

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Sadržaj predavanja:

1. Bipolarni transistor (BJT)
2. Osnovno funkcioniranje bipolarnog tranzistora
3. Spoj zajedničke baze
4. Spoj zajedničkog emitera

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

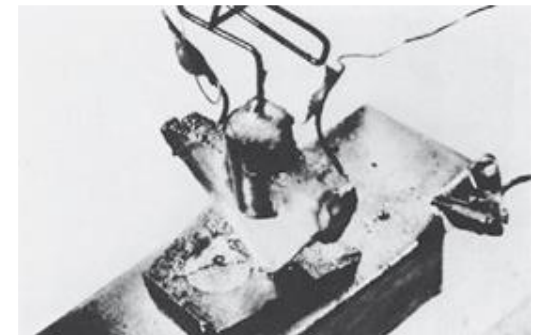
- Od 1904 – 1947 ubrzano se razvijaju vakumske cijevi
- Prva vakuumska cijev je razvijena 1904 (J.A. Fleming)
- Lee De Forest dodaje treći kontrolni element 1906 (eng. *control grid*) – nastaje trioda
- Razvoj radija i televizije je pokretač za razvoj vakuumskih cijevi
- Proizvodnja vakuumskih cijevi raste sa 1 milion (1922) na 100 miliona (1937) komada
- Prosinac 23, 1947 svijet elektronike je revolucionariziran otkrićem tranzistora
- Tranzistor su otkrili Dr. S. William Shockley, Walter H. Brattain i John Bardeen (Bell Telephone Laboratories, Prosinac 23, 1947)
- Princip funkcioniranja tranzistora je bio sličan triodi

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Prednosti tranzistora nad triodom (vakuumskom cijevi):

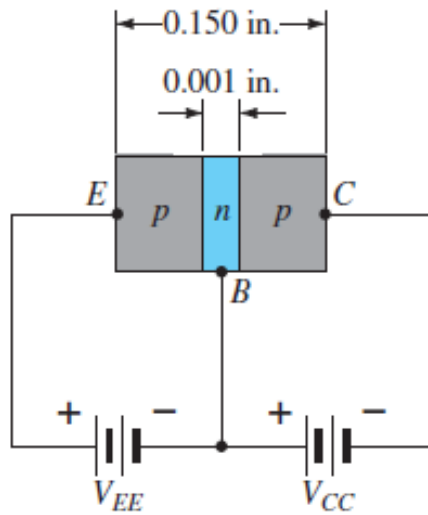
- Manjih je dimenzija i manje težine od triode
- Nisu potrebni elementi za zagrijavanje vakuumske cijevi niti ima gubitke na tim elementima
- Efikasniji su jer je manja disipacija snage nego na vakuumskim cijevima
- Nije mu potreban period zagrijavanja, funkcioniра odmah po uključenju
- Potrebni su mu manji radni naponi nego što trebaju vakuumskoj cijevi



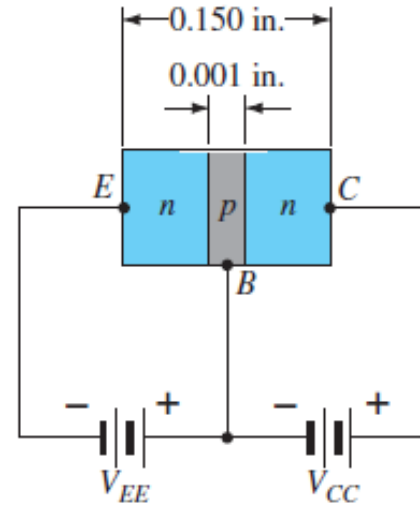
Prvi tranzistor (AT&T History Center)

# Elektronički Elementi i Sklopovi

- Tranzistor se sastoji od 3 sloja poluvodiča
- NPN tranzistori se sastoje od 2 sloja N tipa i jednog sloja P tipa poluvodiča
- PNP tranzistori se sastoje od 2 sloja P tipa i jednog sloja N tipa poluvodiča



PNP tip tranzistora



NPN tip tranzistora

# Elektronički Elementi i Sklopovi

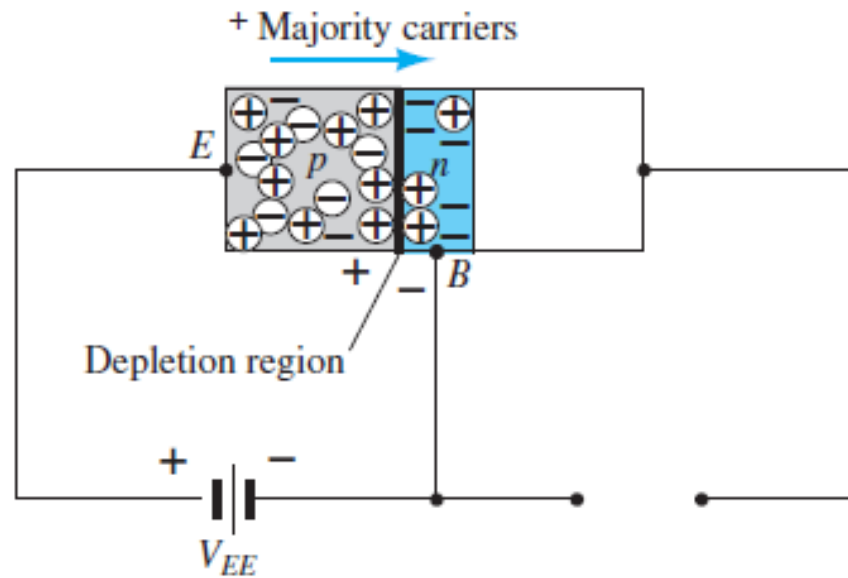
---

- Sloj emitera je visoko dopiran atomima odgovarajućih primjesa za razliku od ostala dva sloja (kolektor i baza)
- Vanjski slojevi tranzistora (emiter, kolektor) imaju puno veću fizičku širinu nego sloj koji se nalazi u sendviču (baza)
- Omjer ukupne širine tranzistora i širine baze je oko 150:1
- Dopiranje sloja u sendviču (baze) je niže nego što je za emiter i kolektor
- Niže dopiranje baze znači manji broj slobodnih nosioca u bazi
- Terminali tranzistora se označavaju velikim slovima E (emiter), B (baza) i C (kolektor)
- Bipolarni tranzistor se označava i kraticom BJT (eng. *bipolar junction transistor* )

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Propusno polarizirani NPN transistor (ako je  $V_{CB} = 0$ ) je prikazan na slici:



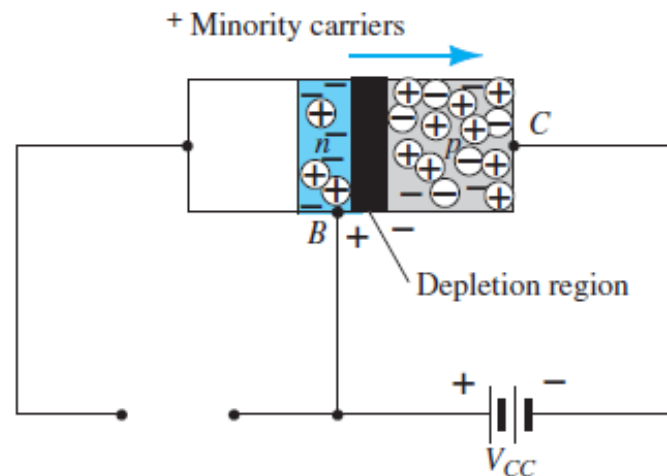
Operacija PNP tranzistora je identična ako elektrone zamijenimo šupljinama i šupljine elektronima.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

Funkcioniranje NPN tranzistora kad je  $V_{CB} = 0$  (prethodna slika) je slično kao i kod propusno polarizirane diode.

Sličnost je i u tome što je kod ovako polariziranog tranzistora osiromašeno područje (područje baze) smanjene širine što rezultira izrazitim tokom većinskih nosioca iz P u N tip.

Ako uklonimo naponski izvor  $V_{EE}$  te postavimo  $V_{CB} = V_{CC}$  dobije se situacija slično kao i kod nepropusno polarizirane diode:

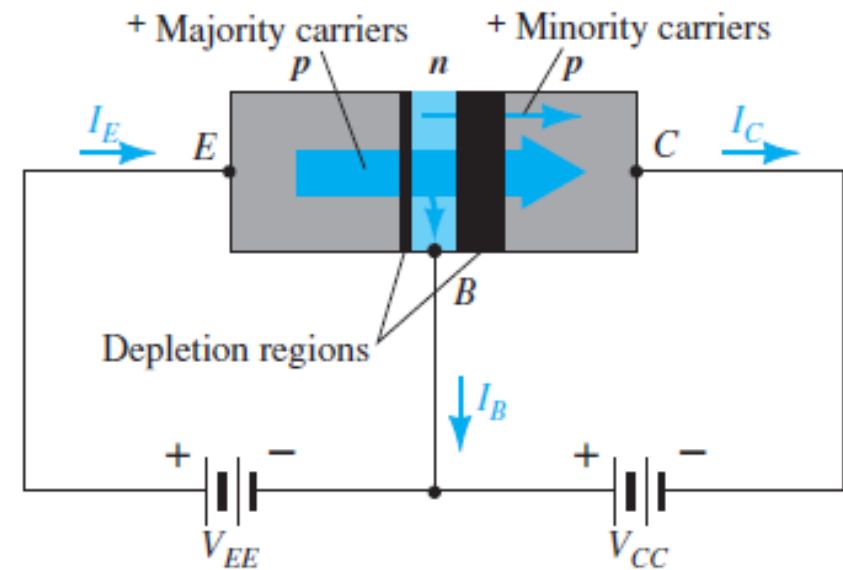


# Elektronički Elementi i Sklopovi

Na slici su prisutna oba napona  $V_{EB} = V_{EE}$  i  $V_{BC} = V_{CC}$ . Tok manjinskih i većinskih nosioca naboja je označen na slici. Također označena je i širina osiromašenih područja gdje se jasno vidi koji je od PN spojeva propusno polariziran (emiter-baza) i koji je nepropusno polariziran (baza-kolektor).

Iz fizikalne situacije, vidljivo je da veliki broj šupljina (većinski nosioci) difundira kroz PN spoj emiter-baza.

Pitanje je da li ovi većinski nosioci iz emitera doprinose struji  $I_B$  ili direktno prelaze u kolektor?





# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Budući da je sloj baze u sendviču između dva materijala P tipa vrlo tanak te niske vodljivosti vrlo mali broj nosioca doprinosi struji baze  $I_B$ .

Zbog toga je magnituda struje baze reda veličine mikroampera ( $\mu A$ ) za razliku od emitorskih i kolektorskih struja ( $I_E, I_C$ ) koje su reda veličine miliampera.

Dakle bitno veći broj većinskih nosioca će difundirati kroz spoj baza-kolektor te pridonjeti struji  $I_C$  nego što će doprinjeti struji  $I_B$ .

Na tranzistor sa prethodne slike možemo primjeniti 1. Kirchhoffov zakon:

$$(1) I_E = I_C + I_B$$

Struja emitera  $I_E$  je suma struja kolektora  $I_C$  i struje baze  $I_B$ .

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Kolektorska struja  $I_C$  sastoji se od dvije komponente:

- struje većinskih nosioca naboja  $I_{C_{majority}}$
- struje manjinskih nosioca naboja  $I_{CO_{minority}}$

Struja manjinskih nosioca naboja  $I_{CO}$  je struja koja teče kroz kolektor kada je uklonjen napon emiter baza (emiter u otvorenom krugu)

Ukupna struja kolektora jest:

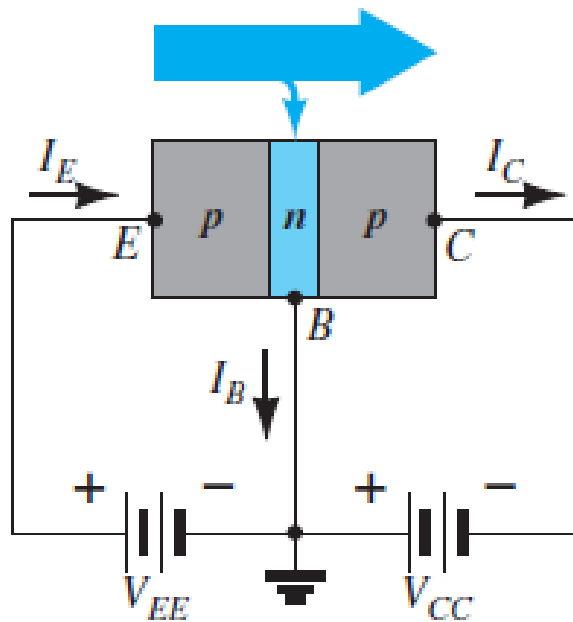
$$(2) I_C = I_{C_{majority}} + I_{CO_{minority}}$$

Struja  $I_{CO_{minority}}$  je reda veličine mikroampera (ili nanoampera) te je slična reverznoj struji zasićenja  $I_S$  kod poluvodičke diode.

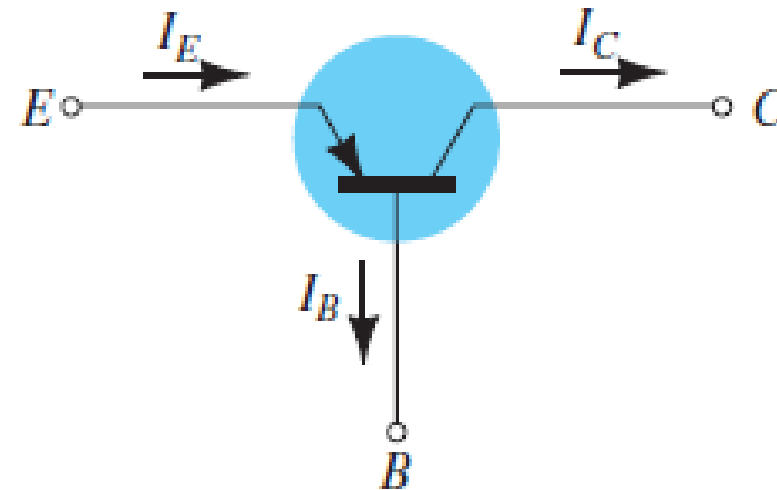
Slično kao i kod poluvodičke diode, struja  $I_{CO}$  je ovisna o temperaturi te je treba uzeti u obzir kada se dizajniraju sklopovi koji trebaju funkcionirati za široki raspon temperatura.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

PNP tranzistor u konfiguraciji zajedničke baze sa označenim konvencionalnim smjerovima napona i struja:



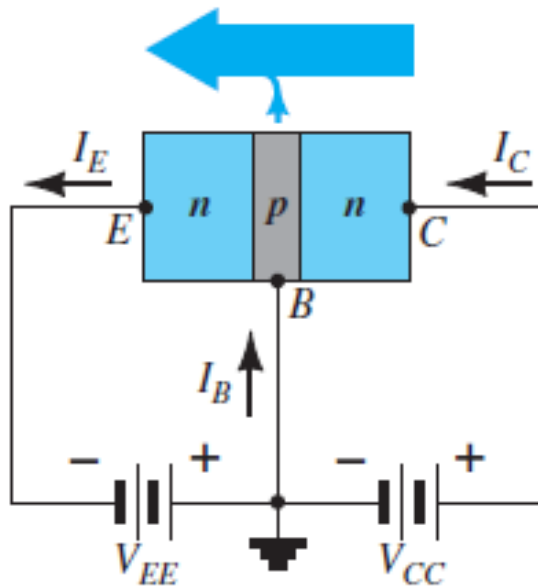
PNP tranzistor u spoju zajedničke baze



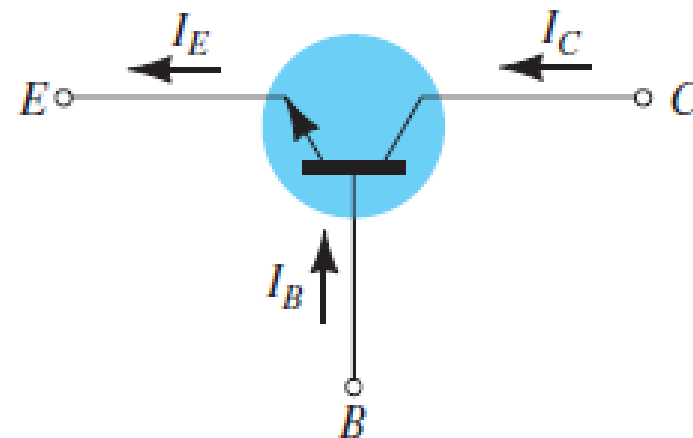
Simbol PNP tranzistora i konvencionalni smjerovi struja

# Elektronički Elementi i Sklopovi

NPN tranzistor u konfiguraciji zajedničke baze označenim konvencionalnim smjerovima napona i struja:



NPN tranzistor u spoju zajedničke baze

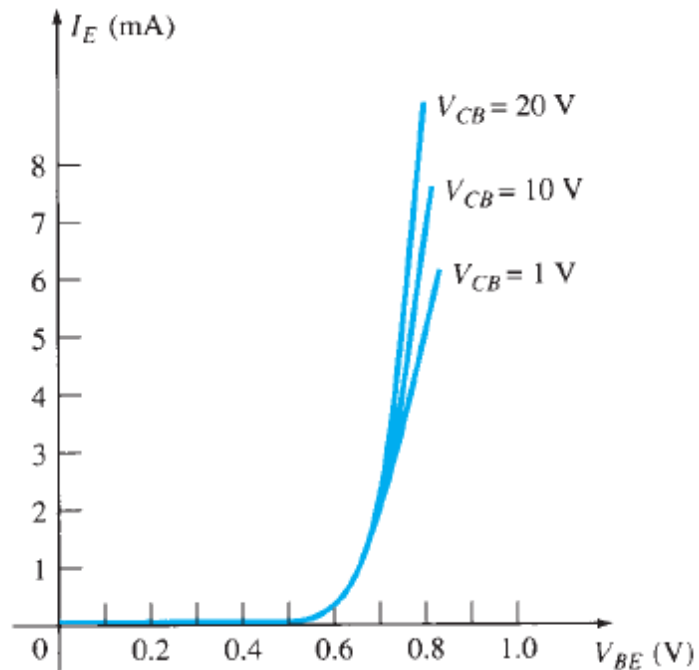


Simbol NPN tranzistora i konvencionalni smjerovi struja

# Elektronički Elementi i Sklopovi

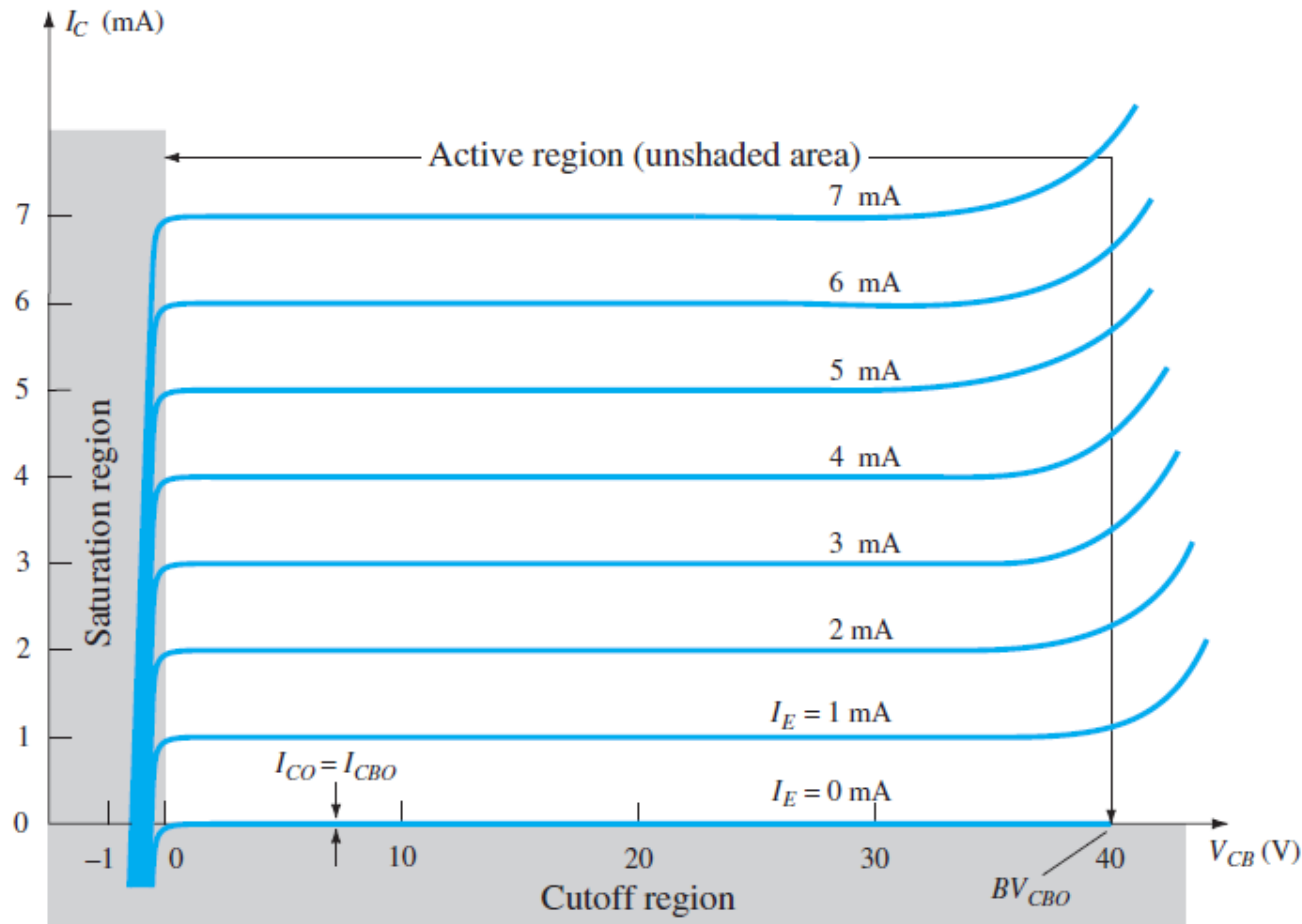
---

Da bi se u potpunosti opisao uređaj sa tri terminala kao što je tranzistor potrebne su dvije karakteristike: jedna ulazna strujno naponska karakteristika i jedna izlazna strujno naponska karakteristika.



Ulazna karakteristika za spoj zajedničke baze opisuje ovisnost struje emitera  $I_E$  o naponu baza emiter  $V_{BE}$ .

# Elektronički Elementi i Sklopovi



Izlazna strujno naponska karakteristika opisuje ovisnost kolektorske struje  $I_C$  (izlazni parametar) o naponu  $V_{CB}$  (izlazni parametar)

Na slici je izlazna strujno-naponska karakteristika za spoj zajedničke baze.

Na izlaznoj karakteristici vide se tri područja rada tranzistora:

- aktivno područje
- područje saturacije
- cutoff područje

# Elektronički Elementi i Sklopovi

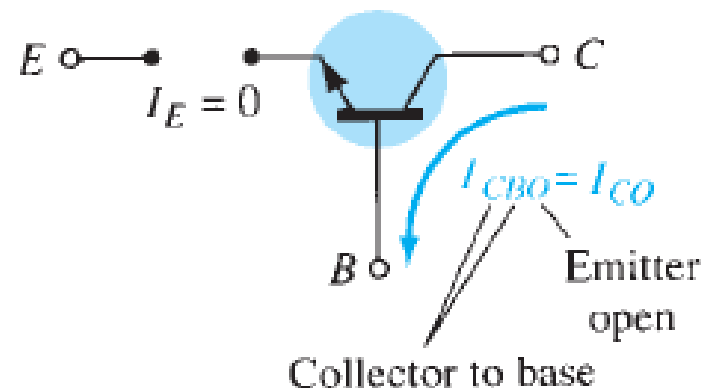
---

Aktivno područje je područje u kojem tranzistor koristimo kao linearno pojačalo:

*U aktivnom području spoja zajedničke baze, spoj emiter baza je propusno polariziran a spoj kolektor baza je nepropusno polariziran.*

Za spoj zajedničke baze, naponi spojeva emiter-baza i baza-kolektor su ujedno i konvencionalni naponi označeni na prethodnim slajdovima.

Na izlaznoj karakteristici, kada je struja emitera  $I_E = 0$ , struja kolektora  $I_C$  je reverzna struja zasićenja  $I_{CO}$ .



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Na većini specifikacija proizvođača, reverzna struja zasićenja u spoju zajedničke baze  $I_{CO}$  se označava još i  $I_{CBO}$ .

Zbog tehnologije konstrukcije tranzistora struja  $I_{CBO}$  se može zanemariti za većinu tranzistora male i srednje snage.

Za tranzistore velike snage struja  $I_{CBO}$  je u mikroamperskom području.

Slično kao i kod diode struja  $I_{CBO}$  je ovisna o temperaturi.

Na višim temperaturama za tranzistore velike snage treba uzeti u obzir i struju  $I_{CBO}$ .



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Na izlaznoj strujno naponskoj karakteristici treba primjetiti da kako struja kolektora  $I_C$  raste ona postaje približno jednaka struji emitera  $I_E$ .

Također, treba primjetiti da je uticaj napona  $V_{CB}$  na struju kolektora u aktivnom području gotovo zanemariv.

Iz izlazne strujno naponske karakteristike može se zaključiti da za tranzistor u aktivnom području u prvoj aproksimaciji vrijedi:

$$(3) I_C \cong I_E$$

Cutoff regija je regija za koju je struja kolektora  $I_C = 0$ .

*U cutoff regiji, PN spojevi baza-emiter i baza-kolektor su reverzno polarizirani.*

Regija saturacije je regija u lijevom dijelu izlazne strujno naponske karakteristike kada je  $V_{CB} \approx 0$ .

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

U saturacijskoj regiji izlazna strujna karakteristika tranzistora se dramatično mijenja.

*U saturacijskoj regiji PN spojevi emiter-baza i kolektor baza su propusno polarizirani.*

Treba primjetiti eksponencijalni porast kolektorske struje  $I_C$  sa porastom napona kolektor-baza  $V_{CB}$ .

Na ulaznoj karakteristici možemo vidjeti da kako se povećava napon  $V_{CB}$  da se emiterska struja  $I_E$  povećava eksponencijalno, gotovo identično kao kod poluvodičke diode.

To znači da jednom kad je tranzistor uključen (u aktivnom području) da je napon na spoju emiter-baza jednak:

$$(3) V_{BE} \cong 0.7V$$

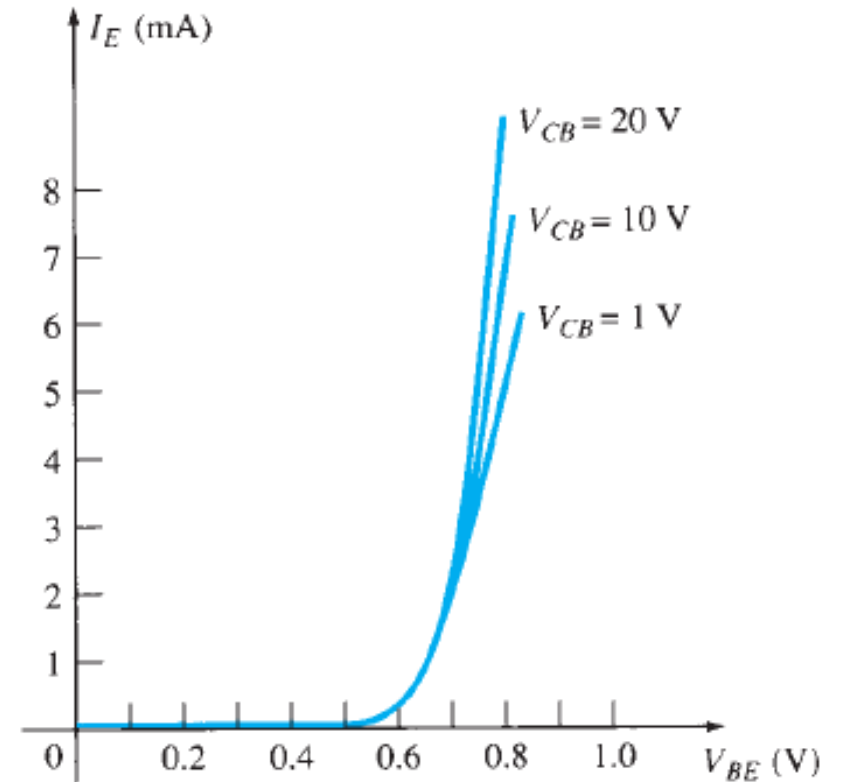
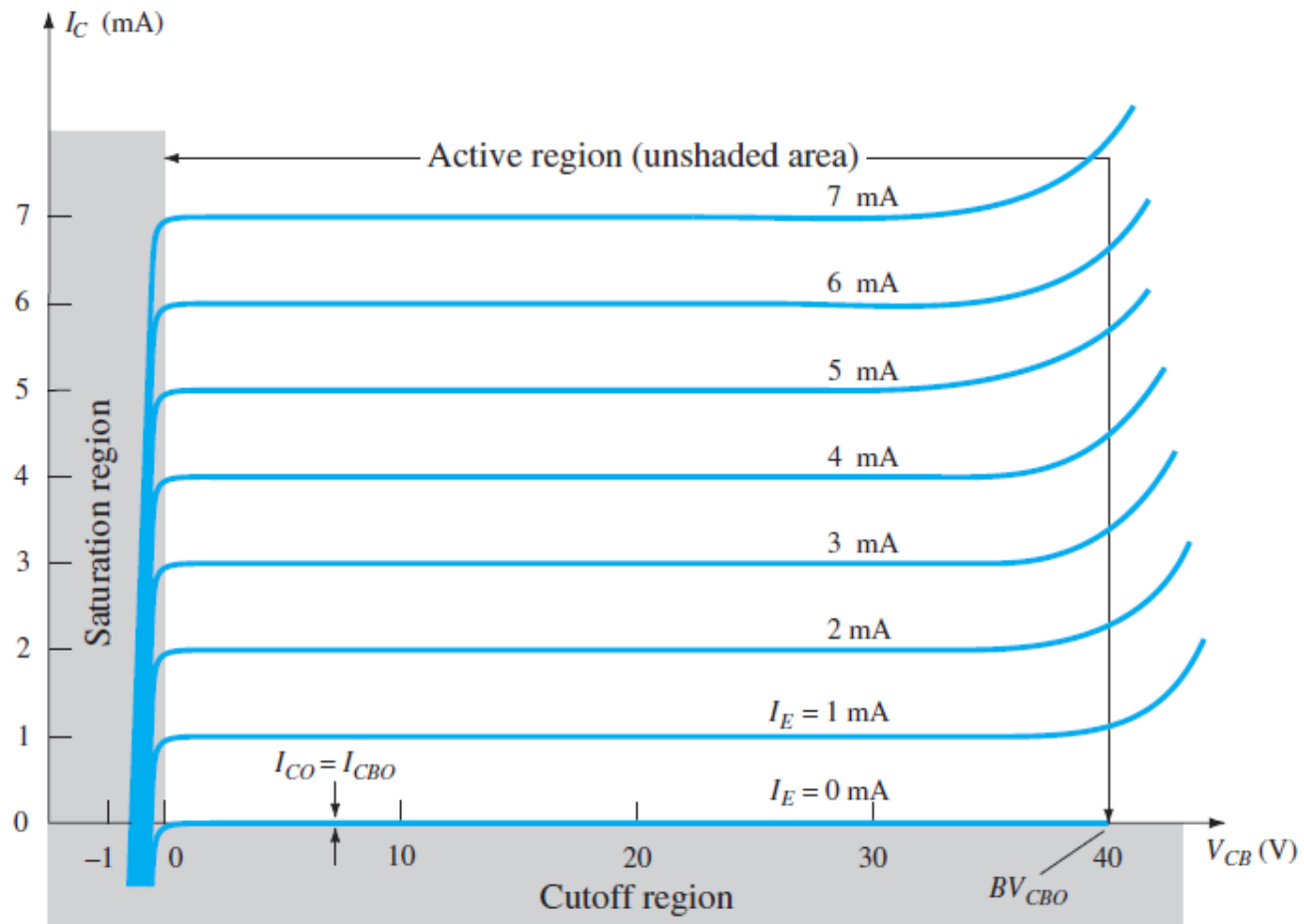
# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

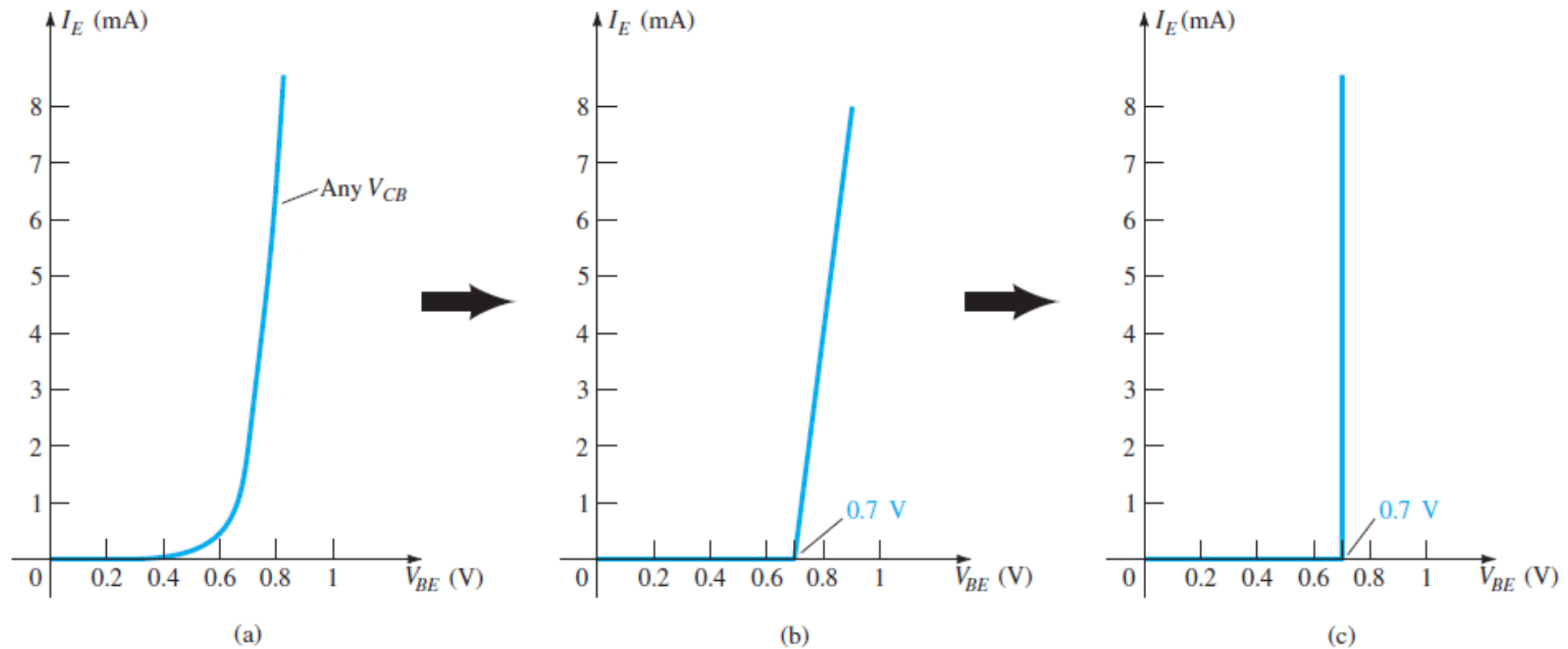
**PRIMJER 1.** Koristeći karakteristike na slici treba pronaći:

- (a) Struju kolektora ako je  $I_E = 3 \text{ mA}$  i  $V_{CB} = 10 \text{ V}$
- (b) Struju kolektora ako je  $I_E = 3 \text{ mA}$  a napon kolektor-baza se smanji na  $V_{CB} = 2 \text{ V}$
- (c) Napon baza-emitter  $V_{BE}$  ako je  $I_C = 4 \text{ mA}$  i  $V_{CB} = 20 \text{ V}$
- (d) Ponoviti (c) koristeći nadomjesni model idealne diode za spoj emiter-baza

# Elektronički Elementi i Sklopovi



# Elektronički Elementi i Sklopovi



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

## Rješenje:

(a) sa izlazne karakteristike je vidljivo da  $I_C \cong I_E = 3 \text{ mA}$

(b) efekt promjene napona  $V_{CB}$  je zanemariv te je struja kolektora  $I_C$  još uvijek  $I_C = 3 \text{ mA}$

(c) sa izlazne karakteristike vidimo da je  $I_C \cong I_E = 4 \text{ mA}$ . Sa ulazne karakteristike vidi se da je  $V_{BE} \cong 0.74 \text{ V}$

(d) opet imamo da je  $I_C \cong I_E = 4 \text{ mA}$ . Međutim, zbog modela idealne diode  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$  za bilo koji nivo struje emitera  $I_E$ .

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

U DC režimu rada može se definirati faktor pojačanja  $\alpha$  tranzistora u spoju zajedničke baze:

$$(4) \alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$

gdje su  $I_C$  i  $I_E$  nivoi struja u DC radnoj točki tranzistora. Iako bi se iz izlazne karakteristike dalo zaključiti da je  $\alpha = 1$ , u praksi je  $0.9 < \alpha < 0.998$ .

Budući da se veličina  $\alpha$  odnosi na većinske nosioce, možemo pisati:

$$(5) I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

Parametar  $\alpha$  može se definirati i za AC režim rada tranzistora:

$$(6) \alpha_{ac} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{V_{CB} = const.}$$

AC vrijednost  $\alpha$  se naziva još i *faktor pojačanja za spoj zajedničke baze* u kratkom spoju.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Na izlaznoj karakteristici spoja zajedničke baze postoji još i regija proboja tranzistora.

Kako se povećava napon  $V_{CB}$  tako raste napon nepropusne polarizacije spoja kolektor-baza. Kod dovoljno velikog napona  $V_{CB}$  može doći do lavinskog proboja koji rezultira u dramatičnom povećanju struje kolektora  $I_C$ .

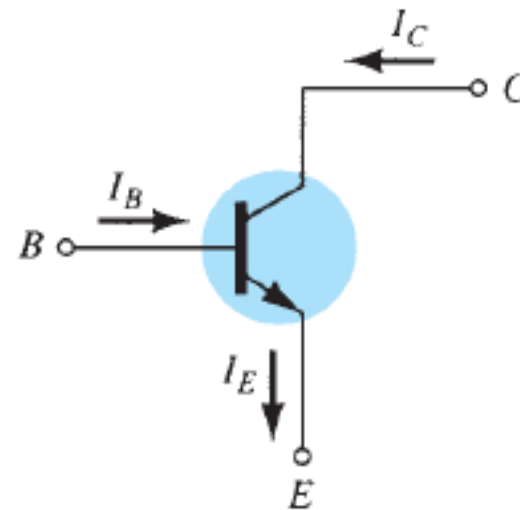
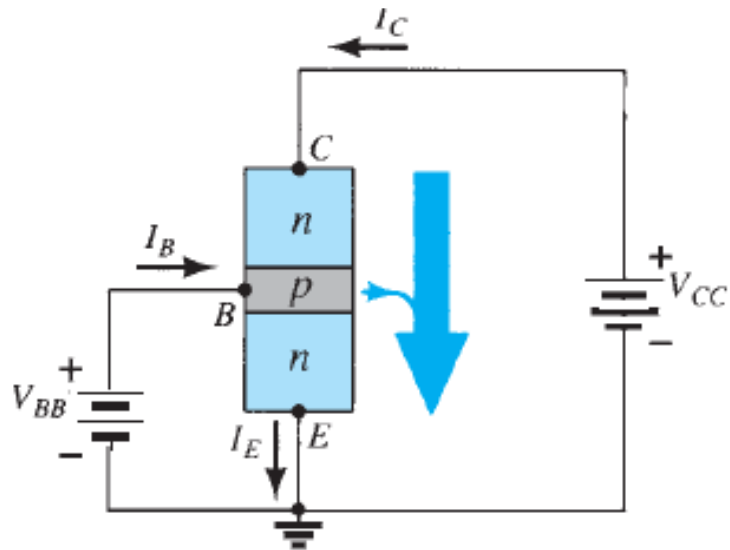
Najveći dozvoljeni napon nepropusne polarizacije spoja kolektor-baza  $V_{CB}$  se obično označava oznakom  $PV_{CBO}$  ili  $V_{(BR)CBO}$ .

Treba imati u vidu da probojni napon  $V_{CB}$  označen na izlaznoj strujno-naponskoj karakteristici vrijedi samo za kofiguraciju zajedničke baze.



# Elektronički Elementi i Sklopovi

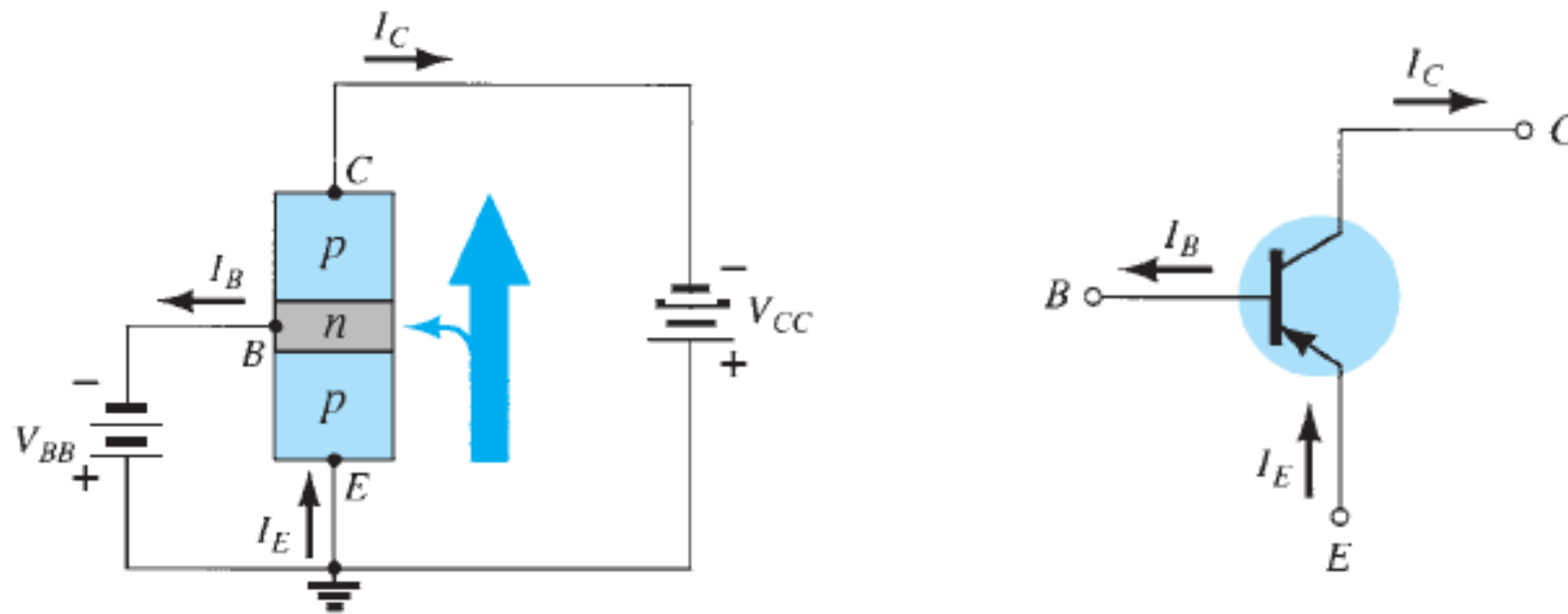
Najčešća konfiguracija tranzistora je spoj zajedničkog emitera gdje je emiter zajednička elektroda:



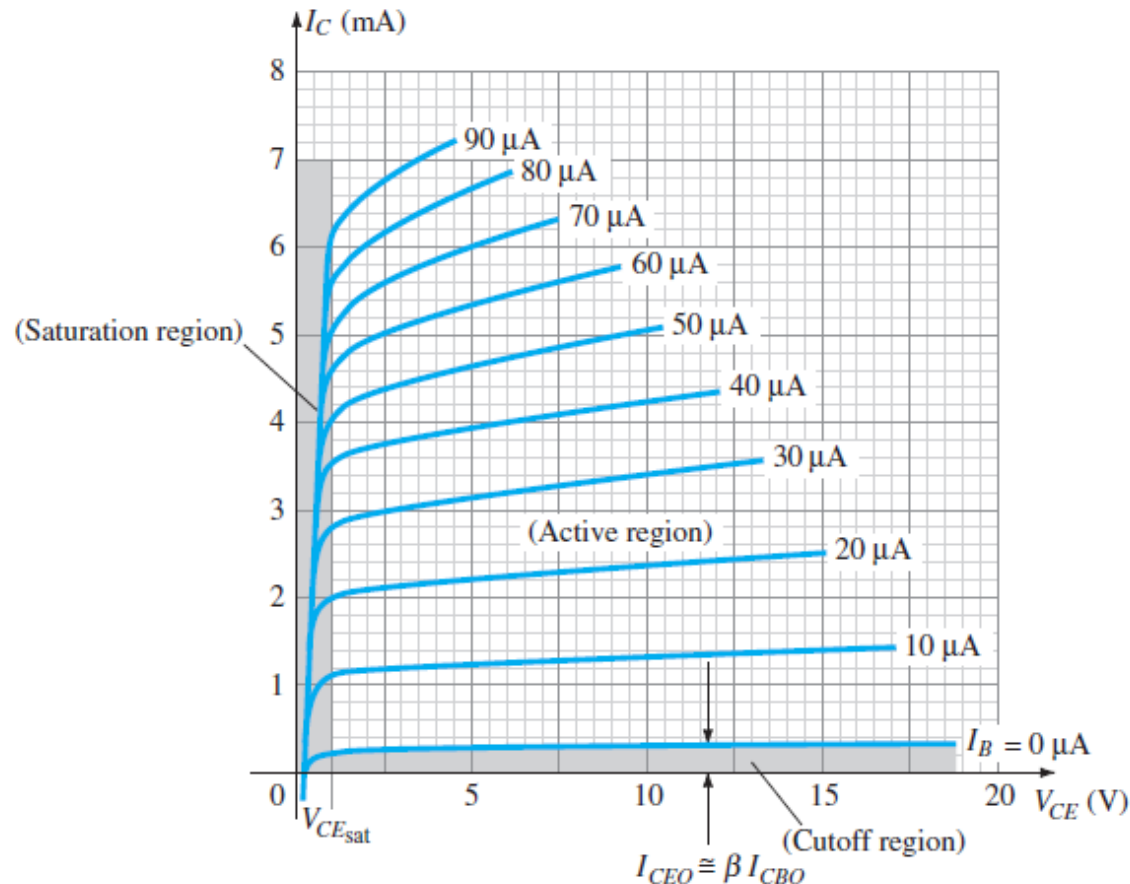
Konvencionalni smjerovi struja i polariteti napajanja za NPN tranzistor u spoju zajedničkog emitera

# Elektronički Elementi i Sklopovi

Konvencionalni smjerovi struja i polariteti napajanja za PNP tranzistor u spoju zajedničkog emitera



# Elektronički Elementi i Sklopovi



Izlazna strujno naponska karakteristika tranzistora u spoju zajedničkog emitera.

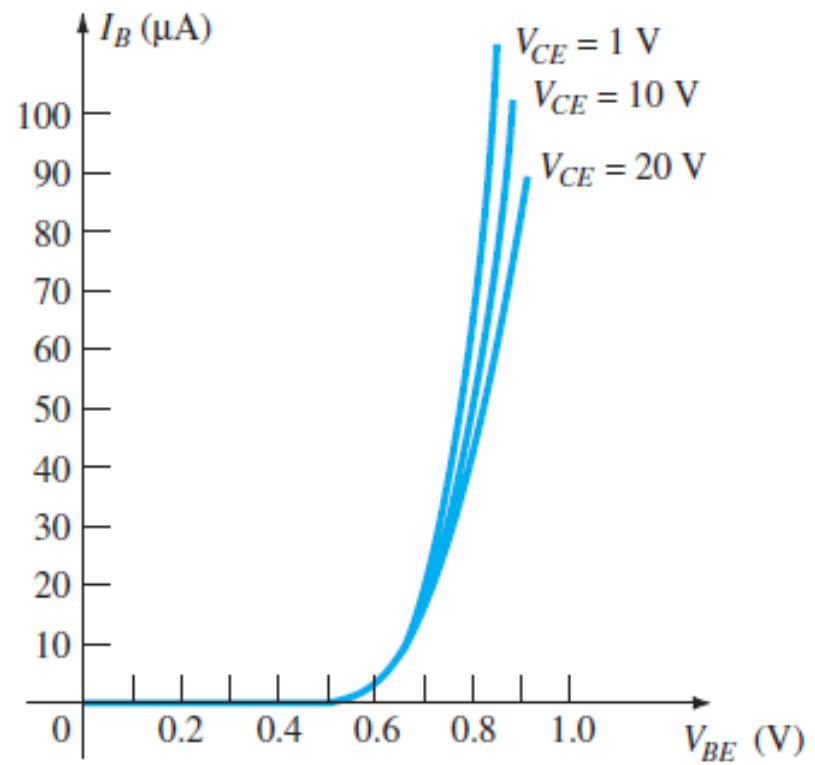
Za razliku od spoja zajedničke baze, izlazna karakteristika je ovisnost struje kolektora  $I_C$  o naponu kolektor-emiter  $V_{CE}$  za fiksnu vrijednost struje baze  $I_B$ .

Magnituda struje baze  $I_B$  je u mikroamperima dok je magnituda struje kolektora  $I_C$  izražena u miliamperima.

Izlazna karakteristika također ima veći nagib u aktivnoj regiji nego kod spoja zajedničke baze.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

Ulazna strujno naponska karakteristika tranzistora u spoju zajedničke baze.



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Za spoj zajedničkog emitera vrijede iste relacije kao i za spoj zajedničke baze:

$$(7) I_E = I_C + I_B$$

Također vrijedi kao i za spoj zajedničke baze:

$$(8) I_C = \alpha I_E$$

Cutoff regija tranzistora u spoju zajedničkog emitera nije tako dobro definirana kao kod spoja zajedničke baze. Iz izlazne karakteristike spoja zajedničkog emitera vidi se da kada je struja  $I_B = 0$ , struja kolektora  $I_C$  nije jednaka 0!

Uvrštavajući jednadžbu (7) u (5) može se dobiti:

$$(9) I_C = \alpha(I_C + I_B) + I_{CBO}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Jednadžba (9) može se napisati kao:

$$(10) I_C = \frac{\alpha I_B}{1-\alpha} + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$$

Ako u (10) uvrstimo da je  $I_B = 0A$  te ako koristimo tipičnu vrijednost  $\alpha = 0.996$  dobije se:

$$(11) I_C = \frac{\alpha(0 A)}{1-\alpha} + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} = \frac{I_{CBO}}{1-0.996} = \frac{I_{CBO}}{0.04} = 250 I_{CBO}$$

Kada bi struja  $I_{CBO}$  bila  $1 \mu A$  tada bi struja kolektora bila  $0.25 mA$ .

Struju kolektora  $I_C$  koja teče kroz kolektor pri struji baze  $I_B = 0A$  označavamo sa  $I_{CEO}$ :

$$(12) I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \Big|_{I_B=0 \mu A}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---