

Bipolarni tranzistor

ZADATAK.1. Silicijski *npn* tranzistor ima homogene koncentracije primjese u emiteru i bazi iznosa $N_{DE}=2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i $N_{AB}=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna širina baze je $1 \text{ }\mu\text{m}$, a emitera $2 \text{ }\mu\text{m}$. Površina tranzistora je 2 mm^2 . Pokretljivosti manjinskih nosilaca su $\mu_{pE}=300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $\mu_{nB}=500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Vrijeme života elektrona u bazi je $\tau_{nB}=0,5 \text{ }\mu\text{s}$. Izračunati sve komponente struja te faktore pojačanja α i β ako su naponi na spojevima $U_{BE}=0,55 \text{ V}$ i $U_{CB}=5 \text{ V}$. Pretpostaviti $I_{CB0} \approx 0$ i $U_T=25 \text{ mV}$.

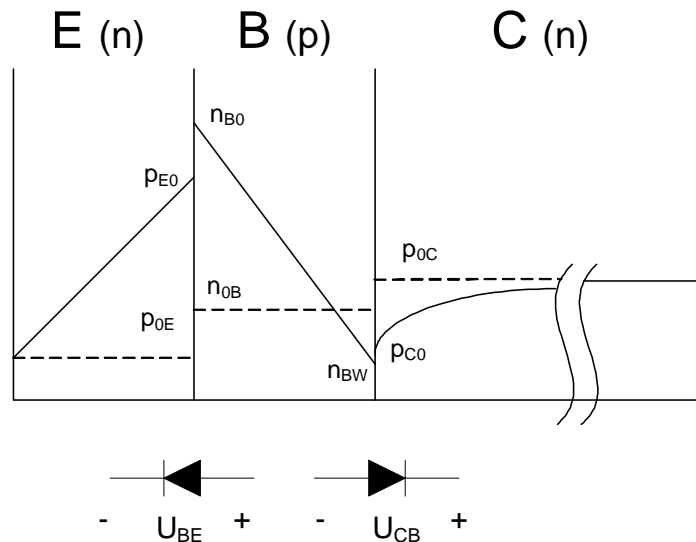
Rješenje:

Prvo treba izračunati ravnotežne koncentracije manjinskih nosilaca u bazi i emiteru:

$$n_{0B} = \frac{n_i^2}{p_{0B}} \cong \frac{n_i^2}{N_{AB}} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{5 \cdot 10^{16}} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$p_{0E} = \frac{n_i^2}{n_{0E}} \cong \frac{n_i^2}{N_{DE}} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{2 \cdot 10^{18}} = 1,05 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

Redovito vrijedi da je $N_{DE} > N_{AB} > N_{DC}$, pa prema tome za manjinske nosioce (*npn* tranzistor) $p_{0E} < n_{0B} < p_{0C}$ (vidi sliku). Na slici su prikazane koncentracije manjinskih nosilaca za zadane napone na spojevima.



Slika 1. Raspodjele manjinskih nosilaca za normalno aktivno područje

Ako si predočimo spojeve tranzistora s *pn*-diodama kao na slici vidimo da je uz $U_{BE}=0,55 \text{ V}$ spoj baza-emiter propusno polariziran. Rubne koncentracije određujemo preko Boltzmann-ovih relacija:

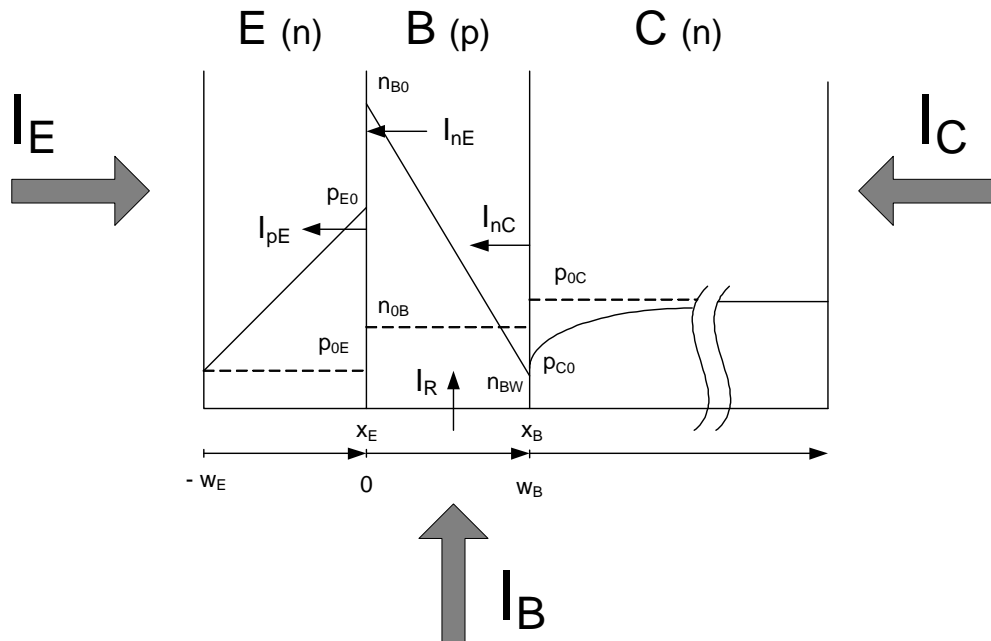
$$n_{B0} = n_{0B} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) = 4,2 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(\frac{0,55}{25 \cdot 10^{-3}}\right) = 1,506 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_{E0} = p_{0E} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) = 1,05 \cdot 10^2 \cdot \exp\left(\frac{0,55}{25 \cdot 10^{-3}}\right) = 3,764 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

Također vidimo da je uz $U_{CB}=5 \text{ V}$ spoj baza-kolektor nepropusno polariziran. Rubne koncentracije računamo po Boltzmann-ovim relacijama:

$$n_{BW} = n_{0B} \cdot \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) = n_{0B} \cdot \exp\left(\frac{-U_{CB}}{U_T}\right) = 4,2 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(\frac{-5}{25 \cdot 10^{-3}}\right) \cong 0$$

$$p_{C0} = p_{0C} \cdot \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) = p_{0C} \cdot \exp\left(\frac{-U_{CB}}{U_T}\right) \cong 0$$



Slika 2. Komponente struja i ukupne struje tranzistora u NAP-u.

Sve komponente struja tranzistora računamo s njihovim stvarnim smjerovima što znači da će sve komponente struja biti pozitivne. Za proračun struja koristit ćemo sliku 2. Zbog propusne polarizacije na rubu spoja baza-emiter postoji višak nosilaca koji zbog razlike u koncentracijama difundiraju prema emitterskom kontaktu (šupljine) odnosno spoju baza-kolektor (elektroni). Brzina rekombinacije na metalnom emitterskom kontaktu je beskonačna pa je koncentracija šupljina tik uz emitterski kontakt jednaka ravnotežnoj koncentraciji. Difuzijska struja šupljina injektiranih iz baze u emiter prema tome iznosi:

$$I_{pE} = -q \cdot S \cdot D_{pE} \cdot \left. \frac{-dp(x_E)}{dx_E} \right|_{x_E=0} = q \cdot S \cdot D_{pE} \cdot \frac{p_{E0} - p_{0E}}{0 - (-w_E)} \cong q \cdot S \cdot D_{pE} \cdot \frac{p_{E0}}{w_E}$$

Prvi predznak 'minus' je zbog toga jer je stvarni smjer struje suprotan od smjera x_E , a drugi predznak 'minus' zbog toga što se šupljine gibaju od mjesta veće koncentracije prema mjestu gdje je koncentracija manja, odnosno u smjeru negativnog gradijenta koncentracije šupljina. Difuzijsku konstantu računamo preko Einstein-ovih relacija:

$$D_{pE} = \mu_{pE} \cdot U_T = 7,5 \text{ cm}^2/s$$

Uvrštenjem u gornju relaciju dobivamo:

$$I_{pE} \cong q \cdot S \cdot D_{pE} \cdot \frac{p_{E0}}{w_E} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,5 \cdot \frac{3,764 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 10^{-4}} = 45,17 \mu A$$

Difuzijska struja elektrona injektiranih iz emitera u bazu iznosi:

$$I_{nE} = -q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \left. \frac{dn(x_B)}{dx_B} \right|_{x_B=0} = -q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \frac{n_{Bw} - n_{B0}}{w_B - 0} \cong q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \frac{n_{B0}}{w_B}$$

'Minus' predznak je zbog toga jer je stvarni smjer struje suprotan od smjera porasta x_B . Elektroni se difuzijski gibaju od mjesta veće koncentracije prema mjestu manje koncentracije, a struja teče u suprotnom smjeru jer je definirana gibanjem pozitivnog naboja. Prema tome struja teče u smjeru pozitivnog gradijenta koncentracije elektrona. Difuzijsku konstantu računamo preko Einstein-ovih relacija:

$$D_{nE} = \mu_{nE} \cdot U_T = 12,5 \text{ cm}^2/s$$

Uvrštenjem u gornju relaciju dobivamo:

$$I_{nE} \cong q \cdot S \cdot D_{nB} \cdot \frac{n_{B0}}{w_B} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 12,5 \cdot \frac{1,506 \cdot 10^{13}}{1 \cdot 10^{-4}} = 6,024 \text{ mA}$$

Dio elektrona injektiranih iz emitera u bazu na putu prema kolektorskom spoju rekombinira s većinskim šupljinama u bazi. Da bi se rekombinirane šupljine nadoknadile, iz vanjskog priključka baze teče rekombinacijska struja I_R . Mjeru rekombinacije u bazi daje nam bazni transportni faktor β^* kojeg računamo prema relaciji:

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w_B}{L_{nB}} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w_B}{\sqrt{D_{nB} \cdot \tau_{nB}}} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{10^{-4}}{\sqrt{12,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}} \right)^2 = 0,9992$$

Transportni faktor daje nam vezu između struje elektrona koji su krenuli s emitterskog spoja i struje elektrona koji su stigli do kolektorskog spoja:

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

Sada možemo izračunati struju elektrona koji dolaze do kolektorskog spoja:

$$I_{nC} = I_{nE} \cdot \beta^* = 6,024 \cdot 0,9992 = 6,0192 \text{ mA}$$

Razlika struje koja je krenula s emitterskog spoja i struje koja je došla do kolektorskog spoja jednaka je rekombinacijskoj struji baze:

$$I_R = I_{nE} - I_{nC} = 6,024 - 6,0192 = 4,8 \text{ } \mu\text{A}$$

Po konvenciji za smjerove struja uzima se da sve struje ulaze u tranzistor kako je i prikazano na slici 2. Prema tome, sve struje koje stvarno ulaze u tranzistor su pozitivne, a one koje izlaze negativne. Kada znamo sve komponente struja možemo računati struje koje teku u vanjskim priključcima tranzistora. Struja emitera sastoji se od struje šupljina koje su injektirane iz baze i koje dolaze do emitterskog kontakta te od struje elektrona koji se injektiraju iz emitera u bazu. Ti elektroni moraju se osigurati iz vanjskog izvora te u vanjskom priključku emitera teče struja:

$$I_E = -(I_{nE} + I_{pE}) = -(6,024 + 45,17 \cdot 10^{-3}) = -6,06917 \text{ mA}$$

Struja je negativna jer je stvarni smjer struje suprotan pretpostavljenom. Struja stvarno izlazi iz priključka emitera (zato strelica na simbolu za *npn* tranzistor gleda prema van).

Struja baze sastoji se od šupljina injektiranih iz baze u emiter te od rekombinacijske struje baze koja nadoknađuje šupljine koje rekombiniraju s elektronima. Te šupljine moraju se osigurati iz vanjskog izvora te u vanjskom priključku baze teče struja:

$$I_B = I_{pE} + I_R = 45,17 + 4,8 = 49,97 \text{ } \mu\text{A}$$

Struja je pozitivna jer ulazi u tranzistor.

Struja kolektora sastoji se od struje elektrona koji dolaze do kolektorskog spoja:

$$I_C = I_{nC} = 6,0192 \text{ mA}$$

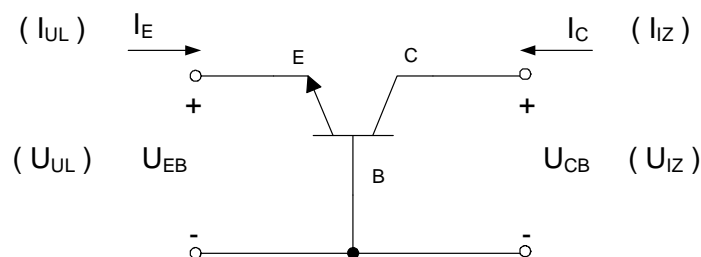
Struja je pozitivna jer ulazi u tranzistor.

Dalje računamo pojačanja tranzistora. Za pojačanja nam je potreban faktor injekcije odnosno efikasnost emitera:

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{6,024}{6,024 + 45,17 \cdot 10^{-3}} = 0,9926$$

Ovaj faktor nam daje mjeru kolika je struja elektrona injektiranih iz emitera u bazu u odnosu na ukupnu struju emitera. Od tih injektiranih elektrona dio se rekombinira u bazi, a veći dio dolazi do spoja baza-kolektor koji je u NAP-u reverzno polariziran. Polje u kolektorskom spoju djeluje tako da 'povlači' elektrone na stranu kolektora. Kako je već spomenuto mjeru rekombinacije u bazi daje nam bazni transportni faktor, β^* .

Ako proglasimo emittersku stezaljku ulaznom, kolektorsku izlaznom, a baznu dodjelimo kao zajedničku ulaznom i izlaznom krugu, imamo situaciju sa slike 3. Tranzistor je u spoju zajedničke baze. Ulazna struja je struja emitera, a izlazna struja je struja kolektora (označeni su i ulazni i izlazni naponi). Istosmjerni faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze je:



Slika 3. Spoj zajedničke baze.

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E}$$

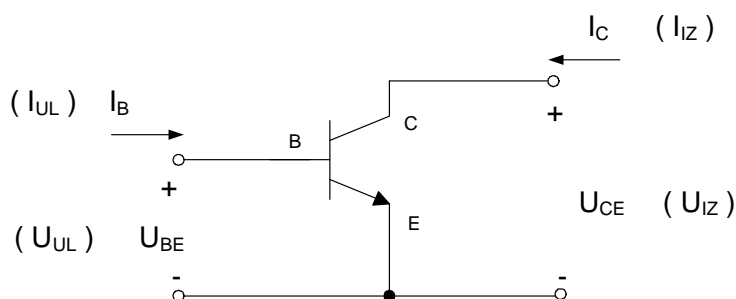
Uvrštenjem komponenti struja dobivamo:

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E} = \frac{I_{nC}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{\beta^* \cdot I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \beta^* \cdot \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \beta^* \cdot \gamma$$

U našem primjeru pojačanje je:

$$\alpha = \beta^* \cdot \gamma = 0,9926 \cdot 0,9992 = 0,9918$$

Ako proglasimo baznu stezaljku ulaznom, kolektorsku izlaznom, a emittersku dodjelimo kao zajedničku ulaznom i izlaznom krugu, imamo situaciju sa slike 4. Tranzistor je u spoju zajedničkog emitera. Ulazna struja je struja baze, a izlazna struja je struja kolektora (označeni su i ulazni i izlazni naponi). Istosmjerni faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera je:



Slika 4. Spoj zajedničkog emitera.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Uvrštenjem komponenti struja dobivamo:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_{nC}}{I_{pE} + I_R} = \frac{I_{nC}}{I_{pE} + (I_{nE} - I_{nC})} = \frac{I_{nC}}{(I_{pE} + I_{nE}) - I_{nC}} = \frac{\frac{I_{nC}}{I_{nE}}}{\frac{(I_{pE} + I_{nE})}{I_{nE}} - \frac{I_{nC}}{I_{nE}}} = \frac{\beta^*}{\frac{1}{\gamma} - \beta^*}$$

$$= \frac{\gamma \cdot \beta^*}{1 - \gamma \cdot \beta^*} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

U našem primjeru pojačanje je:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,9918}{1 - 0,9918} = 121$$

Napomena: kod proračuna faktora pojačanja faktore γ , β^* i α treba računati na četiri decimale (ako su sve četiri devetke onda i na više i to do prve koja je različita od '9'). Ti faktori su bliski jedinici i male pogreške kod zaokruživanja rezultata mogu dovesti do većih pogrešaka u proračunu faktora β (pogledaj nazivnik izraza). Faktor β je dovoljno zaokružiti na cijeli broj.

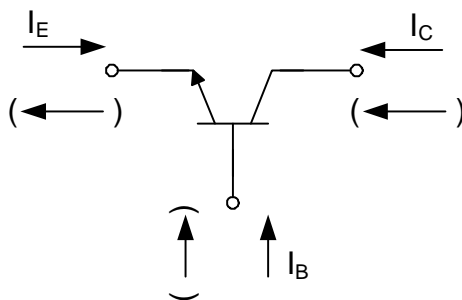
ZADATAK.2. Bipolarni *nnp* tranzistor radi u NAP-u uz struju emitera iznosa $|I_E|=5$ mA. Faktor injekcije (efikasnost emitera) je 0,995, a rekombinacijska struja baze iznosi 5 μ A. Odrediti sve komponente struja, te ukupne struje emitera, baze i kolektora. Izračunati istosmjerne faktore strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera. Pretpostaviti $I_{CB0}=0$.

Rješenje:

Uz pretpostavku da su pozitivne one struje koje ulaze u tranzistor, zbog stvarnih smjerova struja za *nnp* vrijedi:

$$I_E < 0 \quad I_C, I_B > 0$$

Pretpostavljeni i stvarni smjerovi struja bipolarnog *nnp* tranzistora u NAP-u prikazani su na slici 1. Stvarni smjerovi struja nalaze se u zagradama.



Slika.1. Pretpostavljeni i stvarni smjerovi struja *nnp* tranzistora u NAP-u.

Prema tome $I_E = -5 \text{ mA}$

Vrijedi

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

Iz toga slijedi:

$$I_{nE} = \gamma \cdot (-I_E) = 0,995 \cdot 5 = 4,975 \text{ mA}$$

$$I_{pE} = -I_E - I_{nE} = 5 - 4,975 = 25 \text{ } \mu\text{A}$$

Zadana je rekombinacijska struja baze:

$$I_R = 5 \text{ } \mu\text{A}$$

Ta struja nadoknađuje šupljine koje rekombiniraju s elektronima koji prolaze kroz bazu. Prema tome ta struja je jednaka razlici struja elektrona na spojevima tranzistora:

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

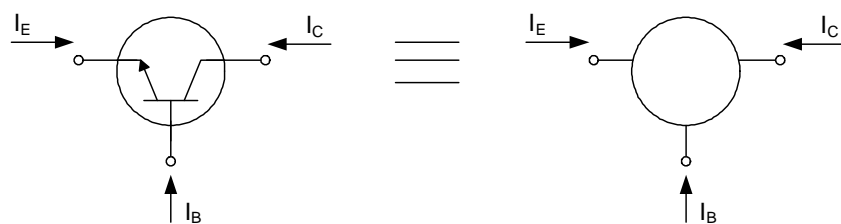
Iz toga računamo struju na kolektorskom spoju:

$$I_{nC} = I_{nE} - I_R = 4,975 - 0,005 = 4,97 \text{ mA}$$

Za ukupne struje možemo računati:

$$I_C = I_{nC} = 4,97 \text{ mA}$$

Tranzistor možemo promatrati kao jedan čvor kao što je prikazano na slici 2. Zbroj svih struja koje ulaze u čvor jednak je nula (Kirchoff). To možemo iskoristiti za proračun posljednje preostale struje tranzistora.



Slika 2. Zbroj svih struja koje ulaze u tranzistor jednak je nula (Kirchoff).

Prema tome:

$$I_B + I_E + I_C = 0,$$

odnosno

$$I_B = -I_E - I_C = 5 - 4,97 = 30 \mu A$$

Provjere radi možemo raspisati preko komponenata struja:

$$I_B = -I_E - I_C = (I_{pE} + I_{nE}) - I_{nC} = I_{pE} + (I_{nE} - I_{nC}) = I_{pE} + I_R = 25 + 5 = 30 \mu A$$

Rezultat je isti.

Faktori pojačanja su:

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E} = \frac{4,97}{5} = 0,9940 \quad \text{SZB}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{4,97}{30 \cdot 10^{-3}} = 166 \quad \text{SZE}$$

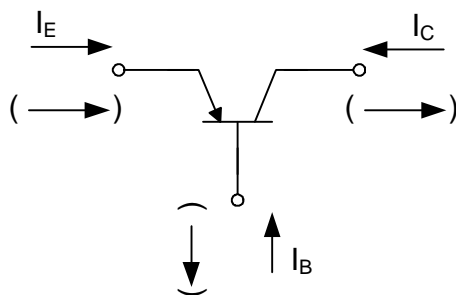
ZADATAK.3. Bipolarni *pnp* tranzistor radi u NAP-u uz struju emitera iznosa $|I_E|=7,5$ mA. Faktor injekcije (efikasnost emitera) je 0,99, a rekombinacijska struja baze iznosi $20 \mu A$. Odrediti sve komponente struja, te ukupne struje emitera, baze i kolektora. Izračunati istosmjerne faktore strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera. Pretpostaviti $I_{CB0}=0$.

Rješenje:

Uz pretpostavku da su pozitivne one struje koje ulaze u tranzistor, zbog stvarnih smjerova struja za *pnp* vrijedi:

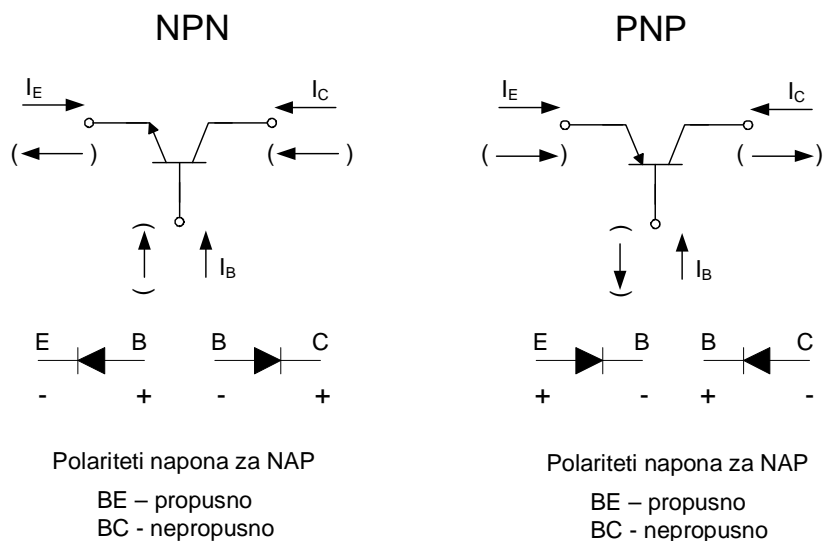
$$I_E > 0 \quad I_C, I_B < 0$$

Pretpostavljeni i stvarni smjerovi struja bipolarnog *pnp* tranzistora u NAP-u prikazani su na slici 1. Stvarni smjerovi struja nalaze se u zagradama.



Slika.1. Pretpostavljeni i stvarni smjerovi struja *pnp* tranzistora u NAP-u

U usporedbi s *npn* tranzistorom stvarni smjerovi struja su suprotni. Isto vrijedi i za polaritete napona koje treba dovesti na spojeve tranzistora da bi on bio u NAP-u. Radi jednostavnosti, spojeve tranzistora možemo si predložiti s diodama prikazanim na slici 2.



Slika.2. Smjerovi struja i polariteti napona za *nnp* i *pnp* tranzistor u NAP-u.

Prema tome $I_E=7,5$ mA. Sve komponente struja tranzistora uvijek računamo s njihovim stvarnim smjerovima pa će one biti pozitivne.

Vrijedi

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

Iz toga slijedi:

$$I_{pE} = \gamma \cdot I_E = 0,99 \cdot 7,5 = 7,425 \text{ mA}$$

$$I_{nE} = I_E - I_{pE} = 7,5 - 7,425 = 75 \text{ } \mu\text{A}$$

Zadana je rekombinacijska struja baze:

$$I_R = 20 \text{ } \mu\text{A}$$

Kod *pnp* tranzistora to je struja elektrona koji dolaze iz vanjskog priključka da nadoknade elektrone potrošene na rekombinaciju sa šupljinama koje prolaze kroz bazu (opet je sve suprotno u odnosu na *nnp*). Pošto elektroni ulaze u bazu iz vanjskog priključka, stvarni smjer struje je takav da ona stvarno izlazi iz baze (smjer struje je definiran smjerom kretanja pozitivnog naboja). Ta struja je jednaka razlici struja šupljina na spojevima tranzistora:

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

Iz toga računamo struju na kolektorskom spoju:

$$I_{pC} = I_{pE} - I_R = 7,425 - 0,020 = 7,405 \text{ mA}$$

Za ukupne struje možemo računati:

$$I_C = -I_{pC} = -7,405 \text{ mA}$$

Struja je negativna jer izlazi iz tranzistora.

Struja baze jednaka je:

$$I_B = -I_E - I_C = -7,5 - (-7,405) = -95 \text{ } \mu\text{A}$$

Struja je negativna jer izlazi iz tranzistora.

Faktori pojačanja su:

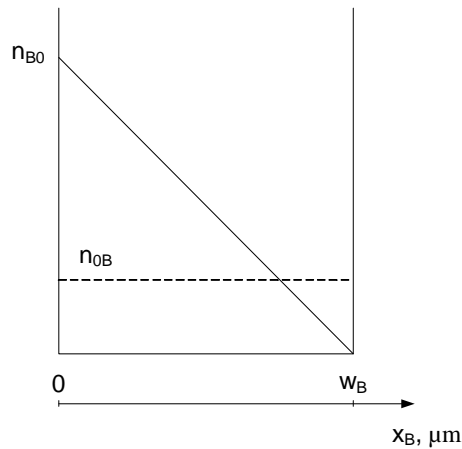
$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E} = \frac{7,405}{7,5} = 0,9873 \quad \text{SZB}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{7,405}{95 \cdot 10^{-3}} = 78 \quad \text{SZE}$$

Izrazi za pojačanja su u biti jednaki za *nnp* i *pnp* tranzistor zato jer su stvarni smjerovi struja baze i kolektora jednaki i suprotni smjeru struje emitera

ZADATAK.4. Raspodjela nosilaca u bazi nekog *nnp* tranzistora prikazana je na slici. Pokretljivost elektrona u bazi je $\mu_n = 550 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, a vrijeme života $\tau_n = 1 \text{ } \mu\text{s}$. Površina

emitorskog spoja iznosi 2 mm^2 , a širina baze $2 \text{ }\mu\text{m}$. Rubna koncentracija elektrona je $n_{B0}=3,75 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Izračunati sve komponente struje te ukupne struje emitera, baze i kolektora ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99,5%. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



Rješenje:

Iz rubne koncentracije i širine baze možemo izračunati nakrcani naboj manjinskih nosilaca u bazi. Računamo površinu pravokutnog trokuta:

$$Q_{nB} = q \cdot S \cdot \frac{n_{B0} \cdot w_B}{2} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{3,75 \cdot 10^{13} \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2} = 12 \text{ pAs}$$

Iz naboja u bazi i vremena života nosilaca možemo izračunati rekombinacijsku struju baze

$$I_R = \frac{Q_{nB}}{\tau_n} = \frac{12 \cdot 10^{-12}}{10^{-6}} = 12 \text{ }\mu\text{A}$$

Iz raspodjele nosilaca u bazi možemo izračunati i struju elektrona injektiranih iz emitera u bazu:

$$I_{nE} = q \cdot S \cdot D_n \frac{dn}{dx} = q \cdot S \cdot \mu_n \cdot U_T \cdot \frac{n_{B0}}{w_B} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 550 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3,75 \cdot 10^{13}}{2 \cdot 10^{-4}} = 8,25 \text{ mA}$$

Zadana je efikasnost emitera 99,5% što znači da je $\gamma=0,995$ pa možemo računati emitorsku struju:

$$I_E = \frac{-I_{nE}}{\gamma} = \frac{-8,25}{0,995} = -8,2915 \text{ mA}$$

Struja šupljina injektiranih iz baze u emiter:

$$I_{pE} = -I_E - I_{nE} = 8,2915 - 8,25 = 41,5 \text{ }\mu\text{A}$$

Struja elektrona koji dolaze do kolektorskog spoja:

$$I_{nC} = I_{nE} - I_R = 8,25 - 12 \cdot 10^{-3} = 8,238 \text{ mA}$$

$$I_C = I_{nC} = 8,238 \text{ mA}$$

Struja baze:

$$I_B = -I_E - I_C = 8,2915 - 8,238 = 53,5 \text{ } \mu\text{A}$$

Pojačanja:

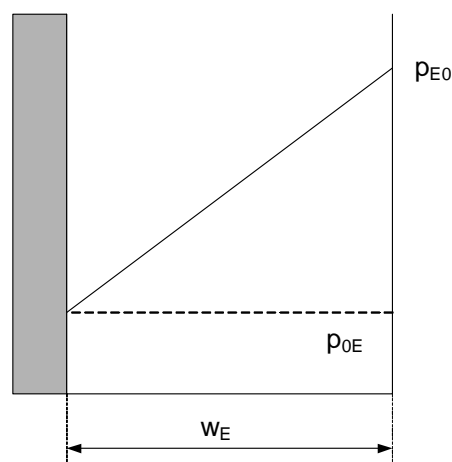
$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E} = \frac{8,238}{8,2915} = 0,9935 \quad \text{SZB}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{8,238}{53,5 \cdot 10^{-3}} = 154 \quad \text{SZE}$$

Može i preko α

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

ZADATAK.5. Raspodjela šupljina u emiteru *n*p*n* tranzistora uz $U_{BE}=0,55 \text{ V}$ prikazana je na slici. Pokretljivost šupljina u emiteru je $\mu_p=300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Površina emitorskog spoja je $S=1 \text{ mm}^2$, a širina emitera $w_E=2 \text{ } \mu\text{m}$. Koncentracija donora u emiteru iznosi $N_{DE}=10^{18} \text{ cm}^{-3}$. U zadanoj radnoj točki rekombinacijska struja baze $I_R=15 \text{ } \mu\text{A}$. Izračunati sve komponente struja, ukupne struje emitera, baze i kolektora te pojačanja ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99,5%. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



Rješenje:

Iz raspodjele nosilaca možemo izračunati struju šupljina injektiranih iz baze u emiter:

$$I_{pE} = q \cdot S \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} = q \cdot S \cdot D_p \cdot \frac{p_{E0}}{w_E}$$

Difuzijska konstanta:

$$D_p = \mu_p \cdot U_T = 300 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 7,5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Rubna koncentracija:

$$p_{E0} = p_{0E} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) = \frac{n_i^2}{N_{DE}} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{18}} \cdot \exp\left(\frac{0,55}{25 \cdot 10^{-3}}\right) = 7,54 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

Struja šupljina injektiranih iz baze u emiter je:

$$I_{pE} = q \cdot S \cdot D_p \cdot \frac{p_{E0}}{w_E} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 7,5 \cdot \frac{7,54 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 10^{-4}} = 45,24 \text{ } \mu\text{A}$$

Struja emitera:

$$I_E = -\frac{I_{pE}}{(1-\gamma)} = 9,048 \text{ mA}$$

Struja elektrona injektiranih iz emitera u bazu:

$$I_{nE} = -I_E - I_{pE} = 9,048 - 45,24 \cdot 10^{-3} = 9,00276 \text{ mA}$$

Struja elektrona na kolektorskom spoju:

$$I_{nC} = I_{nE} - I_R = 9,00276 - 15 \cdot 10^{-3} = 8,98776 \text{ mA}$$

Struja kolektora:

$$I_C = I_{nC} = 8,98776 \text{ mA}$$

Struja baze:

$$I_B = -I_E - I_C = 9,048 - 8,98776 = 60,24 \text{ } \mu\text{A}$$

Pojačanja:

$$\beta = \frac{I_C}{-I_E} = \frac{8,98776}{60,24 \cdot 10^{-3}} = 149$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{149}{150} = 0,9933$$

Zadaci za vježbu

VJ.1. Silicijski *npn* tranzistor ima homogene koncentracije primjesa u emiteru i bazi iznosa $N_{DE}=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i $N_{AB}=2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna širina baze je $0,75 \text{ }\mu\text{m}$, a emitera $2 \text{ }\mu\text{m}$. Površina tranzistora je 5 mm^2 . Pokretljivosti manjinskih nosilaca su $\mu_{pE}=250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $\mu_{nB}=550 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Vrijeme života elektrona u bazi je $\tau_{nB}=0,25 \text{ }\mu\text{s}$. Izračunati sve komponente struja te faktore pojačanja α i β ako su naponi na spojevima $U_{BE}=0,5 \text{ V}$ i $U_{CB}=5 \text{ V}$. Pretpostaviti $I_{CB0} \approx 0$ i $U_T=25 \text{ mV}$.

Rješenje: $I_{nE}=5,984 \text{ mA}$, $I_{pE}=25,5 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=4,9 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=5,979 \text{ mA}$, $I_E= - 6,010 \text{ mA}$, $I_B= 30,4 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=5,979 \text{ mA}$, $\beta=197$, $\alpha=0,9949$

VJ.2. Silicijski *npn* tranzistor ima homogene koncentracije primjesa u emiteru i bazi iznosa $N_{DE}=1,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i $N_{AB}=2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna širina baze je $1 \text{ }\mu\text{m}$, a emitera $2 \text{ }\mu\text{m}$. Površina tranzistora je 1 mm^2 . Pokretljivosti manjinskih nosilaca su $\mu_{pE}=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $\mu_{nB}=520 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Vrijeme života elektrona u bazi je $\tau_{nB}=0,45 \text{ }\mu\text{s}$. Izračunati sve komponente struja te faktore pojačanja α i β ako su naponi na spojevima $U_{BE}=0,525 \text{ V}$ i $U_{CB}=5 \text{ V}$. Pretpostaviti $I_{CB0} \approx 0$ i $U_T=25 \text{ mV}$.

Rješenje: $I_{nE}=2,307 \text{ mA}$, $I_{pE}=10,4 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=2 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=2,305 \text{ mA}$, $I_E= - 2,317 \text{ mA}$, $I_B= 12,32 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=2,305 \text{ mA}$, $\beta=187$, $\alpha=0,9947$

VJ.3. Silicijski *pnp* tranzistor ima homogene koncentracije primjesa u emiteru i bazi iznosa $N_{AE}=1,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i $N_{DB}=2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna širina baze je $1 \text{ }\mu\text{m}$, a emitera $2 \text{ }\mu\text{m}$. Površina tranzistora je 1 mm^2 . Pokretljivosti manjinskih nosilaca su $\mu_{pB}=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $\mu_{nE}=400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Vrijeme života šupljina u bazi je $\tau_{pB}=0,45 \text{ }\mu\text{s}$. Izračunati sve komponente struja te faktore pojačanja α i β ako su naponi na spojevima $U_{BE}= - 0,525 \text{ V}$ i $U_{CB}= - 5 \text{ V}$. Pretpostaviti $I_{CB0} \approx 0$ i $U_T=25 \text{ mV}$.

Rješenje: $I_{pE}=1,242 \text{ mA}$, $I_{nE}=14,8 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=2 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{pC}=1,240 \text{ mA}$, $I_E=1,257 \text{ mA}$, $I_B= - 16,76 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C= - 1,240 \text{ mA}$, $\beta=74$, $\alpha=0,9867$

VJ.4. Silicijski *pnp* tranzistor ima homogene koncentracije primjesa u emiteru i bazi iznosa $N_{AE}=2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i $N_{DB}=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna širina baze je $1 \text{ }\mu\text{m}$, a emitera $2 \text{ }\mu\text{m}$. Površina tranzistora je 2 mm^2 . Pokretljivosti manjinskih nosilaca su $\mu_{pB}=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $\mu_{nE}=400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Vrijeme života šupljina u bazi je $\tau_{pB}=0,5 \text{ }\mu\text{s}$. Izračunati sve komponente struja te faktore pojačanja α i β ako su naponi na spojevima $U_{BE}= - 0,55 \text{ V}$ i $U_{CB}= - 5 \text{ V}$. Pretpostaviti $I_{CB0} \approx 0$ i $U_T=25 \text{ mV}$.

Rješenje: $I_{pE}=3,377 \text{ mA}$, $I_{nE}=60,3 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=4,82 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{pC}=3,372 \text{ mA}$, $I_E=3,437 \text{ mA}$, $I_B= - 65,12 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C= - 3,372 \text{ mA}$, $\beta=52$, $\alpha=0,9811$

VJ.5. Bipolarni *npn* tranzistor radi u NAP-u uz struju emitera iznosa $|I_E|=2,5 \text{ mA}$. Faktor injekcije (efikasnost emitera) je $0,995$, a rekombinacijska struja baze iznosi $5 \text{ }\mu\text{A}$. Odrediti sve komponente struja, te ukupne struje emitera, baze i kolektora. Izračunati istosmjernu faktore strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera. Pretpostaviti $I_{CB0}=0$.

Rješenje: $I_{nE}=2,4875 \text{ mA}$, $I_{pE}=12,5 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=5 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=2,4825 \text{ mA}$, $I_E= - 2,5 \text{ mA}$, $I_B= 17,5 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=2,4825 \text{ mA}$, $\beta=142$, $\alpha=0,9930$

VJ.6. Bipolarni *nnp* tranzistor radi u NAP-u uz struju emitera iznosa $|I_E|=3,5 \text{ mA}$. Faktor injekcije (efikasnost emitera) je 0,9925, a rekombinacijska struja baze iznosi $7 \text{ }\mu\text{A}$. Odrediti sve komponente struja, te ukupne struje emitera, baze i kolektora. Izračunati istosmjerne faktore strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera. Pretpostaviti $I_{CB0}=0$.

Rješenje: $I_{nE}=3,4738 \text{ mA}$, $I_{pE}=26,25 \text{ }\mu\text{A}$, $I_R=7 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=3,4668 \text{ mA}$, $I_E= - 3,5 \text{ mA}$, $I_B= 33,25 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=3,4668 \text{ mA}$, $\beta=104$, $\alpha=0,9905$

VJ.7. Bipolarni *pnp* tranzistor radi u NAP-u uz struju emitera iznosa $|I_E|=3 \text{ mA}$. Faktor injekcije (efikasnost emitera) je 0,99, a rekombinacijska struja baze iznosi $5 \text{ }\mu\text{A}$. Odrediti sve komponente struja, te ukupne struje emitera, baze i kolektora. Izračunati istosmjerne faktore strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera. Pretpostaviti $I_{CB0}=0$.

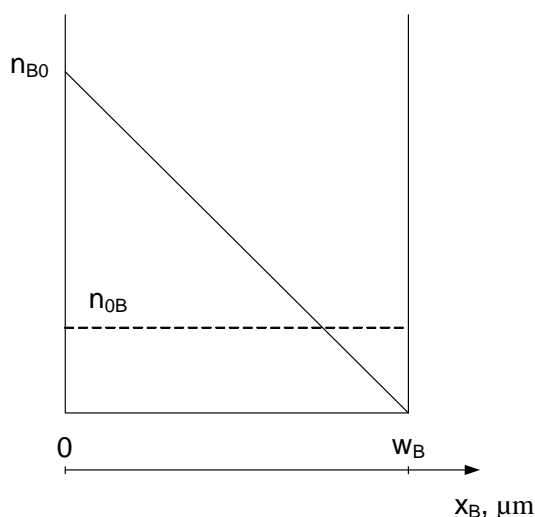
Rješenje: $I_{pE}=2,97 \text{ mA}$, $I_{nE}=30 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=5 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{pC}=2,965 \text{ mA}$, $I_E=3 \text{ mA}$, $I_B= - 35 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C= - 2,965 \text{ mA}$, $\beta=85$, $\alpha=0,9883$

VJ.8. Bipolarni *pnp* tranzistor radi u NAP-u uz struju emitera iznosa $|I_E|=1,5 \text{ mA}$. Faktor injekcije (efikasnost emitera) je 0,9895, a rekombinacijska struja baze iznosi $8 \text{ }\mu\text{A}$. Odrediti sve komponente struja, te ukupne struje emitera, baze i kolektora. Izračunati istosmjerne faktore strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera. Pretpostaviti $I_{CB0}=0$.

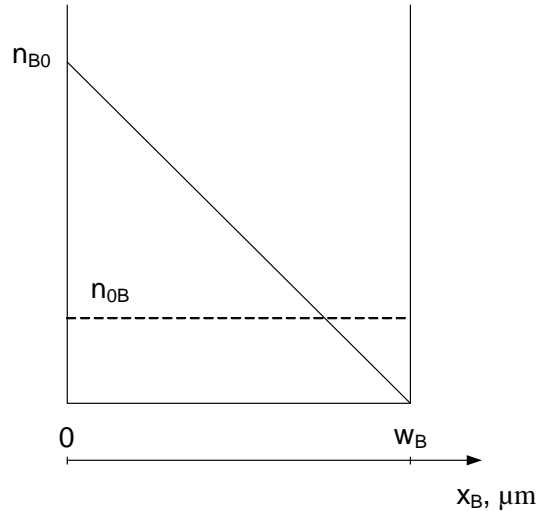
Rješenje: $I_{pE}=1,48425 \text{ mA}$, $I_{nE}=15,75 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=8 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{pC}=1,47625 \text{ mA}$, $I_E=1,5 \text{ mA}$, $I_B= - 23,75 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C= - 1,4763 \text{ mA}$, $\beta=62$, $\alpha=0,98417$

VJ.9. Raspodjela manjinskih nosilaca u bazi nekog *nnp* tranzistora prikazana je na slici. Pokretljivost elektrona u bazi je $\mu_n=530 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, a vrijeme života $\tau_n=0,75 \text{ }\mu\text{s}$. Površina emitorskog spoja iznosi 2 mm^2 , a širina baze $1,5 \text{ }\mu\text{m}$. Rubna koncentracija elektrona je $n_{B0}=2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Izračunati sve komponente struja te ukupne struje emitera, baze i kolektora ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99,8%. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.

Rješenje: $I_{nE}=7,0667 \text{ mA}$, $I_{pE}=14,2 \text{ }\mu\text{A}$, $I_R=8 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=7,0587 \text{ mA}$, $I_E= - 7,0808 \text{ mA}$, $I_B= 22,2 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=7,0587 \text{ mA}$, $\beta=319$, $\alpha=0,9969$

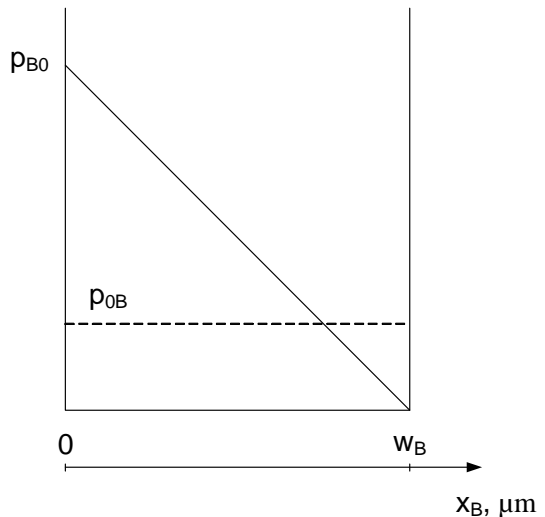


VJ.10. Raspodjela manjinskih nosilaca u bazi nekog *nnp* tranzistora prikazana je na slici. Pokretljivost elektrona u bazi je $\mu_n=500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, a vrijeme života $\tau_n=0,5 \text{ }\mu\text{s}$. Površina emitorskog spoja iznosi 2 mm^2 , a širina baze $1 \text{ }\mu\text{m}$. Rubna koncentracija elektrona je $n_{B0}=1,45 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Izračunati sve komponente struja te ukupne struje emitera, baze i kolektora ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99,75%. Koliki je napon U_{BE} ako se zna da je koncentracija akceptora u bazi $N_{AB}=2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



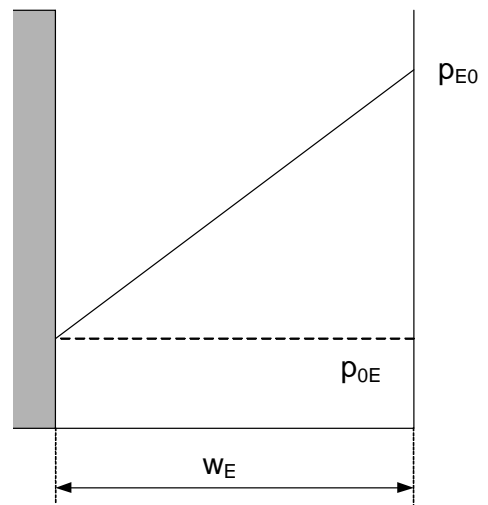
Rješenje: $I_{nE}=5,8 \text{ mA}$, $I_{pE}=14,54 \text{ }\mu\text{A}$, $I_R=4,64 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=5,7954 \text{ mA}$, $I_E= - 5,8145 \text{ mA}$, $I_B= 19,18 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=5,7954 \text{ mA}$, $\beta=302$, $\alpha=0,9967$. $U_{BE}=0,532 \text{ V}$

VJ.11. Raspodjela manjinskih nosilaca u bazi nekog *pnp* tranzistora prikazana je na slici. Pokretljivost šupljina u bazi je $\mu_p=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, a vrijeme života $\tau_p=0,5 \text{ }\mu\text{s}$. Površina emitorskog spoja iznosi $2,5 \text{ mm}^2$, a širina baze $1 \text{ }\mu\text{m}$. Rubna koncentracija elektrona je $p_{B0}=1,75 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Izračunati sve komponente struja te ukupne struje emitera, baze i kolektora ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99 %. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



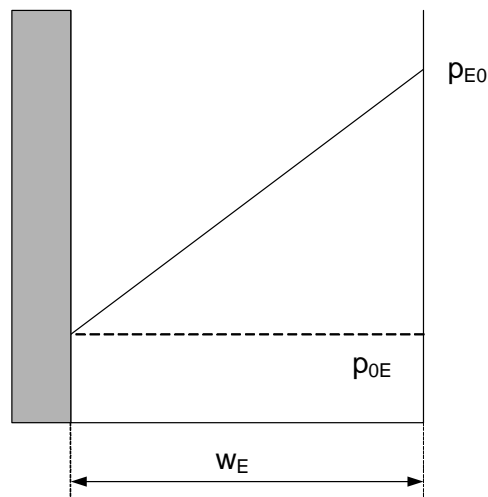
Rješenje: $I_{pE}=4,9 \text{ mA}$, $I_{nE}=49,5 \text{ }\mu\text{A}$, $I_R=7 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{pC}=4,893 \text{ mA}$, $I_E=4,9495 \text{ mA}$, $I_B= - 56,5 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C= - 4,893 \text{ mA}$, $\beta=87$, $\alpha=0,9886$

VJ.12. Raspodjela šupljina u emiteru *nnp* tranzistora uz $U_{BE}=0,55 \text{ V}$ prikazana je na slici. Pokretljivost šupljina u emiteru je $\mu_p=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Površina emitorskog spoja je $S=1 \text{ mm}^2$, a širina emitera $w_E=2 \text{ }\mu\text{m}$. Koncentracija donora u emiteru iznosi $N_{DE}=2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. U zadanoj radnoj točki rekombinacijska struja baze $I_R=12 \text{ }\mu\text{A}$. Izračunati sve komponente struja, ukupne struje emitera, baze i kolektora te pojačanja ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99,5%. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



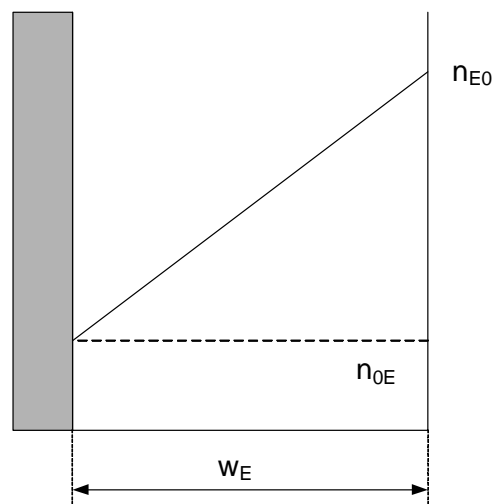
Rješenje: $I_{nE}=4,1998 \text{ mA}$, $I_{pE}=21,1 \text{ }\mu\text{A}$, $I_R=12 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=4,1878 \text{ mA}$, $I_E= - 4,2209 \text{ mA}$, $I_B= 33,1 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=4,1878 \text{ mA}$, $\beta=127$, $\alpha=0,9922$

VJ.13. Raspodjela šupljina u emiteru *npn* tranzistora prikazana je na slici. Pokretljivost šupljina u emiteru je $\mu_p=270 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Površina emitorskog spoja je $S=2,5 \text{ mm}^2$, a širina emitera $w_E=1,5 \text{ }\mu\text{m}$. Ravnotežne i rubne koncentracije nosilaca redom iznose $p_{0E}=2,1 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-3}$ i $p_{E0}=3,387 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. U zadanoj radnoj točki rekombinacijska struja baze $I_R=10 \text{ }\mu\text{A}$. Izračunati napon spoja baza-emiter U_{BE} . Odrediti sve komponente struja, ukupne struje emitera, baze i kolektora te pojačanja ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99,25%. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



Rješenje: $U_{BE}=0,53 \text{ V}$ $I_{nE}=8,0672 \text{ mA}$, $I_{pE}=61 \text{ }\mu\text{A}$, $I_R=10 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{nC}=8,0572 \text{ mA}$, $I_E=-8,1281 \text{ mA}$, $I_B=71 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=8,0572 \text{ mA}$, $\beta=114$, $\alpha=0,9913$

VJ.14. Raspodjela elektrona u emiteru *pnp* tranzistora uz $U_{BE}=-0,55 \text{ V}$ prikazana je na slici. Pokretljivost elektrona u emiteru je $\mu_n=400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Površina emitorskog spoja je $S=2 \text{ mm}^2$, a širina emitera $w_E=1,8 \text{ }\mu\text{m}$. Koncentracija akceptora u emiteru iznosi $N_{AE}=2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. U zadanoj radnoj točki rekombinacijska struja baze $I_R=15 \text{ }\mu\text{A}$. Izračunati sve komponente struja, ukupne struje emitera, baze i kolektora te pojačanja ako je poznato da tranzistor ima efikasnost emitera 99 %. Pretpostaviti $U_T=25 \text{ mV}$ i $I_{CB0} \approx 0$.



Rješenje: $I_{pE}=6,6328 \text{ mA}$, $I_{nE}=67 \text{ }\mu\text{A}$ $I_R=15 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{pC}=6,6178 \text{ mA}$, $I_E=6,6998 \text{ mA}$, $I_B=-82 \text{ }\mu\text{A}$, $I_C=-6,6178 \text{ mA}$, $\beta=81$, $\alpha=0,9878$