

Glava 1

Bipolarni tranzistori

Bipolarni tranzistor je bila prva aktivna poluprovodnička komponenta, komercijalno uspješna, koju su u Belovoj laboratoriji teorijski istražili, napravili i testirali Šokli, Bardin i Bredejn krajem 1947. godine. Za svoje otkriće tranzistorskog efekta dobili su Nobelovu nagradu. Ovim izumom počinje revolucionarni razvoj poluprovodničke elektronike.

Iako je nakon prvih bipolarnih tranzistora razvijen veliki broj različitih poluprovodničkih komponenata, bipolarni tranzistori se još uvijek koriste, jer postoje primjene kod kojih bipolarni tranzistori nude najbolje performanse (visokofrekveničska i analogna elektronika, na primjer). Sem toga, danas se mogu tehnološki realizovati zajedno sa MOS tranzistorima i proizvoditi u kombinovanim CMOS tehnološkim procesima, čime se proširuje njihova primjena u poluprovodničkoj industriji.

U samom nazivu, *bipolarni* upućuje na činjenicu da su obje vrste slobodnih nosilaca nanelektrisanja, elektroni i šupljine, odgovorne za rad tranzistora. U suštini, difuzija manjinskih nosilaca nanelektrisanja igra vodeću ulogu, kao u slučaju PN spoja. *Tranzistor* je kovanica nastala od engleskih riječi TRANSFER-RESISTOR, što znači prenosni otpornik. U engleskom jeziku, pun naziv ovog tranzistora je *bipolar junction transistor* (BJT), gdje riječ *junction* (spoj) označava da PN spojevi imaju suštinski važnu ulogu za rad ovih tranzistora.

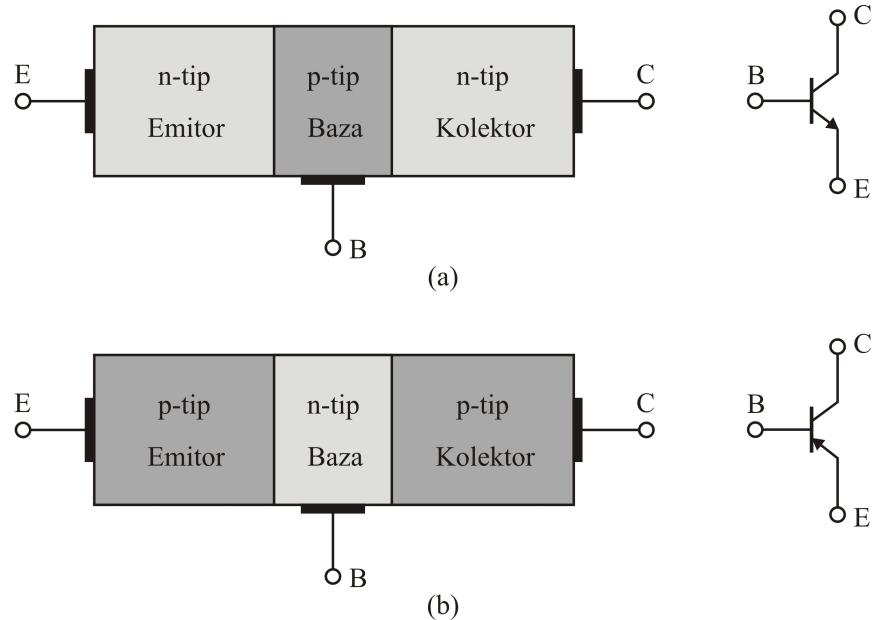
1.1. Struktura bipolarnog tranzistora

Bipolarni tranzistor se sastoji od tri dopirane oblasti koje formiraju sen-dvič strukturu. U zavisnosti od tehnološke realizacije i tipa središnje oblasti,

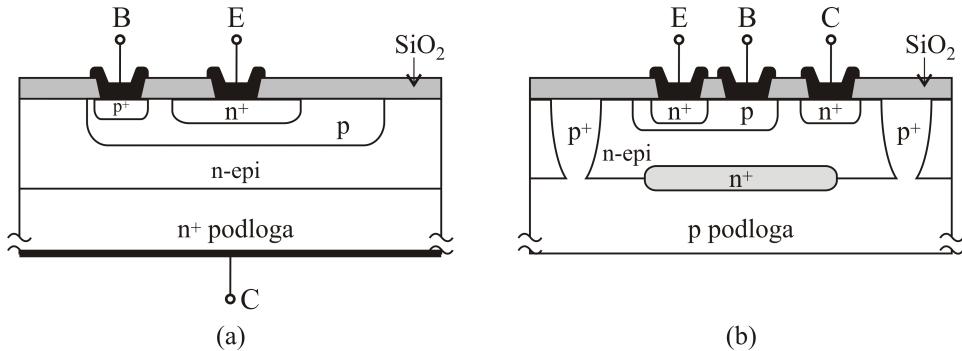
razlikuju se dvije vrste bipolarnog tranzistora, NPN tranzistor i PNP tranzistor. Svaka dopirana oblast se kontaktira, pa je bipolarni tranzistor komponenta sa tri izvoda (priključka, elektrode ili kontakta). Oblast sa najvećom koncentracijom primjesa zove se emitor - E (eng. *emitter*), središnja oblast je baza - B (eng. *base*), dok je oblast sa najmanjom koncentracijom primjesa kolektor - C (eng. *collector*).

Na sl. 1.1 prikazani su strukture i električni simboli NPN (a) i PNP (b) tranzistora. NPN tranzistor se odlikuje većom transkonduktansom i većom brzinom, koje su posljedica veće pokretljivosti elektrona u odnosu na šupljine, pa je i zastupljenost ovog tipa tranzistora znatno veća. To je razlog što će se u ovoj glavi analiza rada tranzistora odnositi na NPN tranzistor.

Kao što se može vidjeti sa sl. 1.1, bipolarni tranzistor ima dva PN spoja: između baze i emitora (BE spoj) i između baze i kolektora (BC spoj). Mada bi se iz pojednostavljenje strukture tranzistora moglo zaključiti da je ona simetrična, u realizaciji to nije tako, jer se emitorska i kolektorska oblast znatno razlikuju u pogledu nivoa dopiranja i koncentracije primjesa. Uobičajene vrijednosti koncentracija primjesa u emitoru su oko 10^{21} cm^{-3} , u bazi oko 10^{18} cm^{-3} , dok je u kolektoru ta vrijednost oko 10^{15} cm^{-3} .



Slika 1.1. Struktura i električni simbol NPN (a) i PNP (b) tranzistora



Slika 1.2. NPN tranzistor kao diskretna komponenta (a) i kao komponenta u okviru integrisanih kola (b)

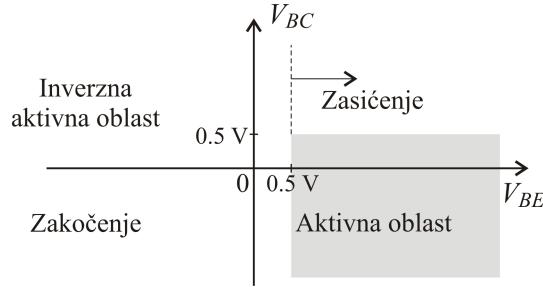
Tehnološki se bipolarni tranzistori mogu realizovati kao diskretne komponente ili u integriranim kolima (sl. 1.2).

Kod diskretne komponente, kontakti za emitor i kolektor su na suprotnim stranama (sl. 1.2.a), pa je uspostavljena struja vertikalna. U integrisanoj tehnici, svi kontakti se nalaze u jednoj ravni (sl. 1.2.b), pa je uspostavljena struja paralelna ravni kontakata. p^+ oblasti izoljuju tranzistor od ostalih komponenata (tranzistora) na zajedničkoj podlozi (silicijumska pločica).

1.2. Princip rada NPN tranzistora

Kako bipolarni tranzistor ima dva PN spoja, a svaki od njih može se direktno i inverzno polarisati, to u zavisnosti od načina polarizacije tih spojeva razlikujemo četiri oblasti rada bipolarnog tranzistora: direktna aktivna oblast (dalje u tekstu biće označena samo kao aktivna oblast), zasićenje ili saturacija (eng. *saturation*), zakočenje (eng. *cut-off region*) i inverzna aktivna oblast. Na sl. 1.3 prikazane su oblasti rada (ili modovi rada, odnosno režimi rada) tranzistora u zavisnosti od napona primijenjenih na BE i BC PN spojeve tranzistora.

Ukoliko je namjena bipolarnog tranzistora pojačavanje signala, onda se tranzistor polariše tako da radi u aktivnoj oblasti. Zasićenje (ili saturacija) i zakočenje su režimi rada tranzistora kada on ima ulogu prekidača (u logičkim kolima, na primjer), dok je inverzni aktivni režim bez značajnijih primjena. Na sl. 1.3 naglašena je aktivna oblast rada NPN tranzistora, koja podrazumijeva da je napon V_{BE} veći od približno 0.5 V i da je napon V_{BC} manji od približno 0.5 V.



Slika 1.3. Oblasti rada tranzistora u zavisnosti od polarizacije PN spojeva

1.2.1. Aktivni režim rada

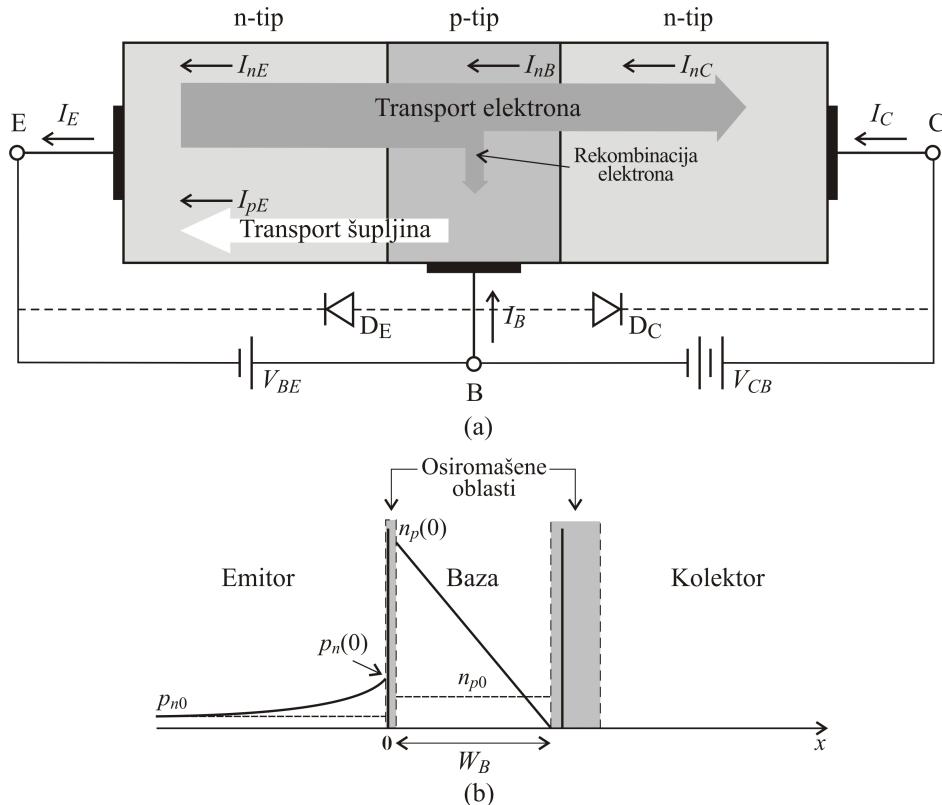
Princip rada bipolarnog tranzistora biće objašnjen na primjeru NPN tranzistora u aktivnom režimu. Polarizacija tranzistora ostvaruje se spoljašnjim izvorima napajanja koji direktno polarišu BE spoj ($V_{BE} > 0$) i inverzno BC spoj ($V_{BC} < 0$). To znači da će baza biti na većem potencijalu u odnosu na emitor i manjem potencijalu u odnosu na kolektor, odnosno potencijal kolektora je najveći.

Ranije smo vidjeli da se kod PN spojeva uspostavlja struja koja ima difuzionu i driftovsku komponentu. U analizi rada bipolarnog tranzistora u aktivnom režimu biće zanemarena driftovska komponenta struje, jer je koncentracija termički generisanih manjinskih nosilaca uobičajeno veoma mala i može se zanemariti.

Direktna polarizacija BE spoja omogućava injekciju elektrona iz emitora u bazu i injekciju šupljina iz baze u emitor (sl. 1.4.a). Elektroni su u emitoru većinski nosioci nanelektrisanja i njihova koncentracija je velika. Takođe, šupljine su u bazi većinski nosioci nanelektrisanja, te je i njihova koncentracija u bazi velika. Za bipolarni tranzistor je poželjno da je nivo koncentracije elektrona u emitoru iznad nivoa koncentracije šupljina u bazi, te se tranzistori projektuju tako da je koncentracija primjesa u emitoru znatno veća od koncentracije primjesa u bazi. Ovaj transport većinskih nosilaca nanelektrisanja kroz BE spoj čini emitorsku struju I_E koja ima dvije komponente, struju elektrona I_{nE} i struju šupljina I_{pE} . Kako su elektroni i šupljine nanelektrisanja suprotnog znaka, to je emitorska struja jednaka zbiru ove dvije komponente, pri čemu je dominantna komponenta struja elektrona:

$$I_E = I_{nE} + I_{pE}. \quad (1.1)$$

Elektroni, koji su injektovani iz emitora, u bazi predstavljaju manjinske nosioce nanelektrisanja. Na emitorskoj strani baze, koncentracija elektrona



Slika 1.4. Tok struja kod NPN tranzistora (a) i raspodjela manjinskih nosilaca nanelektrisanja u emitoru i bazi (b) u aktivnom režimu rada tranzistora

je velika. Koncentracija elektrona na kolektorskoj strani baze je skoro nula, jer je BC spoj inverzno polarisan i privlači manjinske nosioce nanelektrisanja iz baze. Elektroni se kroz bazu difuziono kreću, od BE spoja ka BC spoju. Određen broj elektrona se u bazi rekombinuje sa većinskim šupljinama, dok najveći broj njih stiže do granice osiromašene oblasti bazno-kolektorskog spoja (BC spoja).

Kolektorska struja

Najveći broj elektrona koji injekcijom iz emitora uđu u bazu, difuzijom stižu do BC spoja. BC spoj je inverzno polarisan i zahvata sve pristigle elektrone koji prelaze u kolektor, čineći kolektorskiju struju elektrona:

$$I_C \simeq I_{nC} = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_t}}. \quad (1.2)$$

Kolektorskia struja ne potiče samo od transporta elektrona od emitora

do kolektora. Nju čini i struja manjinskih šupljina I_{pC} , koje kroz BC spoj difunduju iz kolektora u bazu i koja je posljedica inverzne polarizacije BC spoja. U slučaju da je BE spoj u ravnotežnom stanju (nema injekcije elektrona iz emitora), inverzna polarizacija BC spoja omogućava i transport termički generisanih manjinskih elektrona u kolektor. Tada kroz BC spoj postoji inverzna struja BC spoja I_{CB0} , koja je mala i u aktivnom režimu se može zanemariti. Međutim, važno je napomenuti da je ovo struja koja se koristi za karakterizaciju curenja tranzistora u isključenom stanju (kada su oba spoja ili u ravnotežnom stanju ili inverzno polarisana).

Sada je kolektorska struja jednaka:

$$I_C = I_{nC} + I_{CB0}. \quad (1.3)$$

Bazna struja I_B ima dvije komponente: komponentu uslijed difuzije šupljina iz baze u emitor i komponentu uslijed injekcije šupljina iz spoljašnjeg kola koja ima ulogu da nadoknadi šupljine u bazi koje se rekombinuju sa elektronima pristiglim iz emitora. Obje komponente bazne struje proporcionalne su naponu V_{BE} .

Emitorska struja I_E jednaka je zbiru struje elektrona injektovanih iz emitora u bazu i struje šupljina injektovanih iz baze u emitor (1.1), pri čemu je, za NPN tranzistor, korisna samo struja elektrona I_{nE} . Odnos korisne i ukupne emitorske struje zove se *efikasnost emitora*:

$$\gamma_E = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{I_{nE}}{I_E} \quad (1.4)$$

i poželjno je da γ_E ima što veću vrijednost, odnosno da je struja I_{nE} značajno veća od struje I_{pE} . To podrazumijeva da koncentracija primjesa u emitoru mora biti što je moguće veća, a u bazi što je moguće manja.

Emitorska struja jednaka je zbiru kolektorske i bazne struje:

$$I_E = I_C + I_B. \quad (1.5)$$

Strujno pojačanje

Ranije je rečeno da je uloga tranzistora u aktivnom režimu rada pojačanje signala. Izlazna veličina tranzistora je uglavnom na kolektoru, dok ulazna veličina može biti na bazi ili na emitoru.

Ukoliko je ulazna veličina na emitoru, tada je baza zajednički kontakt, pa je riječ o *konfiguraciji sa zajedničkom bazom*. Odnos kolektorske struje

elektrona i emitorske struje elektrona:

$$\alpha = \frac{I_{nC}}{I_{nE}}. \quad (1.6)$$

naziva se *faktor pojačanja* tranzistora u spoju sa zajedničkom bazom (eng. *amplification factor*) i ima vrijednosti koje su veoma bliske jedinici, ali ipak manje od jedan. Standardno je $0.95 < \alpha < 1$. U ovom slučaju se ne radi o stvarnom strujnom pojačanju ($\alpha < 1$), ali konfiguracija sa zajedničkom bazom ima praktične primjene jer može, na primjer, obezbijediti pojačanje snage.

Ako prepostavimo da je $I_E \simeq I_{nE}$, tada se dobija jednačina za kolektorskiju struju:

$$I_C = \alpha I_E. \quad (1.7)$$

Ukoliko je ulazna veličina na bazi, tada je emitor zajednički kontakt, pa je riječ o *konfiguraciji sa zajedničkim emitorom*. Na osnovu (1.7) i (1.5), kolektorskiju struju će biti jednaka:

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B. \quad (1.8)$$

Ako sa β označimo:

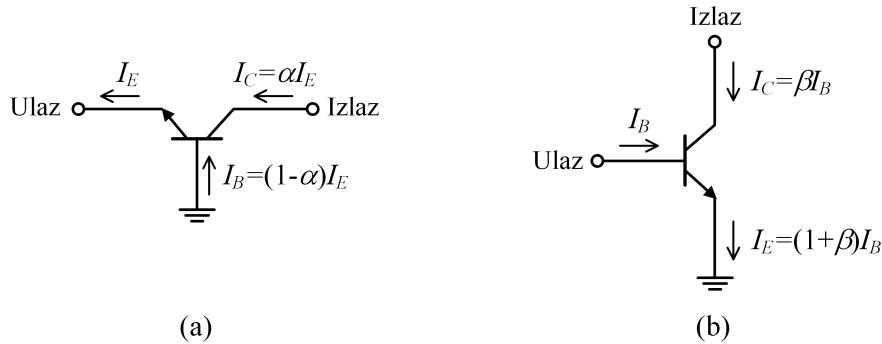
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (1.9)$$

onda je:

$$I_C = \beta I_B. \quad (1.10)$$

Konstanta β zove se *strujno pojačanje* tranzistora sa zajedničkim emitorom (eng. *current gain*). Strujno pojačanje β dominantno zavisi od širine bazne kvazineutralne oblasti i nivoa dopiranja baze i emitora. Tipične vrijednosti su u granicama od nekoliko desetaka do nekoliko stotina, dok za tranzistore posebnih namjena mogu biti i do 1000.

Na sl. 1.5 prikazan je NPN tranzistor u konfiguraciji (spoju) sa zajedničkom bazom i zajedničkim emitorom, sa naznačenim strujama tranzistora.



Slika 1.5. NPN tranzistor u konfiguraciji sa zajedničkom bazom (a) i zajedničkim emitorom (b)

1.3. Statičke I-V karakteristike

Osim struja tranzistora, u praksi je važno poznavati i strujno-naponske (I-V) karakteristike tranzistora. Tranzistor u spoju zajedničkog emitora je u najčešćoj primjeni. Tada su izlazne veličine na kolektoru, a ulazne na bazi, pa pod strujno-naponskim karakteristikama podrazumijevamo zavisnost struje kolektora od napona između baze i emitora $I_C = f(V_{BE})$ i napona između kolektora i emitora $I_C = f(V_{CE})$. Često se govori i o *prenosnoj karakteristici* $I_C = f(V_{BE})$ i o *izlaznoj karakteristici* $I_C = f(V_{CE})$. Ulazna struja baze u funkciji ulaznog napona između baze i emitora, tj. $I_B = f(V_{BE})$ je *ulazna karakteristika*.

1.3.1. Ulazne I-V karakteristike

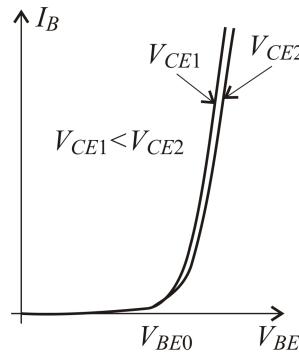
Ulazna karakteristika tranzistora određena je sa :

$$I_B = \frac{I_S}{\beta} e^{V_{BE}/V_t}. \quad (1.11)$$

Kada se napon V_{CE} povećava, onda se e^{-V_{CE}/V_t} smanjuje, što utiče na blago smanjenje struje baze. Drugim riječima, sa povećanjem napona V_{CE} , ulazna I-V karakteristika blago se pomjera udesno (sl. 1.6). Ovo pomjeranje je toliko malo da se u praksi najčešće zanemaruje i koristi se jednoznačna karakteristika u funkciji V_{CE} .

Potpuno isto se ponaša i prenosna karakteristika $I_C = f(V_{BE})$ kada je $V_{CE} = \text{const.}$ Dakle, i ona se sa porastom napona V_{CE} zanemarljivo malo pomjera udesno, pa se i ova karakteristika uglavnom tretira kao jednoznačna u

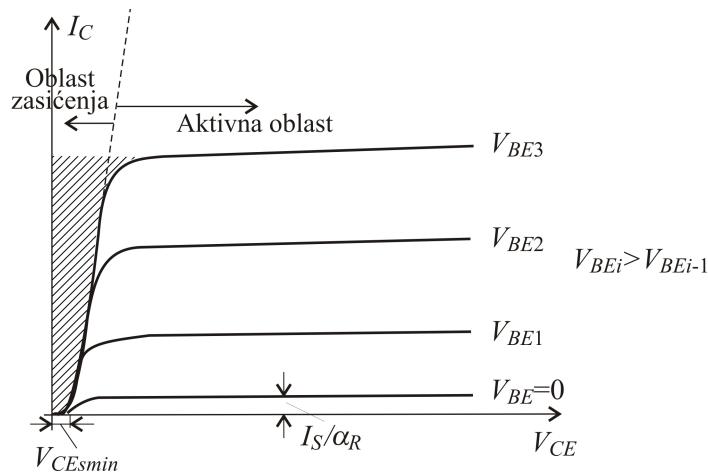
funkciji napona V_{CE} . Realno, međutim, kolektorska struja zavisi od napona V_{CE} zbog modulacije širine baze, o čemu će biti riječi kasnije.



Slika 1.6. Ulazna statička I-V karakteristika

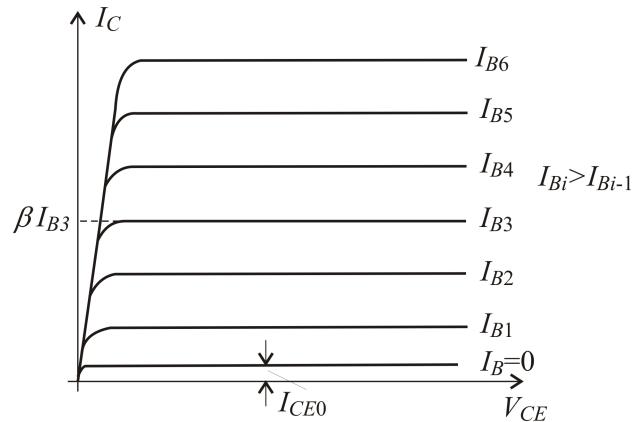
1.3.2. Izlazne I-V karakteristike

Izlazna statička I-V karakteristika daje zavisnost kolektorske struje od napona V_{CE} , pri $V_{BE} = \text{const.}$ Posmatraćemo promjenu napona V_{CE} u opsegu od nula do vrijednosti napona polarizacije kolektora. Ovaj napon se, obično, označava sa V_{CC} i standardno je u granicama od nekoliko volti do nekoliko desetaka volti. U opsegu napona $0 \leq V_{CE} \leq V_{CC}$, karakteristika $I_C = f(V_{CE})$ ima dvije oblasti, aktivnu oblast i oblast zasićenja. U obje



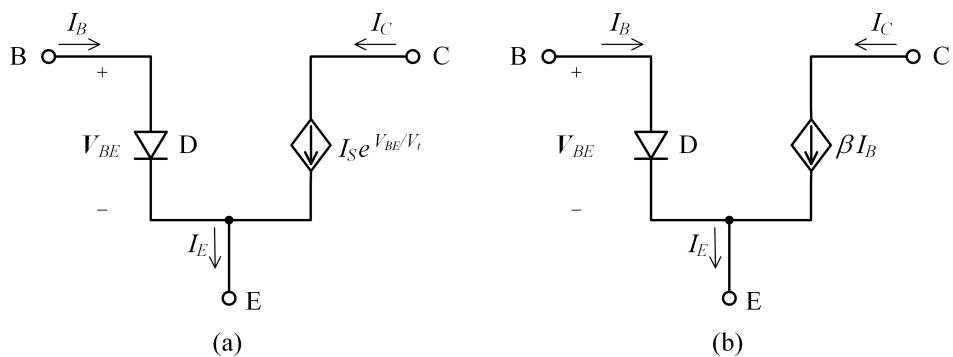
Slika 1.7. Izlazne statičke I-V karakteristike

oblasti rada, BE spoj (emitorska dioda) je direktno polarisan sa naponom $V_{BE} > V_{BE0} \simeq (0.5 \div 0.6)$ V, gdje je V_{BE0} napon praga provođenja BE spoja. Na sl. 1.6 to je napon u koljenu $I_B - V_{BE}$ karakteristike.



Slika 1.8. Izlazne staticke I-V karakteristike pri konstantnoj ulaznoj struci I_B

Izlazne $I_C - V_{CE}$ karakteristike na sl. 1.8 su paralelne sa V_{CE} osom u aktivnoj oblasti, jer kolektorska struja ne zavisi od napona V_{CE} . Odatle proizlazi da je izlazna otpornost tranzistora beskonačno velika ($r_o \rightarrow \infty$), pa se tranzistor između kolektora i emitora može zamijeniti strujnim generatorom, kao na sl. 1.9. Ovo su idealizovani modeli tranzistora u aktivnoj oblasti za velike signale. U prvoj slučaju (sl. 1.9.a), struja strujnog generatora je naponskom kontrolisana (upravljanja), dok je u drugom kontrolisana (upravljanja) strujom (sl. 1.9.b).



Slika 1.9. Idealni modeli NPN tranzistora za velike signale sa naponskim (a) i strujnim (b) upravljanjem

1.3.3. Erlijev efekat

Realno, kolektorska struja u aktivnoj oblasti zavisi od napona V_{CE} , pa je izlazna otpornost tranzistora r_o konačna. Naime, kod izvođenja jednačine za kolektorskiju struju pretpostavljen je da se širina osiromašene oblasti BC spoja ne mijenja sa promjenom inverzne polarizacije tog spoja. Međutim, povećanjem napona V_{CE} , povećava se i potencijal kolektora, pa se osiromašena oblast BC spoja dodatno širi na račun smanjenja bazne kvazineutralne oblasti. Ovaj efekat promjene širine bazne kvazineutralne oblasti u funkciji napona V_{CE} poznat je kao *efekat modulacije širine baze* ili kao *Erlijev efekat*.

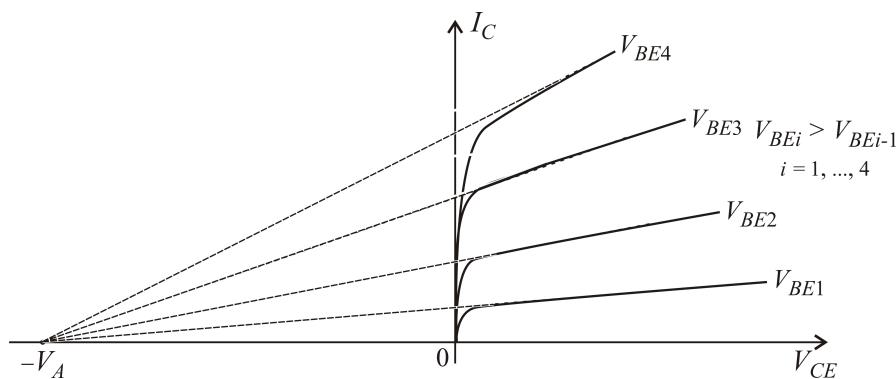
Otpornost između kolektora i emitora, koja se još naziva *izlazna* ili *dinamička otpornost* i označava sa r_o , jednaka je:

$$r_o = \left. \frac{1}{\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}}} \right|_{V_{BE}=\text{const}} = \frac{V_A}{I_C}. \quad (1.12)$$

Konstanta V_A ne zavisi od kolektorskije struje i naziva se *Erlijev napon*. Ovo ukazuje da je $I_C(V_{CE})$ pramen linearnih karakteristika, čiji nagib zavisi od kolektorskije struje i Erlijevog napona (sl. 1.10). Sve prave imaju zajedničku tačku pri $V_{CE} = -V_A$, a njihov analitički oblik dat je sa:

$$I_C = I_S \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) e^{\frac{V_{BE}}{V_t}}. \quad (1.13)$$

Tipična vrijednost Erlijevog napona je u granicama od 50 do 100 V, dok kod tranzistora posebnih namjena može imati i veće i manje vrijednosti. Izlazna otpornost tranzistora r_o koristi se uglavnom u analizi malih signala. Ukoliko se zanemari Erlijev efekat, slijedi da $r_o \rightarrow \infty$.



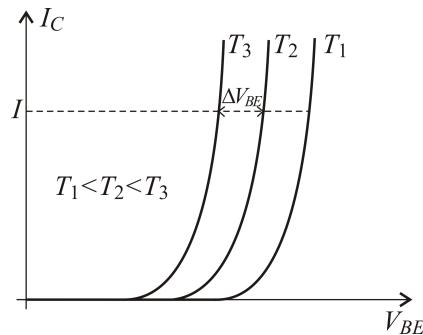
Slika 1.10. Statičke karakteristike tranzistora sa Erlijevim efektom

1.4. Temperaturne karakteristike

Parametri bipolarnog tranzistora veoma su osjetljivi na promjene temperature. Među najosjetljivije parametre ubrajaju se inverzna struja zasićenja I_S , napon BE spoja V_{BE} , strujno pojačanje β i granična frekvencija tranzistora (nije predmet razmatranja u ovoj knjizi).

Inverzna struja zasićenja se udvostručuje za svako povećanje temperature za oko 5 do 10 °C. S obzirom na to da je I_S veoma mala, njena temperaturna promjena nema bitan uticaj na temperaturnu osjetljivost sklopova sa tranzistorima.

Napon između baze i emitora V_{BE} ima negativan temperaturni koeficijent. Kao kod dioda, dV_{BE}/dT ima vrijednosti koje se kreću u opsegu od -1.5 do -2.5 mV/°C. To znači da se sa povećanjem temperature za 1 °C napon V_{BE} smanjuje za 1.5 do 2.5 mV. Prenosna I-V karakteristika $I_C = f(V_{BE})$ pomjera se ulijevo sa porastom temperature (sl. 1.11).



Slika 1.11. Prenosna I-V karakteristika i uticaj promjene temperature

Strujno pojačanje β takođe ima pozitivni temperaturni koeficijent koji se kreće u opsegu +5000 do +7000 ppm/°C (ppm je milioniti dio, 10^{-6}).

1.5. Ograničenja u radu tranzistora

Prilikom rada sa bipolarnim tranzistorom neophodno je poznavati ograničenja koja se odnose na napone između kontakata tranzistora i struje kontakata, kako ne bi došlo do oštećenja komponente.

Disipacija snage

Disipacija snage jedan je od osnovnih parametara bipolarnog tranzistora.

Definiše se kao proizvod jačine kolektorske struje i napona između kolektora i emitora:

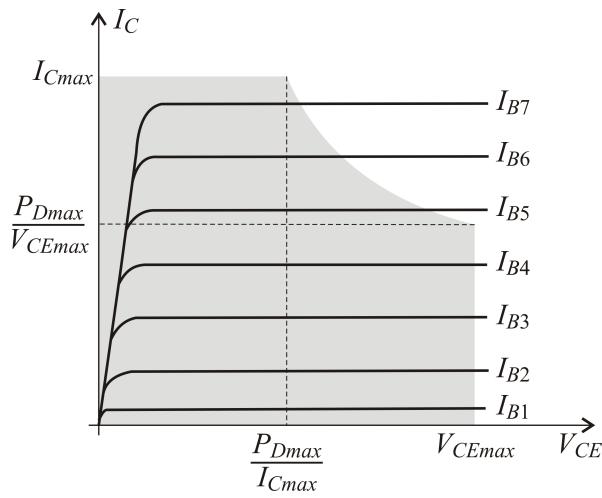
$$P_D = I_C V_{CE}. \quad (1.14)$$

Maksimalna dozvoljena disipacija snage P_{Dmax} (eng. *maximum power dissipation*) je podatak koji definišu proizvođači i nalazi se u tehničkim specifikacijama tranzistora. Definiše se u odnosu na temperaturu ambijenta, odnosno temperaturu okoline u kojoj tranzistor radi. Prilikom projektovanja kola sa bipolarnim tranzistorima potrebno je obezbijediti da je snaga disipacije tranzistora P_D pri bilo kojim uslovima rada manja od maksimalne dozvoljene snage disipacije P_{Dmax} , odnosno:

$$I_C V_{CE} < P_{Dmax}. \quad (1.15)$$

Na izlaznim karakteristikama tranzistora na sl. 1.12 prikazana je oblast sigurnog rada tranzistora (eng. *Safe Operating Area*). Sa I_{Cmax} i V_{CEmax} označene su maksimalne dozvoljene vrijednosti kolektorske struje i napona između kolektora i emitora, koje definiše proizvođač, a ostale tačke krive koja definiše oblast sigurnog rada određene su tako da bude zadovoljen izraz (1.15).

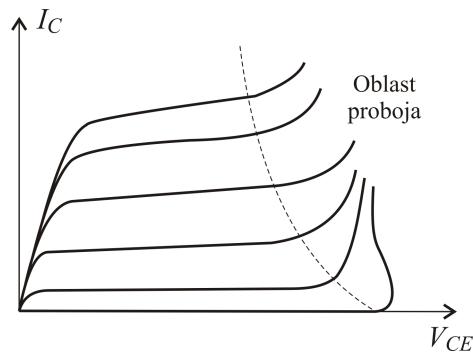
Probojni napon



Slika 1.12. Izlazne karakteristike tranzistora sa označenom oblašću sigurnog rada

U aktivnom režimu rada, proboj tranzistora nastaje uslijed proboja inverzno polarisanog BC spoja. Proboj BC spoja dešava se povećavanjem potencijala kolektora, odnosno napona V_{CE} , pri čemu struja kolektora naglo raste (sl. 1.13). Vrijednost probojnog napona dominantno je određena koncentracijom primjesa u slabije dopiranoj oblasti: za manje koncentracije, veći je probojni napon. Tipične vrijednosti probojnog napona BC spoja su nekoliko desetaka volti.

Pri projektovanju električnog sklopa sa bipolarnim tranzistorima mora se voditi računa da je napon napajanja V_{CC} manji od probojnog napona tranzistora. Preciznije, ne smije se dozvoliti da, u toku rada, bilo kako napon na kolektoru bude veći od vrijednosti probojnog napona.



Slika 1.13. Izlazne karakteristike u oblasti proboja

1.6. Analiza za male signale

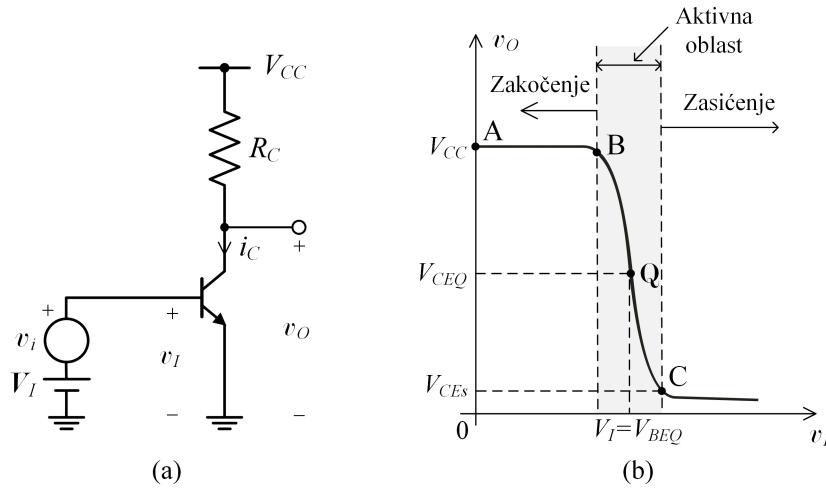
Kod analize malih signala (vidjeti analizu malih signala u slučaju diode), razmatraćemo osnovno kolo pojačavača sa zajedničkim emitorm, kao sa sl. 1.14.a, sa polarizacijom tranzistora u aktivnom režimu rada (definisane vrijednosti V_{BE} , V_{CC} i R_C).

Izvor malih signala koji se pojačava $v_i = v_{be}$ vezuje se redno naponu polarizacije $V_I = V_{BE}$, pa je ukupni ulazni napon $v_I = V_I + v_i$ u suštini jednak:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}. \quad (1.16)$$

Ukupna kolektorska struja, kao odziv na ukupni ulazni napon, jednaka je:

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_t} = I_S e^{(V_{BE}+v_{be})/V_t} = I_S e^{V_{BE}/V_t} e^{v_{be}/V_t} = I_C e^{v_{be}/V_t}.$$



Slika 1.14. Osnovno kolo pojačavača

Za male signale može se smatrati da je $v_{be} \ll V_t$, pa se e^{v_{be}/V_t} može razviti u Meklorenov red. Tada je:

$$i_C = I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_t} \right). \quad (1.17)$$

Ukupna kolektorska struja i_C ima dvije komponente, jednosmernu struju I_C (struju polarizacije) i struju malih signala i_c :

$$i_C = I_C + i_c, \quad (1.18)$$

gdje je struja i_c :

$$i_c = \frac{I_C}{V_t} v_{be}. \quad (1.19)$$

Vidimo da između kolektorske struje malih signala i ulaznog napona malih signala postoji linearna zavisnost. Koeficijent linearnosti zove se *transkonduktansa* g_m :

$$g_m = \frac{I_C}{V_t} \quad (1.20)$$

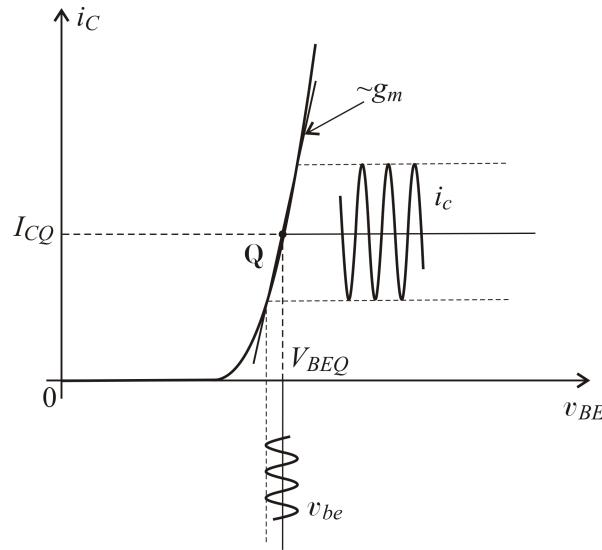
i određena je polarizacijom tranzistora (strujom I_C u radnoj tački Q). Sada se (1.19) može napisati i kao:

$$i_c = g_m v_{be}. \quad (1.21)$$

Grafička prezentacija transkonduktanse data je na sl. 1.15. Transkonduktansa je određena nagibom tangente na prenosnu karakteristiku tranzistora u mirnoj radnoj tački:

$$g_m = \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \Big|_{i_C=I_C}, \quad (1.22)$$

zbog čega se koristi i naziv *strmina*.



Slika 1.15. Grafičko određivanje transkonduktanse tranzistora

Poznavanjem ukupne kolektorske struje, moguće je odrediti *ukupnu baznu struju*:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C + i_c}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{i_c}{\beta} = I_B + \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_t} v_{be} = I_B + i_b, \quad (1.23)$$

gdje je sa i_b označena bazna struja malih signala:

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_t} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be}. \quad (1.24)$$

Ulazna otpornost tranzistora za male signale r_π , gledano u bazu (ili otpornost baze), na osnovu (1.24), jednaka je:

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}. \quad (1.25)$$

Ukupna emitorska struja se, takođe, može odrediti poznavanjem kolektorske struje:

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_C + i_c}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha} + \frac{i_c}{\alpha} = I_E + i_e, \quad (1.26)$$

gdje je emitorska struja malih signala i_e jednaka:

$$i_e = \frac{i_c}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \frac{I_C}{V_t} v_{be} = \frac{I_E}{V_t} v_{be}. \quad (1.27)$$

Iz ove jednačine može se odrediti otpornost malih signala r_e , gledano u emitor, ili otpornost emitora:

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{V_t}{I_E} = \frac{\alpha}{1} \frac{V_t}{I_C} = \frac{\alpha}{g_m} \simeq \frac{1}{g_m}. \quad (1.28)$$

Međusobni odnos otpornosti r_π i r_e određuje se iz (1.25) i (1.28):

$$r_\pi i_b = r_e i_e \Rightarrow r_\pi = \frac{i_e}{i_b} r_e = (1 + \beta) r_e. \quad (1.29)$$

Dakle, otpornost baze je $(1+\beta)$ puta veća od otpornosti emitora. To proizlazi iz činjenice da je emitorska struja $(1 + \beta)$ puta veća od bazne struje, pa je otpornost emitora $(1 + \beta)$ puta manja.

Ukupni izlazni napon takođe sadrži dvije komponente:

$$v_{CE} = V_{CC} - R_C i_C = V_{CC} - R_C (I_C + i_c) = V_{CE} + v_{ce}, \quad (1.30)$$

gdje je komponenta uslijed polarizacije:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C, \quad (1.31)$$

a komponenta uslijed prisustva malih ulaznih signala:

$$v_{ce} = -R_C i_c = -R_C g_m v_{be}. \quad (1.32)$$

Naponsko pojačanje malih signala predstavlja odnos izlaznog i ulaznog napona malih signala:

$$A_v = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = \frac{-R_C g_m v_{be}}{v_{be}} = -R_C g_m. \quad (1.33)$$

Pojačanje određeno sa (1.33) podrazumijeva konstantnu kolektorskiju struju u funkciji napona između kolektora i emitora. Međutim, zbog Erlijevog

efekta, kolektorska struja određena je sa (1.13), iz čega proizlazi da izlazna otpornost tranzistora nije beskonačna, već je određena sa (1.12). Struja i_c za male signale povećava se za vrijednost v_{ce}/r_o , pa je ukupna promjena struje kolektora:

$$i_c = g_m v_{be} + \frac{v_{ce}}{r_o}. \quad (1.34)$$

Sada je naponsko pojačanje pojačavača sa sl. 1.14.a:

$$A_v = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = -\frac{g_m}{1 + \frac{R_C}{r_o}} R_C = -g_{mp} R_C, \quad (1.35)$$

gdje je:

$$g_{mp} = \frac{g_m}{1 + \frac{R_C}{r_o}}, \quad (1.36)$$

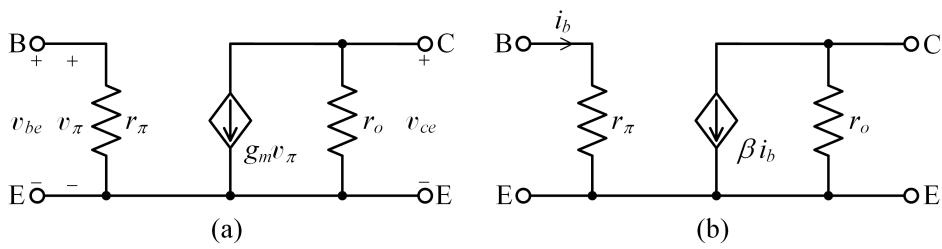
transkonduktansa pojačavača, a g_m je transkonduktansa tranzistora. Kako je u većini slučajeva $R_C \ll r_o$, to je $g_{mp} \simeq g_m$.

1.7. Modeli za male signale

Analogna kola često rade sa promjenljivim signalima čiji nivoi su mali u poređenju sa statickim vrijednostima napona i struja. Pod ovakvim okolnostima, za tranzistore su razvijeni tzv. modeli za male signale, koji daju vrijednosti dinamičkih parametara, kao što su pojačanje i otpornosti, bez uračunavanja vrijednosti polarizacija u kolu.

1.7.1. Hibridni π model

U prethodnom poglavlju pokazali smo da su funkcionalne zavisnosti parametara tranzistora za male signale linearne. Stoga su i modeli tranzistora koji proizlaze iz toga linearne modeli. Najčešće se ekvivalentni model neke nelinearne komponente ili složenijeg sklopa svodi na ulaznu otpornost, kao opterećenje prethodnog stepena, i izlazno dijel, kao odziv na pobudu. Za tranzistor u spoju sa zajedničkim emitorom, ulazna otpornost je određena sa (1.25). Kolektorska struja se, kao odziv, prema (1.34) sastoji od dvije komponente. Prva je struja kontrolisanog strujnog generatora, a druga je struja kroz izlaznu otpornost tranzistora. Na osnovu toga proizlazi linearni



Slika 1.16. Hibridni π model za male signale sa naponom kontrolisanim strujnim izvorom (a) i strujom kontrolisanim strujnim izvorom (b)

model tranzistora za male signale ili hibridni π model, kao na sl. 1.16.a. Ulagani signal je napon v_{be} , a izlazni napon v_{ce} . Ako je ulagani signal bazna struja i_b , onda je linearni model kao na sl. 1.16.b.

U slučaju da se može zanemariti Erlijev efekat, tada je $r_o \rightarrow \infty$, pa se otpornik r_o u modelima sa sl. 1.16 zamjenjuje otvorenom vezom.

Upotreba hibridnog π modela omogućava analizu kola na jednostavan i sistematičan način kroz sljedeće korake:

1. određivanje radne tačke tranzistora i kolektorske struje I_C ,
2. izračunavanje parametara modela za male signale (r_π , r_o i g_m),
3. zamjena izvora napajanja njihovim unutrašnjim otpornostima,
4. zamjena bipolarnog tranzistora hibridnim π modelom,
5. analiza dobijenog električnog kola u cilju dobijanja željenih veličina (npr. naponskog pojačanja).