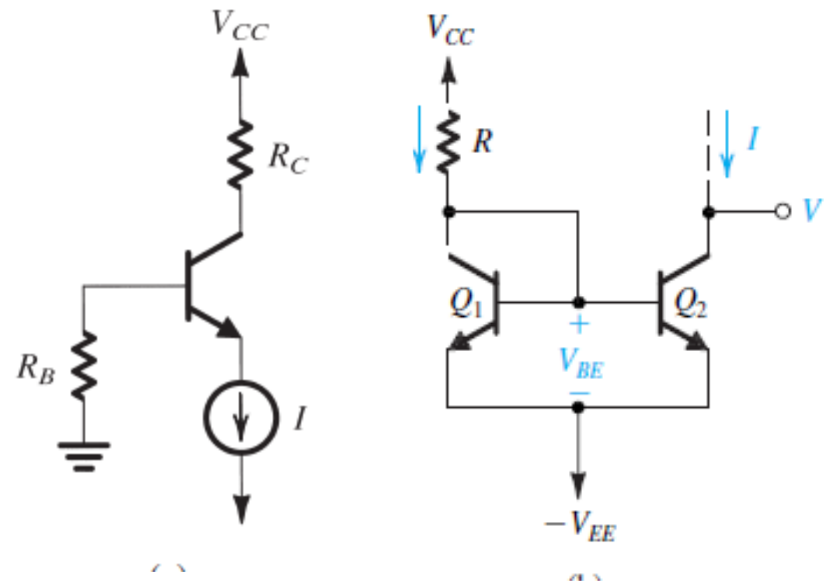
## Polarizacija izvorom konstantne struje

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 Q1 i Q2). Strujni generator će funkcionisati sve dok je tranzistor Q2 u aktivnoj oblasti.

Tranzistori u strujnom ogledalu Q1 i Q2 su identičnih karakteristika. S obzirom da su im povezani emitorski pn spojevi kroz njih 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  $\beta$  ove struje se mogu zanemariti.



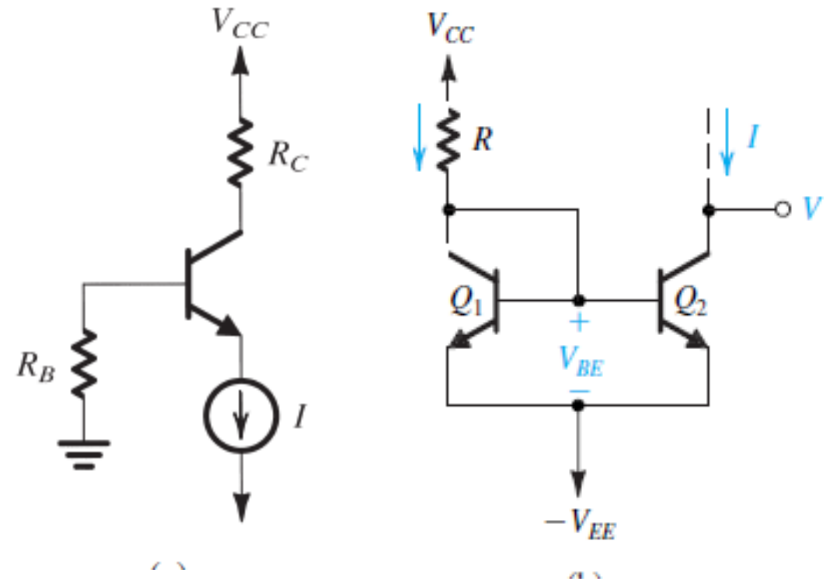
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - (-V_{EE}) - V_{BE}}{R}$$

$$I = I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R}$$

## 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 će 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.



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

$$I = I_{\text{REF}} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R}$$

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

## 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 paramtrima koji se menjaju sa temperaturom. Ovi parcijalni izvodi se nazivaju **koeficijenti stabilnosti kolektorske struje** (obeleženi sa  $S_I$ ,  $S_V$ ,  $S_\beta$ ).

$$I_C = f(I_{C0}, V_{BE}, \beta)$$

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

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

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

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

# 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 ( $S_I$ ,  $S_V$ ,  $S_\beta$ ) i izvodi pojedinih parametara tranzistora po temperaturi ( $V_{BE}$ ,  $I_{C0}$ ,  $\beta$ ).

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

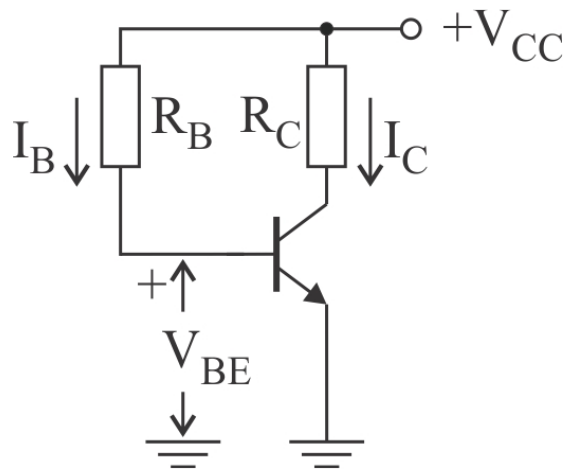
Izvodi pojedinih parametara po temperaturi zavise od konstrukcije tranzistora i njih daje proizvođač. Na njih se ne može uticati.

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 koeficijenta 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.



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

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

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

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

$$S_V = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{V_{CC}}{R_B} + (1 + \beta) \cdot I_{C0}$$



## **Elementarna pitanja**

- 1. Koeficijenti strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom i za spregu sa zajedničkim emitorom.**
- 2. Režimi rada bipolarnog tranzistora.**
- 3. Model za velike signale.**

## **Ostala ispitna pitanja**

- 1. Ebers-Molov model.**
- 2. Erlijev efekat.**
- 3. Ulazna i izlazna karakteristika bipolarnog tranzistora.**
- 4. Polarizacija razdelnikom napona.**
- 5. Polarizacija naponskom povratnom spregom.**
- 6. Polarizacija izvorom konstantne struje.**
- 7. Temperaturska stabilizacija, koeficijenti stabilnosti kolektorske struje.**