



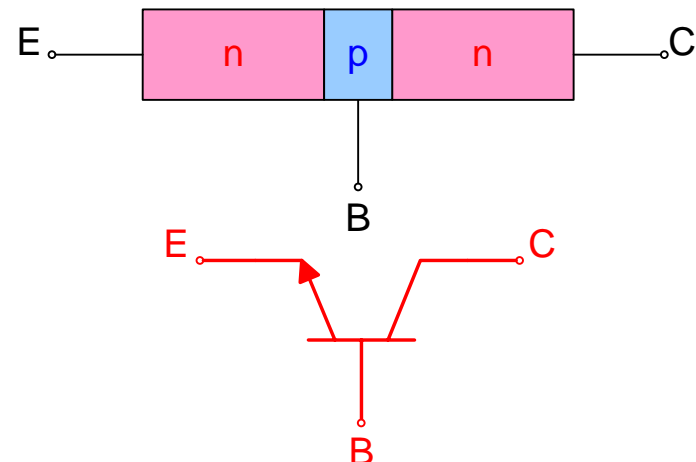
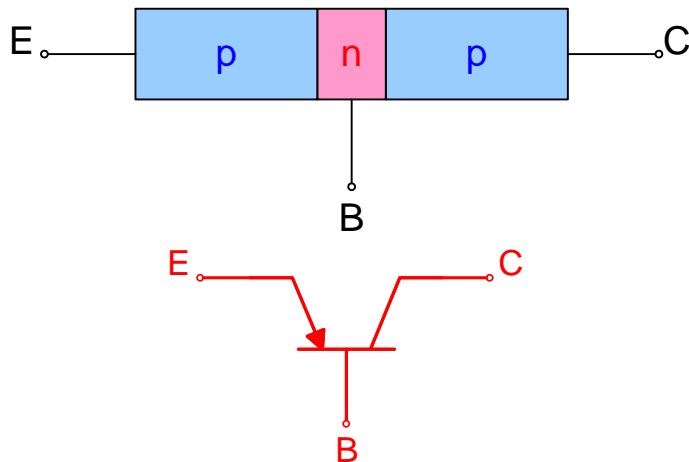
ELEKTRONIKA

Predavanje 5

BIPOLARNI TRANZISTOR

Definicija i ustrojstvo bipolarnog tranzistora

- Bipolarni tranzistor je **aktivni elektronički element** koji se sastoji od **tri poluvodička područja** (tj. ima tri elektrode): **emiter (E)**, **bazu (B)** i **kolektor (C)**.
- Područja emitera i kolektora su istog tipa poluvodiča, a između njih nalazi se područje baze koje je poluvodič suprotnog tipa. Stoga su moguće dvije izvedbe bipolarnog tranzistora:
 - **npn** tranzistor, emiter i kolektor su n-tip, a baza p-tip
 - **pnp** tranzistor, emiter i kolektor su p-tip, a baza je n-tip



Definicija i ustrojstvo bipolarnog tranzistora (2)

- Bipolarni tranzistor se sastoji od dva pn-spoja:
 - **Spoj emiter-baza (E-B)**
 - **Spoj kolektor-baza (C-B)**
- Naziv *tranzistor* nastao je kao složenica engleskog izraza ***transfer resistor***, na temelju činjenice da se otporom između dva priključka upravlja pomoću trećeg priključka. Drugim riječima, aktivno djelovanje tranzistora sastoji se u tome da se pomoću struje na jednom (ulaznom) priključku upravlja strujom na drugom (izlaznom) priključku.
- Naziv (pridjev) *bipolarni* označava da u vođenju struje sudjeluju oba tipa nosilaca: elektroni i šupljine.
- Često se koristi naziv bipolarni spojni tranzistor (engl. Bipolar Junction Transistor, **BJT**).
- Bipolarni tranzistor može biti izveden kao zasebna komponenta u vlastitom kućištu (diskretni tranzistor) ili kao komponenta u monolitnom integriranom sklopu (integrirani tranzistor).

Područja rada bipolarnog tranzistora

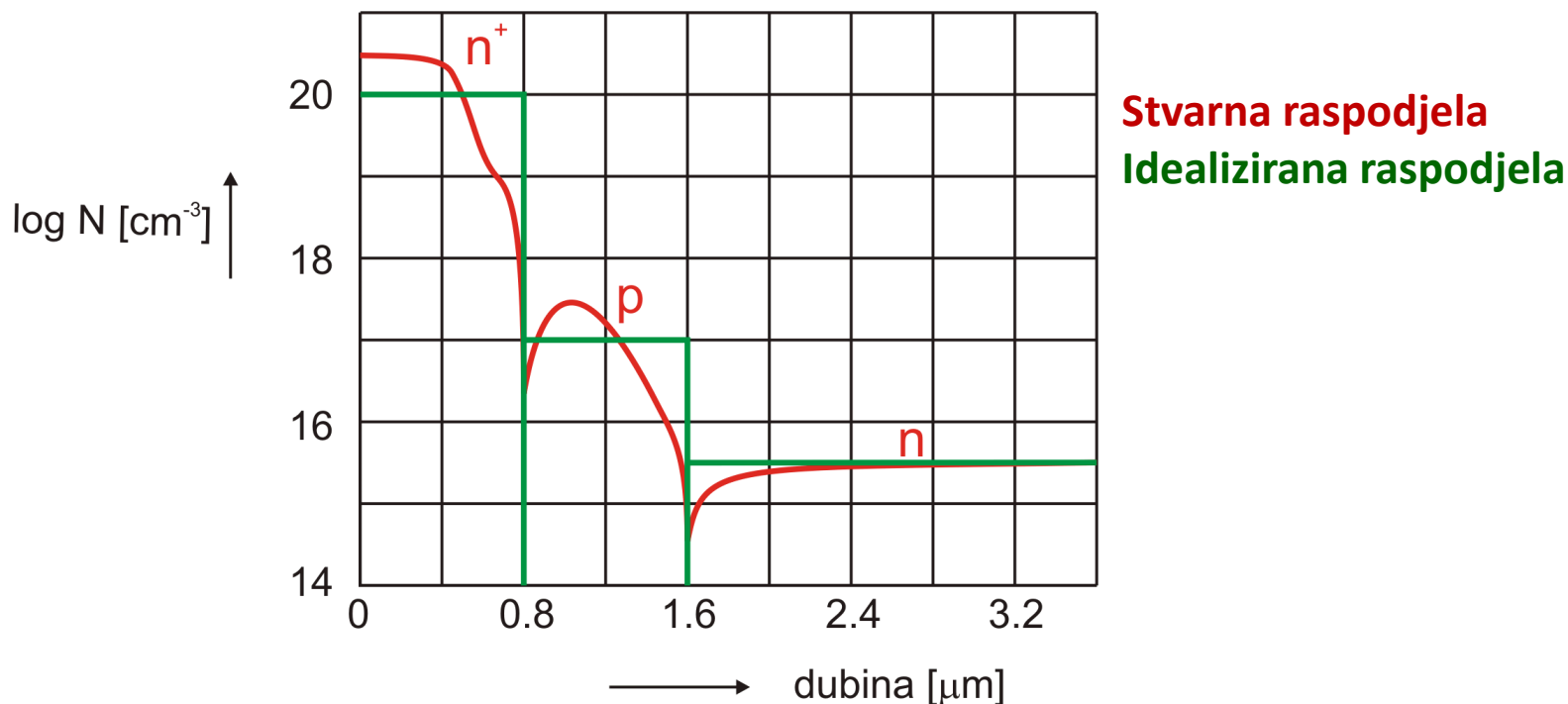
- Svaki pn-spoj može se propusno i nepropusno polarizirati što primijenjeno na bipolarni tranzistor rezultira s **četiri područja rada bipolarnog tranzistora**:
 - 1) **Normalno aktivno područje** se koristi kad tranzistor radi kao pojačalo. Spoj E-B je propusno polariziran, spoj C-B je nepropusno polariziran
 - 2) **Inveržno aktivno područje** se rijetko koristi; tranzistor radi kao pojačalo, ali lošije od normalnog aktivnog područja (jer je kolektor slabije dopiran od emitera). Spoj E-B je nepropusno polariziran, spoj C-B je propusno polariziran
 - 3) **Područje zasićenja** odgovara radu tranzistora kao uključene sklopke (teče struja kroz tranzistor) i to je uglavnom režim za generiranje niske razine izlaznog napona (logička 0). Oba spoja E-B i C-B su propusno polarizirani.
 - 4) **Područje zapiranja** odgovara radu tranzistora kao isključene sklopke (ne teče struja kroz tranzistor) i koristi se za generiranje visoke razine izlaznog napona (logička 1). Oba spoja E-B i C-B su nepropusno polarizirani.

Tranzistorski efekt

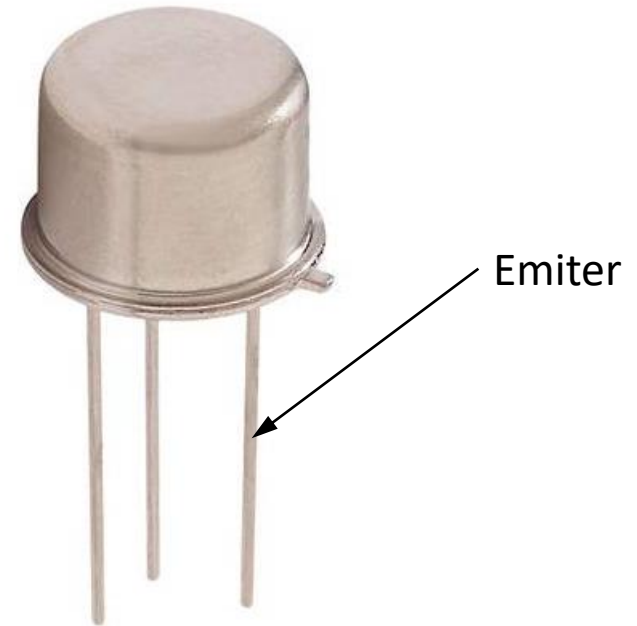
- Tranzistorski efekt je bipolarno međudjelovanje dvaju pn-spojeva preko uskog područja baze pri čemu se promjenom napona na propusno polariziranom spoju E-B (odnosno promjenom struje kroz taj spoj) mijenja i struja kroz nepropusno polarizirani spoj C-B.
- Tranzistorski efekt temelji se na mehanizmima:
 - **Injekcije (utiskivanja)** nosilaca iz emitera
Propusnom polarizacijom spoja E-B omogućeno je utiskivanje manjinskih nosilaca iz emitera u bazu i obratno. Emiter ima puno veću gustoću primjesa pa je ukupna struja praktički jednaka struji manjinskih nosilaca iz emitera.
 - **Tranzita (prijenosa)** injektiranih nosilaca kroz bazu
Baza mora biti uska strana pa se manji dio injektiranih nosilaca iz emitera rekombinira u bazi, a veći dio dopiže do kolektorskog spojišta.
 - **Kolekcije (sakupljanja)** nosilaca na kolektoru
Napon nepropusne polarizacije na spoju C-B privlači manjinske nosioce iz baze na kolektor (ujedno teče i struja nepropusno polariziranog spoja C-B).

Profil primjese u bipolarnom tranzistoru

- Emiter je područje tranzistora s najvećom gustoćom primjese pa će dominantna struja u bipolarnom tranzistoru biti struja nosilaca koje emiter utiskuje u bazu.
- Tipična raspodjela primjese u silicijskom npn-tranzistoru:

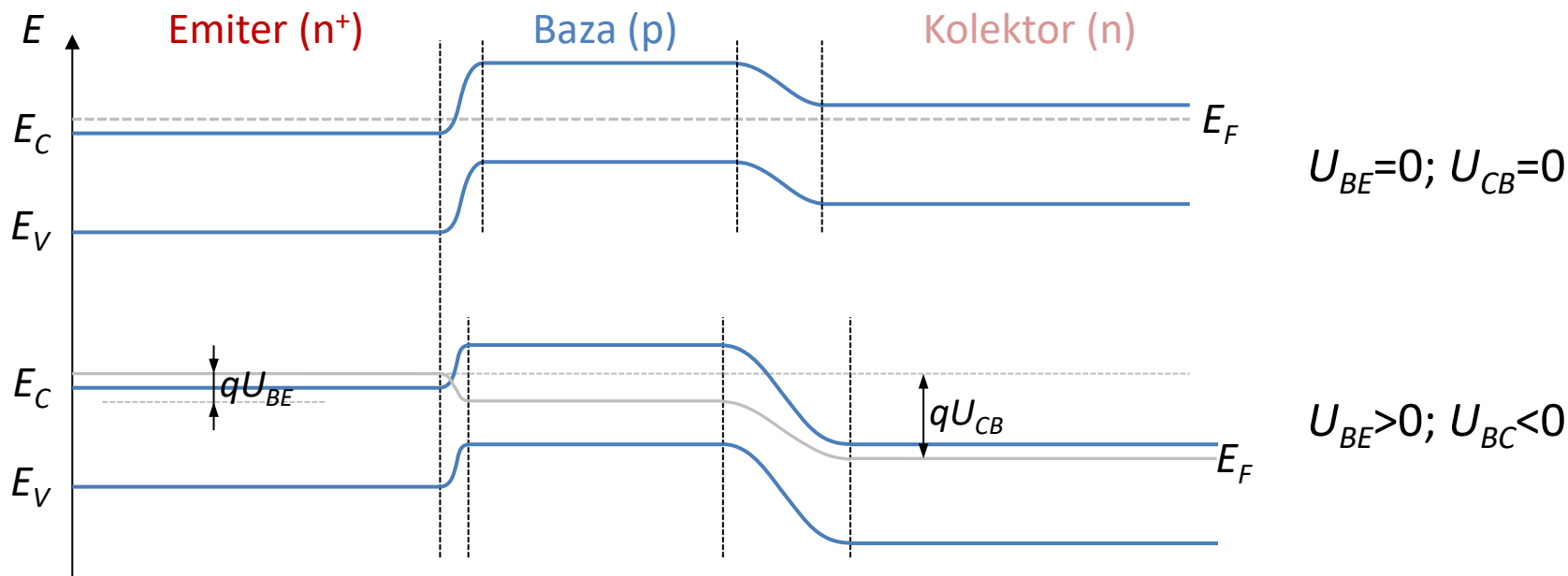


- Katedra za nanoelektroniku i
fotonaponsku pretvorbu



Energijski dijagram bipolarnog tranzistora

- U ravnotežnom stanju (nema priključenog vanjskog napona) na spojevima E-B i C-B postoje samo energijske barijere zbog kontaktnog potencijala.
- U ravnotežnom stanju Fermijeva razina je izjednačena kroz sva tri područja tranzistora. Ukupne struja elektrona i šupljina jednake su ničiti.
- U normalnom aktivnom području visina potencijalne barijere na spoju E-B je umanjena zbog priključenog napona propusne polarizacije, a na spoju C-B visina barijere je uvećana zbog napona nepropusne polarizacije U_{CB} .



Rad tranzistora u normalnom aktivnom području

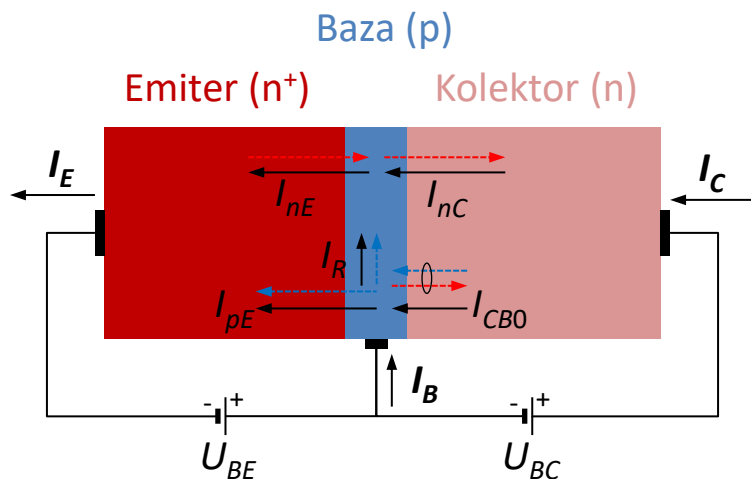
- Normalno aktivno područje je najvažnije jer se u tom području tranzistor može koristiti kao aktivni elektronički element (u sklopovima pojačala).
- Propusnom polarizacijom spoja E-B omogućuje se *difuzija* nosilaca iz emitera u bazu, kao i iz baze u emiter. Drugim riječima, teče struja kroz propusno polariziranu diodu E-B. Kako je područje emitera puno više onečišćeno od baze, dominantna je struja nosilaca koje emiter injektira u bazu (kod npn tranzistora to je struja I_{nE} , kod pnp tranzistora to je struja I_{pE}). Gustoća nosilaca koje emiter injektira u bazu najveća je upravo na ulazu u područje baze na emitterskom spoju.
- Nepropusna polarizacija spoja C-B znači da će gustoća manjinskih nosilaca u bazi na kolektorskom spojištu biti manja od ravnotežne gustoće. To znači da će u bazi postojati *gradijent gustoće manjinskih nosilaca* zbog čega se nosioci injektirani iz emitera gibaju prema kolektorskom spojištu. Određeni dio tih nosilaca poništi se (rekombinira) s većinskim nosiocima u bazi, ali većina ih stigne do kolektorskog spojišta.
- Injektirani nosioci koji dođu do kolektorskog spojišta bivaju privučeni na kolektor zbog jakog električnog polja na nepropusno polariziranom spoju C-B – *driftna struja manjinskih nosilaca*. Kad u bazi ne bi bilo injektiranih nosilaca iz emitera, tada bi kroz nepropusno polarizirani pn-spoj C-B tekla samo struja manjinskih nosilaca malog iznosa, I_{CB0} . Međutim, s obzirom da je zbog propusno polariziranog spoja E-B u bazu iz emitera injektiran veliki broj nosilaca, ukupna struja kolektora bit će približno jednaka struji većinskih nosilaca iz emitera. Razlika između struje većinskih nosilaca emitera i kolektora posljedica je poništavanja injektiranih nosilaca u bazi i naziva se *rekombinacijska struja*, I_R .



Struje tranzistora u normalnom aktivnom području

- Tranzistor ima tri priključka pa se, gledano s vanjskih priključaka, mogu definirati i tri struje: struja emitera I_E , struja baze I_B i struja kolektora I_C . Ako se tranzistor promatra kao cjelina, za njega mora vrijediti 1. Kirchhoffov zakon te se, uzimajući stvarne smjerove struja, može zapisati **osnovna strujna jednadžba bipolarnog tranzistora**:

$$I_E = I_B + I_C$$



$$I_E = I_{pE} + I_{nE}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{CB0}$$

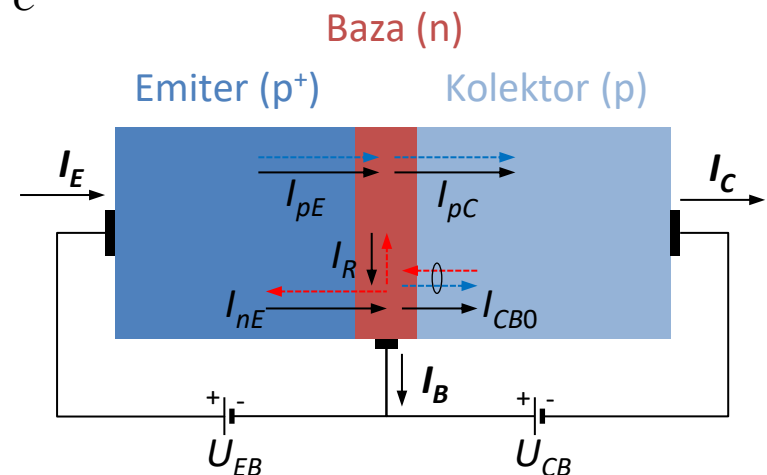
$$I_B = I_{pE} + I_R - I_{CB0}$$

$$I_R = I_{nE} - I_{nC}$$

-----> smjer gibanja elektrona

-----> smjer gibanja šupljina

-----> stvarni smjer struje



$$I_C = I_{pC} + I_{CB0}$$

$$I_B = I_{nE} + I_R - I_{CB0}$$

$$I_R = I_{pE} - I_{pC}$$

Sastavnice osnovnih struja bipolarnog tranzistora u normalnom aktivnom području

- **Struja emitera I_E** sastoji se od difuzijske struje nosilaca koje emiter injektira u bazu (dominantna komponenta) i difuzijske struje nosilaca koje baza injektira u emiter (struja manjeg iznosa). Dominantna komponenta struje emitera je struja I_{nE} kod npn-tranzistora, odnosno I_{pE} kod pnp-tranzistora.

$$I_E = I_{pE} + I_{nE}$$

- **Struja kolektora I_C** sastoji se od driftne struje nosilaca koji su nakon injekcije iz emitera prošli kroz bazu i došli do kolektora (dominantna komponenta) i uobičajene struje nepropusno polariziranog spoja C-B (struja manjeg iznosa) I_{CB0} . Struja I_{CB0} tekla bi kroz nepropusno polariziranu diodu C-B kad u bazi ne bi bilo nosilaca koji su injektirani iz emitera.

$$I_C = I_{nC} + I_{CB0} \quad (\text{nnp})$$

$$I_C = I_{pC} + I_{CB0} \quad (\text{pnp})$$

- Razlika većinske struje emitera i većinske struje kolektora čini rekombinacijsku struju I_R .

$$I_R = I_{nE} - I_{nC} \quad (\text{nnp})$$

$$I_R = I_{pE} - I_{pC} \quad (\text{pnp})$$

- **Struja baze I_B** sastoji se od struje nosilaca koje baza utiskuje u emiter, rekombinacijske struje i struje manjinskih nosilaca nepropusno polariziranog spoja C-B.

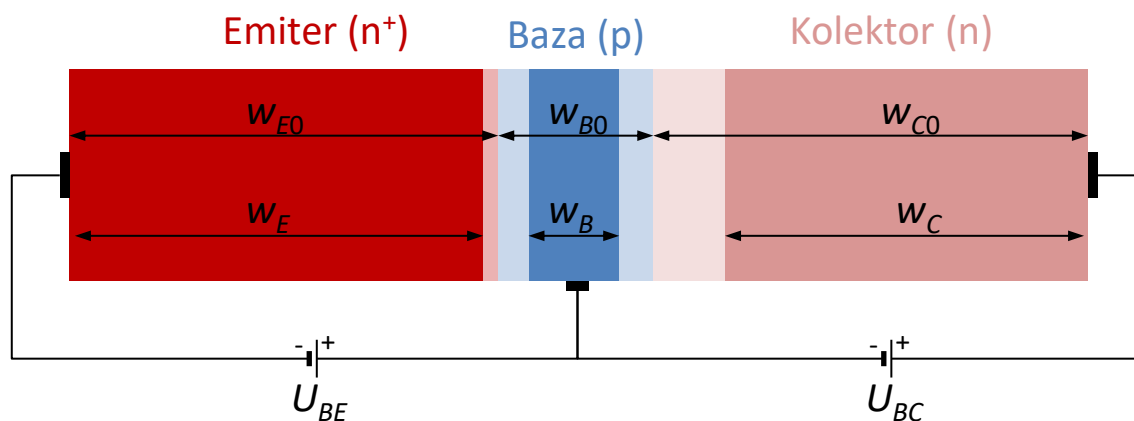
$$I_B = I_{pE} + I_R - I_{CB0} \quad (\text{nnp})$$

$$I_B = I_{nE} + I_R - I_{CB0} \quad (\text{pnp})$$



Tehnološke i efektivne širine područja

- Temeljni preduvjet koji mora zadovoljavati baza bipolarnog tranzistora jest da ona bude **uska strana**, što znači da **efektivna širina baze w_B mora biti puno manja od difuzijske duljine manjinskih nosilaca u bazi**. U tom slučaju rekombinacija nosilaca koji su u bazu injektirani iz emitera će biti minimalna te će većina tih nosilaca stići do kolektora, što je preduvjet rada tranzistora u normalnom aktivnom području.
- Efektivnom širinom pojedinog područja smatra se ona širina koja se dobije kad se od tehnološke širine oduzmu širine osiromašenih područja na spojevima E-B i C-B.



w_{E0} , w_{B0} , w_{C0} SU tehnološke širine emitera, baze i kolektora

w_E , w_B , w_C SU efektivne širine emitera, baze i kolektora

- Širina osiromašenog područja propusno polariziranog spoja E-B je manja od širine osiromašenog područja nepropusno polariziranog spoja C-B.
- Baza je uska strana pa je svako smanjenje efektivne širine baze značajno! Najveći utjecaj na smanjenje efektivne širine baze ima napon nepropusne polarizacije C-B!

Parametri bipolarnog tranzistora

- **Djelotvornost emitera, γ** , jest omjer struje nosilaca koje emiter injektira u bazu i ukupne struje emitera:

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_E} \quad (\text{nnp})$$

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_E} \quad (\text{pnp})$$

- **Prijenosni (transportni) faktor baze, β^*** , jest omjer struje nosilaca koji su od emitera stigli do kolektora i struje nosilaca koje je emiter injektirao u bazu:

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} \quad (\text{nnp})$$

$$\beta^* = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} \quad (\text{pnp})$$

- **Faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze, α** , jest omjer većinske struje kolektora i ukupne struje emitera:

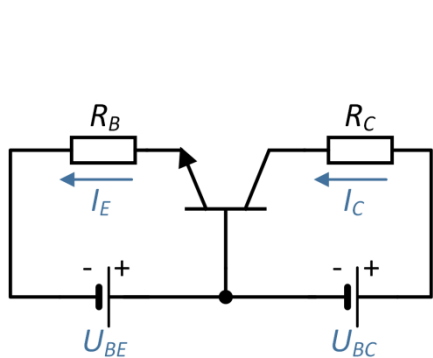
$$\alpha = \frac{I_{nC}}{I_E} \quad (\text{nnp})$$

$$\alpha = \frac{I_{pC}}{I_E} \quad (\text{pnp})$$

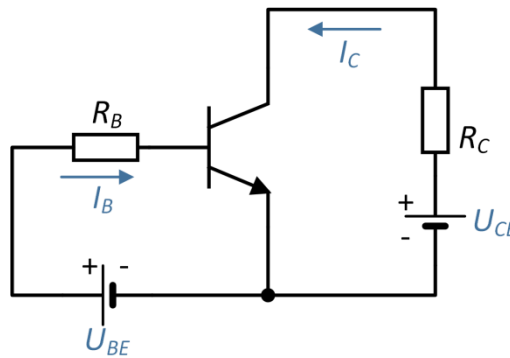
- Vrijedi:
- $$\alpha = \frac{I_{nC}}{I_E} = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} \cdot \frac{I_{nE}}{I_E} = \beta^* \cdot \gamma$$

Spoj zajedničke baze, zajedničkog emitera i zajedničkog kolektora

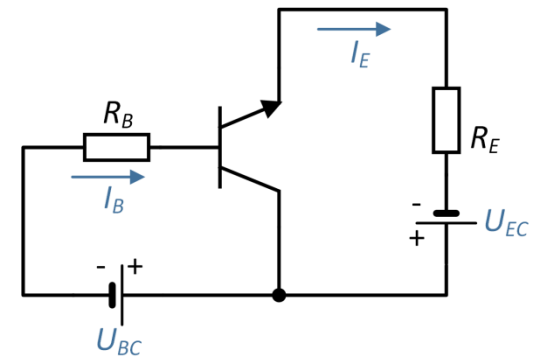
- Da bi se tranzistor mogao koristiti kao aktivna komponenta u sklopovima pojačala, potrebno je imati jedan par ulaznih stezaljki na koje se dovodi ulazni signal (struja, napon) i jedan par izlaznih stezaljki na kojima se preuzima izlazni, pojačani signal.
- Tranzistor ima 3 priključka pa se **jedan priključak tranzistora mora koristiti i u ulaznom i u izlaznom krugu**. To je tzv. **zajednički priključak** pa su moguća 3 načina spajanja bipolarnog tranzistora:
 - **Spoj zajedničke baze** (ulazni priključak je emiter, izlazni priključak je kolektor; ulazni krug je E-B, izlazni krug je C-B)
 - **Spoj zajedničkog emitera** (ulazni priključak je baza, izlazni priključak je kolektor; ulazni krug je B-E, izlazni krug je C-E).
 - **Spoj zajedničkog kolektora** (ulazni priključak je baza, izlazni priključak je emiter; ulazni krug je B-C, izlazni krug je E-C).



npn tranzistor u spoju ZB



npn tranzistor u spoju ZE



npn tranzistor u spoju ZC

Parametri bipolarnog tranzistora (2)

- Polazeći od sastavnica struje kolektora: $I_C = I_{nC} + I_{CB0}$ (nnp) $I_C = I_{pC} + I_{CB0}$ (pnp)
- Iz definicije faktora strujnog pojačanja α slijedi: $I_{nC} = \alpha \cdot I_E$ $I_{pC} = \alpha \cdot I_E$
- Iz osnovne strujne jednadžbe tranzistora: $I_E = I_B + I_C$
- Kombinirajući gornje izraze: $I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CB0}$

$$I_C = \alpha \cdot (I_B + I_C) + I_{CB0}$$

$$I_C \cdot (1 - \alpha) = \alpha \cdot I_B + I_{CB0}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_B + \frac{1}{1 - \alpha} \cdot I_{CB0}$$

- Dobiveni izraz povezuje izlaznu (I_C) i ulaznu (I_B) struju kad je tranzistor spojen u spoju zajedničkog emitera.
- Faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera, β , jest:** $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$
- Ovisnost struje I_C o I_B tada se piše:

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{CB0}$$

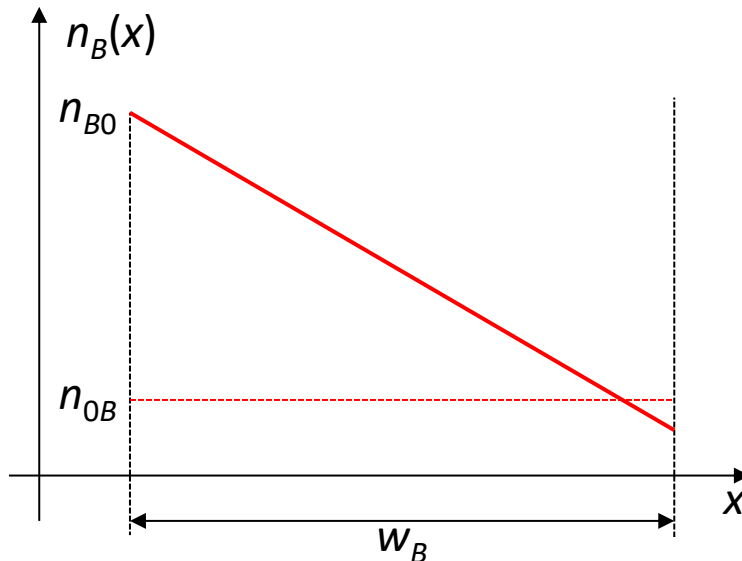
Parametri bipolarnog tranzistora (3)

- Iz definicija parametara bipolarnog tranzistora, može se zaključiti:
 - Djelotvornost emitera γ je uvijek manja od 1. Da bi djelotvornost emitera bila što bliža 1, **gustoća primjesa u emiteru mora biti što veća u odnosu na gustoću primjesa u bazi.**
 - Prijenosni faktor baze β^* je uvijek manji od 1 jer se dio nosilaca koje emiter injektira u bazu rekombinira u bazi. Da bi prijenosni faktor baze bio što bliži 1, baza mora biti što uža.
 - Faktor strujnog pojačanja α je uvijek manji od 1, a ponajviše ovisi o iznosu djelotvornosti emitera γ .
 - Faktor strujnog pojačanja β je redovito veći od 1 i bit će to veći što je α bliži 1. Npr. ako je $\alpha=0,99$, $\beta=99$; ako je $\alpha=0,995$, $\beta=199$.
- Djelotvornost emitera je najvažniji parametar tranzistora koji utječe na iznos faktora strujnog pojačanja, tj. gustoća primjesa u emiteru u odnosu na gustoću primjesa u bazi.

Određivanje većinske struje emitera

- Kako je baza bipolarnog tranzistora uska strana, raspodjela manjinskih nosilaca u bazi je približno linearna te je iz raspodjele manjinskih nosilaca u bazi moguće izračunati većinsku struju emitera.

- Npr. kod npn-tranzistora:



U normalnom aktivnom području gustoća manjinskih elektrona u bazi najveća je na spoju s emiterom (veća od ravnotežne gustoće zbog propusno polariziranog spoja E-B), a najmanja na spoju s kolektorom (manja od ravnotežne zbog nepropusno polariziranog spoja C-B). U bazi stoga postoji **gradijent gustoće manjinskih nosilaca**, što znači da se oni difuzijom gibaju prema kolektorskom spojištu. Ti manjinski nosioci u bazu stižu injekcijom iz emitera pa se ta struja može odrediti iz gradijenta gustoće u bazi:

$$I_{nE} = q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \frac{dn_B}{dx}$$

- Kako je raspodjela približno linearna, gradijent gustoće je:

$$\frac{dn_B}{dx} = \frac{n_{B_{wB}} - n_{B0}}{w_B}$$

Određivanje većinske struje emitera (2)

- Gustoće manjinskih nosilaca na rubovima baze povezane s ravnotežnom gustoćom preko eksponencijalnog zakona:

Na emitterskom spoju:

$$n_{B0} = n_{0B} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

Na kolektorskom spoju:

$$n_{Bw_B} = n_{0B} \cdot \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right)$$

- Da bi npn-tranzistor bio u normalnom aktivnom području, $U_{BE} > 0$ i $U_{BC} < 0$ pa za praktične vrijednosti priključenih napona vrijedi:

$$n_{B0} \gg n_{0B} \gg n_{Bw_B}$$

- Tada je gradijent gustoće (samo iznos):

$$\frac{dn_B}{dx} \approx \frac{n_{B0}}{w_B} = \frac{n_{0B} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)}{w_B} = \frac{n_i^2}{N_{AB}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)}{w_B}$$

- Konačno, većinska struja emitera može se zapisati kao:

$$I_{nE} = q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \frac{n_i^2}{N_{AB}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)}{w_B}$$

Djelotvornost emitera

- Djelotvornost emitera definirana je kao omjer većinske struje emitera i ukupne struje emitera. Za npn-tranzistor:

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_E} = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{pE}}{I_{nE}}}$$

- Struja kroz pn-spoj (diodu) emiter-baza dana je Shockleyjevom jednačbom:

$$I_E = I_{SE} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right],$$

gdje je I_{SE} struja manjinskih nosilaca spoja E-B, određena izrazom:

$$I_{SE} = q \cdot S \cdot n_i^2 \cdot \left[\frac{D_{nB}}{N_{AB} \cdot L_{nB} \cdot \text{th}(w_B/L_{nB})} + \frac{D_{pE}}{N_{DE} \cdot L_{pE} \cdot \text{th}(w_E/L_{pE})} \right].$$

- Stoga su komponente struje emitera:

$$I_{pE} = q \cdot S \cdot n_i^2 \cdot \frac{D_{pE}}{N_{DE} \cdot L_{pE} \cdot \text{th}(w_E/L_{pE})} \left[\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) + 1 \right],$$

$$I_{nE} = q \cdot S \cdot n_i^2 \cdot \frac{D_{nB}}{N_{AB} \cdot L_{nB} \cdot \text{th}(w_B/L_{nB})} \left[\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) + 1 \right].$$

Djelotvornost emitera (2)

- Stoga je djelotvornost emitera npn-tranzistora:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{I_{pE}}{I_{nE}}} = \frac{1}{1 + \frac{\frac{D_{pE}}{N_{DE} \cdot L_{pE} \cdot th(w_E/L_{pE})}}{\frac{D_{nB}}{N_{AB} \cdot L_{nB} \cdot th(w_B/L_{nB})}}} = \left[1 + \frac{D_{pE} \cdot N_{AB} \cdot L_{nB} \cdot th(w_B/L_{nB})}{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE} \cdot th(w_E/L_{pE})} \right]^{-1}$$

- Ako je emiter široka, a baza uska strana, tada vrijedi:

$$th(w_E/L_{pE}) \approx 1, \quad th(w_B/L_{nB}) \approx \frac{w_B}{L_{nB}},$$

te se izraz za djelotvornost npn-tranzistora može zapisati u jednostavnijem obliku:

$$\gamma = \left[1 + \frac{D_{pE} \cdot N_{AB} \cdot w_B}{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}} \right]^{-1}$$

Prijenosni faktor baze

- Prijenosni faktor baze određen je omjerom većinske struje kolektora i većinske struje emitera. Tako je za npn-tranzistor:

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}}$$

- Većinska struja emitera može se izračunati kao difuzijska struja manjinskih elektrona u bazi uz rub barijere E-B:

$$I_{nE} = q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \left. \frac{dn_B(x)}{dx} \right|_{x=0}$$

- Na isti se način i većinska struja kolektora može odrediti kao difuzijska struja elektrona u bazi, ali uz rub barijere C-B:

$$I_{nC} = q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \left. \frac{dn_B(x)}{dx} \right|_{x=w_B}$$

- Uvrštavajući rješenje jednadžbe kontinuiteta za područje baze koje daje funkciju raspodjele gustoće elektrona u homogenoj bazi $n_B(x)$, dobija se za β^* :

$$\beta^* = \frac{1}{\cosh\left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)}$$

Prijenosni faktor baze (2)

- S obzirom da je baza uska strana, $w_B \ll L_{nB}$, kosinus hiperbolni se može aproksimirati s prva dva člana razvoja u red potencija:

$$\cosh(x) \approx 1 + \frac{x^2}{2},$$

tako da se za transportni faktor baze može pisati:

$$\beta^* \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w_B}{L_{nB}} \right)^2}.$$

- Drugi pribrojnik u nazivniku je manji od 1 pa se prethodni izraz može dalje razviti u red potencija te je:

$$\beta^* \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w_B}{L_{nB}} \right)^2.$$

- Što je baza uža u odnosu prema difuzijskoj duljini manjinskih nosilaca u bazi, to je prijenos nosilaca iz emitera kroz bazu do kolektora učinkovitiji.
- Dakle, za postizanje tranzistorskog efekta treba biti ispunjen uvjet **uske baze**:

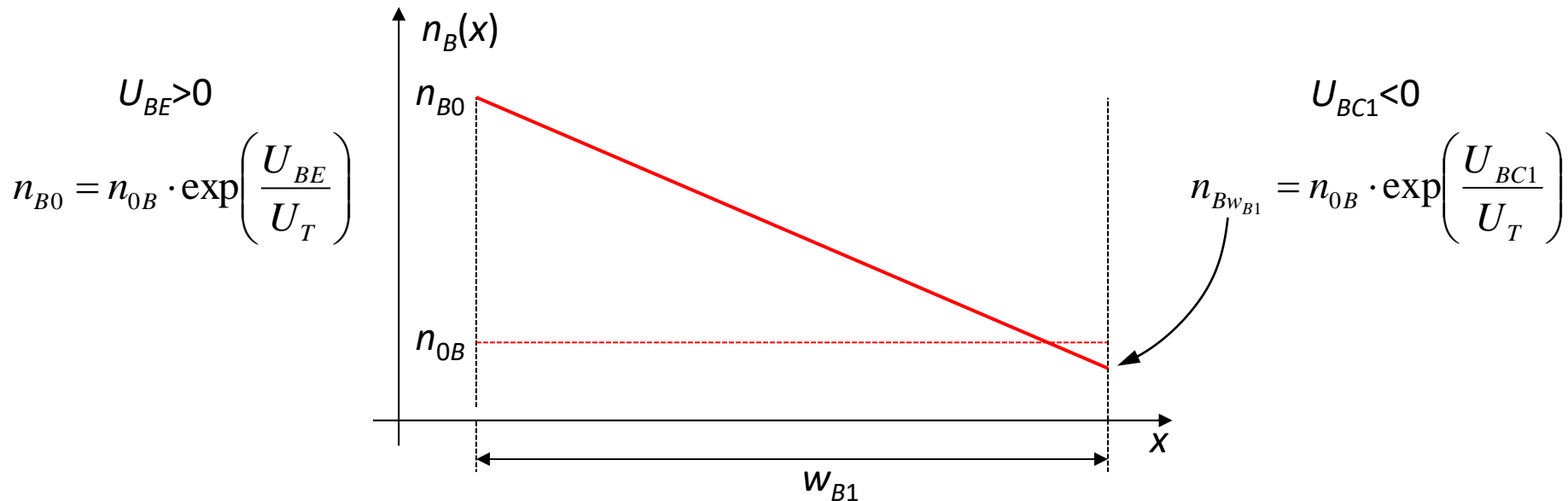
$$w_B \ll L_{nB} \quad (\text{nnp})$$

$$w_B \ll L_{pB} \quad (\text{pnp})$$



Earlyjev efekt

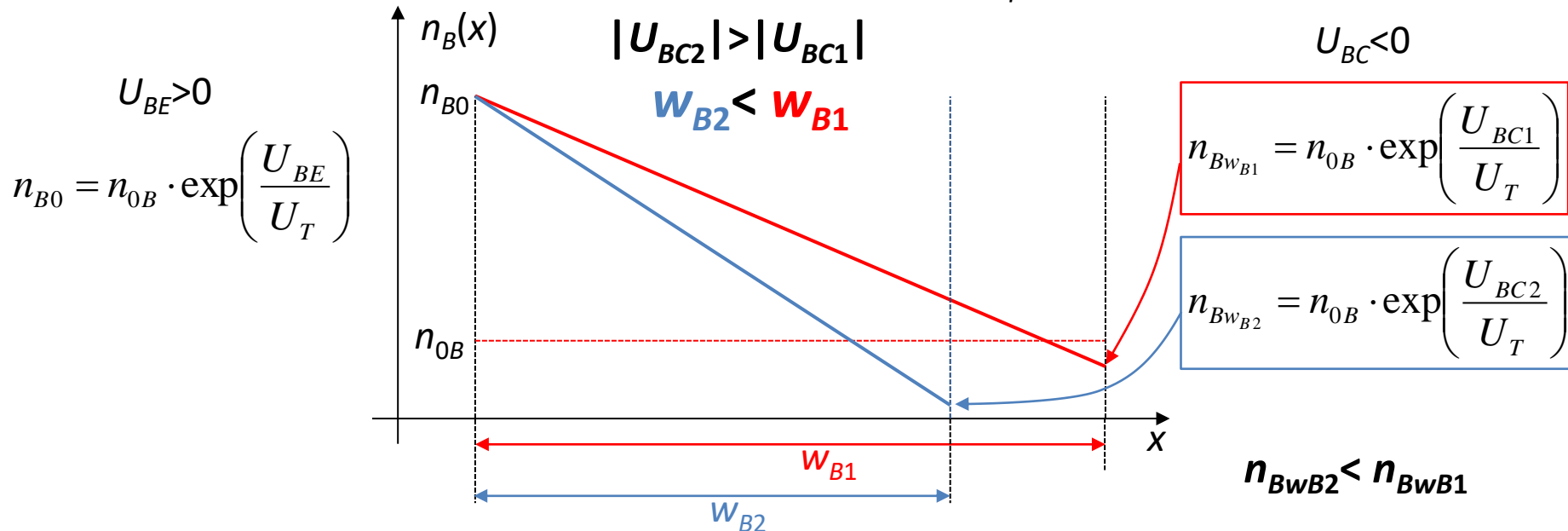
- Razmatra se rad tranzistora u normalnom aktivnom području. Kako je baza uska strana, raspodjela manjinskih nosilaca u bazi je približno linearna.



- Ako se napon U_{BE} održava na istoj vrijednosti, tada se n_{B0} ne mijenja.
- Ako se **poveća napon nepropusne polarizacije U_{BC}** ($|U_{BC2}| > |U_{BC1}|$):
 - Povećava se barijera na spoju C-B i **smanjuje se efektivna širina baze w_B**
 - Smanjuje se gustoća manjinskih nosilaca u bazi na kolektorskom spoju.

Earlyjev efekt (2)

- Povećanjem iznosa napona nepropusne polarizacije na spoju C-B, **povećava se gradijent gustoće manjinskih nosilaca u bazi**, a to je struja nosilaca koji su injektirani iz emitera (I_{nE} kod npn-tranzistora, I_{pE} kod pnp-tranzistora).

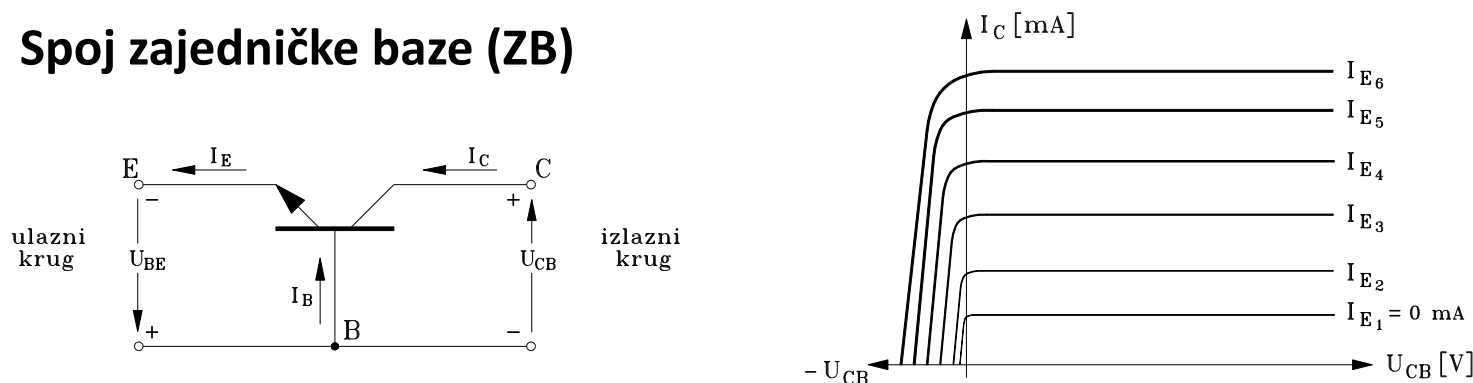


- Earlyjev efekt je promjena efektivne širine baze (modulacija baze) promjenom napona nepropusne polarizacije kolektor-baza.**
- Osim promjene difuzijske struje (većinska struja emitera), smanjuje se rekombinacijska struja (jer je baza uža) pa se povećava faktor strujnog pojačanja!

Izlazne karakteristike tranzistora (1)

- Izlazne karakteristike tranzistora daju ovisnost izlazne struje o izlaznom naponu. S obzirom da je bipolarni tranzistor strujno upravljana komponenta, izlazna će struja ovisiti i o ulaznoj struji koja je dodatni parametar.
- Ovisno o spoju u kojem tranzistor radi, razlikovat će se ulazna i izlazna struja te izlazni napon.

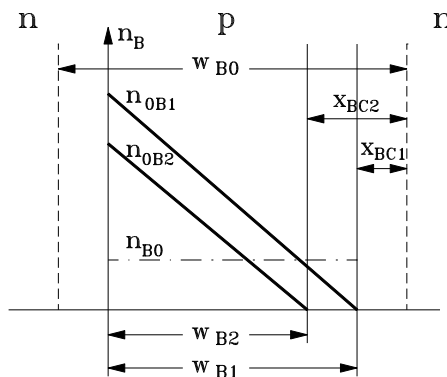
- Spoj zajedničke baze (ZB)**



- U normalnom aktivnom području ($U_{BE} > 0$, $U_{CB} > 0$), struja kolektora je gotovo konstantna, a njen blagi porast s povećanjem napona nepropusne polarizacije U_{CB} posljedica je Earlyjevog efekta. U području zasićenja ($U_{BE} > 0$, $U_{CB} < 0$) struja kolektora naglo opada s povećanjem napona propusne polarizacije spoja C-B jer se smanjuje gradijent gustoće manjinskih nosilaca u bazi (i emiter i kolektor injektiraju nosioce u bazu).

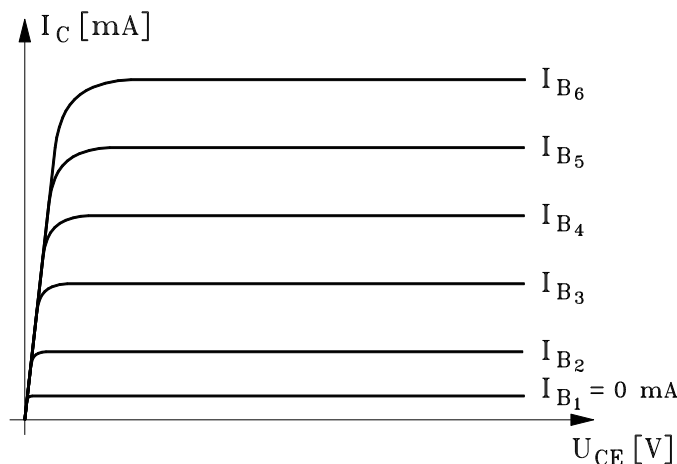
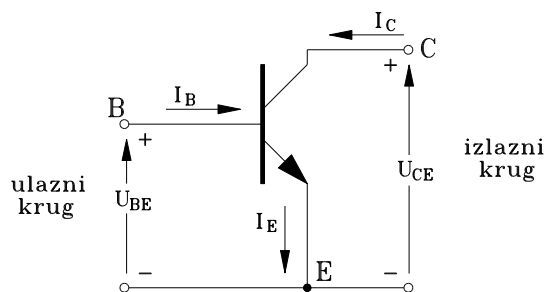
Izlazne karakteristike tranzistora (2)

- Da bi se u spoju ZB na ulazu održavao stalni iznos struje I_E s povećanjem napona nepropusne polarizacije U_{CB} , potrebno je održavati stalni gradijent gustoće manjinskih nosilaca u bazi, odnosno smanjivati napon propusne polarizacije U_{BE} .



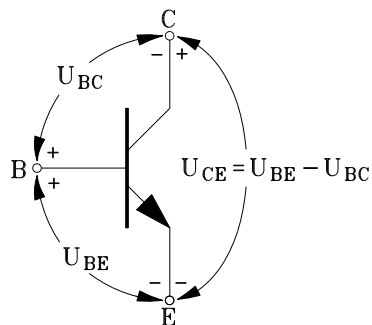
Povećanjem napona nepropusne polarizacije U_{CB} smanjuje se efektivna širina baze pa se povećava gradijent gustoće manjinskih nosilaca u bazi, odnosno povećava se struja emitera. Stoga je potrebno smanjivati napon propusne polarizacije U_{BE} tako da gradijent gustoće manjinskih nosilaca u bazi bude stalno isti (raspodjela je opisana paralelnim pravcima).

- Spoj zajedničkog emitera (ZE)**



Izlazne karakteristike tranzistora (3)

- Da bi npn-tranzistor radio u normalnom aktivnom području, treba biti ispunjen uvjet $U_{BE} > 0$ i $U_{BC} < 0$. Stoga se u ulaznom krugu (B-E) odabire odgovarajući polaritet napona tako da taj spoj bude propusno polariziran. Međutim, izlazni napon je U_{CE} :



Kirchhoffov zakon za napone kod npn-tranzistora:

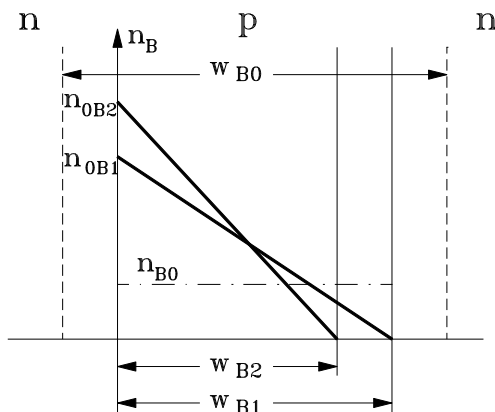
$$U_{BE} - U_{BC} - U_{CE} = 0$$

$$U_{BC} = U_{BE} - U_{CE}$$

Kako za normalno aktivno područje treba biti $U_{BC} < 0$:

$$U_{BC} = U_{BE} - U_{CE} < 0 \Rightarrow U_{CE} > U_{BE}$$

- Povećanjem izlaznog napona U_{CE} povećava se i napon nepropusne polarizacije U_{BC} te se smanjuje efektivna širina baze. Da bi se pritom zadržao isti iznos ulazne struje I_B , potrebno je povećati napon propusne polarizacije U_{BE} .



Povećanjem izlaznog napona U_{CE} smanjuje se efektivna širina baze pa se povećava gradijent gustoće manjinskih nosilaca u bazi, odnosno smanjuje se struja baze. Stoga je potrebno povećati napon propusne polarizacije U_{BE} tako da površina ispod krivulja raspodjele manjinskih nosilaca u bazi bude jednaka (struja baze je proporcionalna naboju manjinskih nosilaca u bazi).