

7.1. Bipolarni tranzistor

Aktivni el. s 3 priključka

↳ poput unipolarnog tranz → spojica se kao četverpol

• pohraba u ulaznom krugu upravlja signalom u izlaznom krugu

• trobojna struktura - dva sloja istog tipa poluvodiča odvojena slojem suprotnog tipa

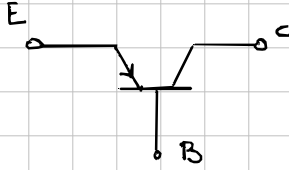
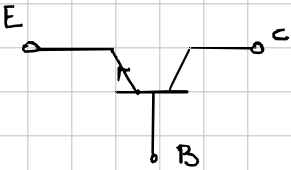
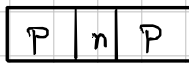
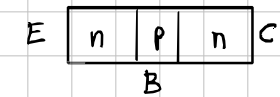
n p n

p n p tranzistori

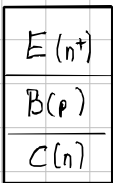
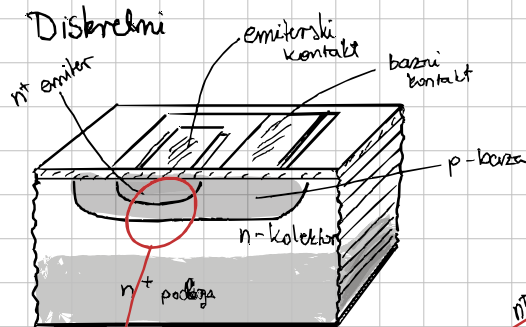
• priključak = Emitor

• baza = B

• kolektor = C

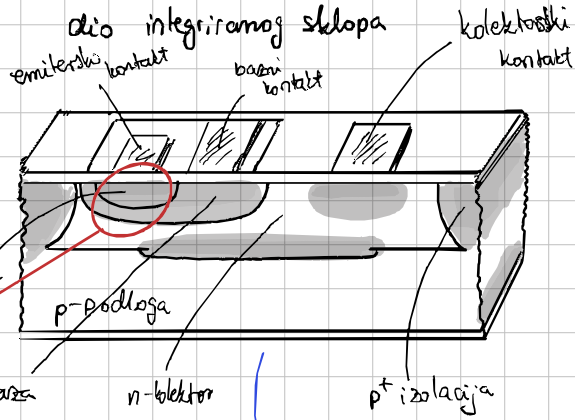


Struktura



podloga je dio kolektora

samo je crveno pročišćavano



u zajedničkoj podlozi za ne elemente

dominantni tok struje → E...B...C **intrinzični kolektor**

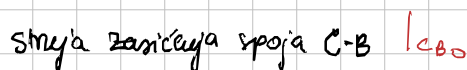
Integrirana izvedba

► u zajedničkoj podlozi velik broj puno elem. (tranzistori, diode, otpornici, kondenzatori)

električki izolirani!

↳ p n spoj. skupna pol.

NPN

 $le > 0$

$$\Rightarrow \underline{I_R = I_n E - I_n C}$$

Faktor injekcije, transportni faktor baze

Dobar tranzistor = što veći dio emitorske struje stiže do kolektora

Faktor injekcije (efikasnost emitera)

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{I_{nE}}{-I_E} \rightarrow \approx \text{teži u 1!}$$

=> dobar => $\gamma \rightarrow 1$; $I_{pE} \rightarrow 0$

• $N_{DE} \gg N_{AB}$ (cca $\times 100$)
donosi u E akceptori

Transportni faktor baze

→ uska baza

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{nE}}$$

koliko smo uspješni u izlasku e^- iz baze

=> dobar = veći dio I_{nE} ulazi u C kao struja I_{nC}

→ uska Baza (fiziki)

→ mala rekomb u bazi

$$\Rightarrow \beta^* \rightarrow 1$$

SZB

Faktor strujnog pojačavanja u spoju zajedničke baze

→ kad se to drži u računu:

• izlazna struja I_C , ulazna I_E => spoj zajedničke B: $I_C = -\gamma\beta^* I_E + I_{CBO}$

→ svojstvo tranzistora - propusno pol. spojem EB upravlja se velikom strujom kroz bliski zap. pol. spoj CB

$$\alpha = \gamma\beta^* \rightarrow I_C = -\alpha I_E + I_{CBO}$$

zanimanje struje zadržavanja I_{CBO}

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

statički faktor strujnog pojačavanja u SZB
 $\approx [0,98, 0,995]$

Primer 7.1.)

$$200 e^- \rightarrow 1 p^+$$

$$\frac{399}{400} \text{ do C}$$

α, γ, β^* ?

$$\text{Faktor injekcije: } \gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}}$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{200}{200 + 1} = 0,995$$

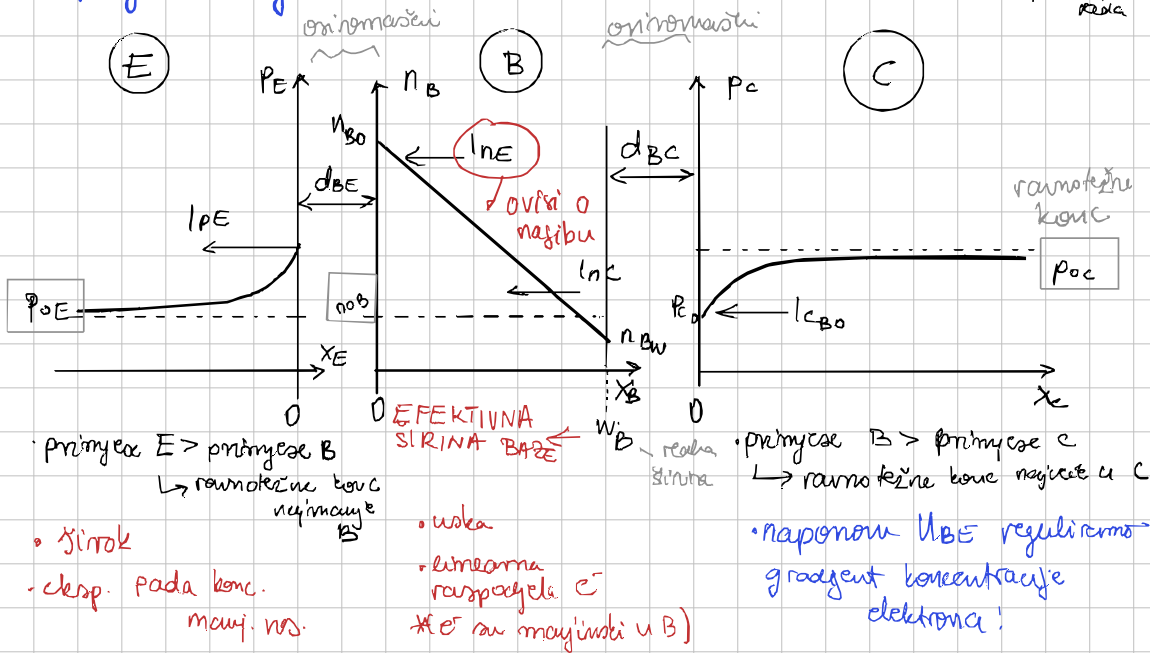
$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \frac{399}{400} = 0,9975$$

$$\Rightarrow \alpha = \gamma\beta^* = \frac{200}{201} \cdot \frac{399}{400} = 0,9975$$

Određivanje komponenti struja

Raspodjela majinjskih nosilaca

npr u normalnom aktivnom području



spoj EB propusno pol.

→ rubne konc. na granici emitor. sloja EB

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

$$p_{E0} = p_{0E} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

> 0 napon između p-baze i n-emitra

• rubne konc. > ravnotežne

spoj BC zaporno pol.

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

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

< 0

• rubne konc. < ravnotežne

(B)

uz usku bazu

raspodjela manj. el. linearna

$$n_B = n_{BW} + (n_{B0} - n_{BW}) \frac{w_B - x_B}{w_B}$$

▷ I_{nE} - difuz. struja majinjskih e^- na $x_B=0$
• smjer suprotan x_B

$$I_{nE} = -I_{n0} \Big|_{x_B=0} = -qSD_{nB} \frac{dn_B}{dx_B} \Big|_{x_B=0} = qSD_{nB} \frac{n_{B0} - n_{BW}}{w_B} \approx qSD_{nB} \frac{n_{B0}}{w_B}$$

• uz pretpostavku da je emitor širok, raspodjela manj. šupljina je exp

$$p_E = p_{0E} + (p_{E0} - p_{0E}) \exp\left(\frac{x_E}{L_{pE}}\right)$$

▷ I_{pE} - difuz. struja majinjskih šupljina p_E na mjestu $x_E=0$
• smjer suprotan od x_E

$$I_{pE} = -I_{p0} \Big|_{x_E=0} = qSD_{pE} \frac{dp_E}{dx_E} \Big|_{x_E=0} = qSD_{pE} \frac{p_{E0} - p_{0E}}{L_{pE}} \approx qSD_{pE} \frac{p_{E0}}{L_{pE}}$$

faktor injekcije (2 stranice prije): $\gamma = \frac{I_E}{I_E + I_{PE}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{PE}}{I_E}}$

=> prema izrazima za struje I_E i I_{PE} i izrazima za koncentracije n_{B0} i p_{E0}

$n_{B0} = \frac{n_i^2}{N_{AB}}$ akceptorne baze
 $p_{E0} = \frac{n_i^2}{N_{DE}}$ donorni emitera

difuzna struja: $I_n = q S D_n \frac{dn}{dx}$

$I_E = q S D_{nB} \cdot \frac{n_{B0}}{W_B} \rightarrow q S D_{nB} \cdot \frac{n_i^2}{N_{AB} \cdot W_B}$
 $I_{PE} = q S D_{pE} \cdot \frac{p_{E0}}{L_{pE}} \rightarrow q S D_{pE} \cdot \frac{n_i^2}{N_{DE} \cdot L_{pE}}$

$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{q S D_{pE} \cdot A_{E^2} \cdot N_{AB} \cdot W_B}{q S D_{nB} \cdot A_{E^2} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}}} =$

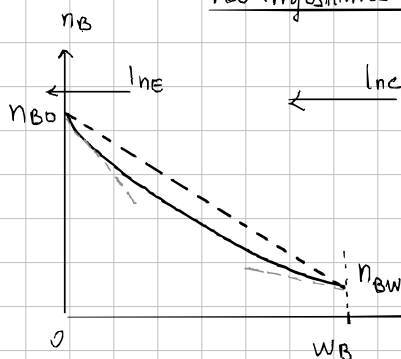
$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} \cdot N_{AB} \cdot W_B}{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}}}$

-> faktor γ bit će što bliži jedinici što je emiter jače dopravljači od baze

* odnos ostalih parametara ne pridonosi bitno razlici struja I_E i I_{PE}
 -> primjenjivo za VSKU (E) => $L_{pE} \rightarrow W_C$

transportni faktor $\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{nE}}$

dif. struje manje e^- u B na mjestima $x_B = W_B$ i $x_B = 0$



- uz pretpostavljenu linearnu raspodjelu manjinskih nosilaca, gradijent konc. e^- je stalan

$\rightarrow I_{nC} = I_{nE}$

vidimo da nije sasvim linearna -> REKOMBINACIJA

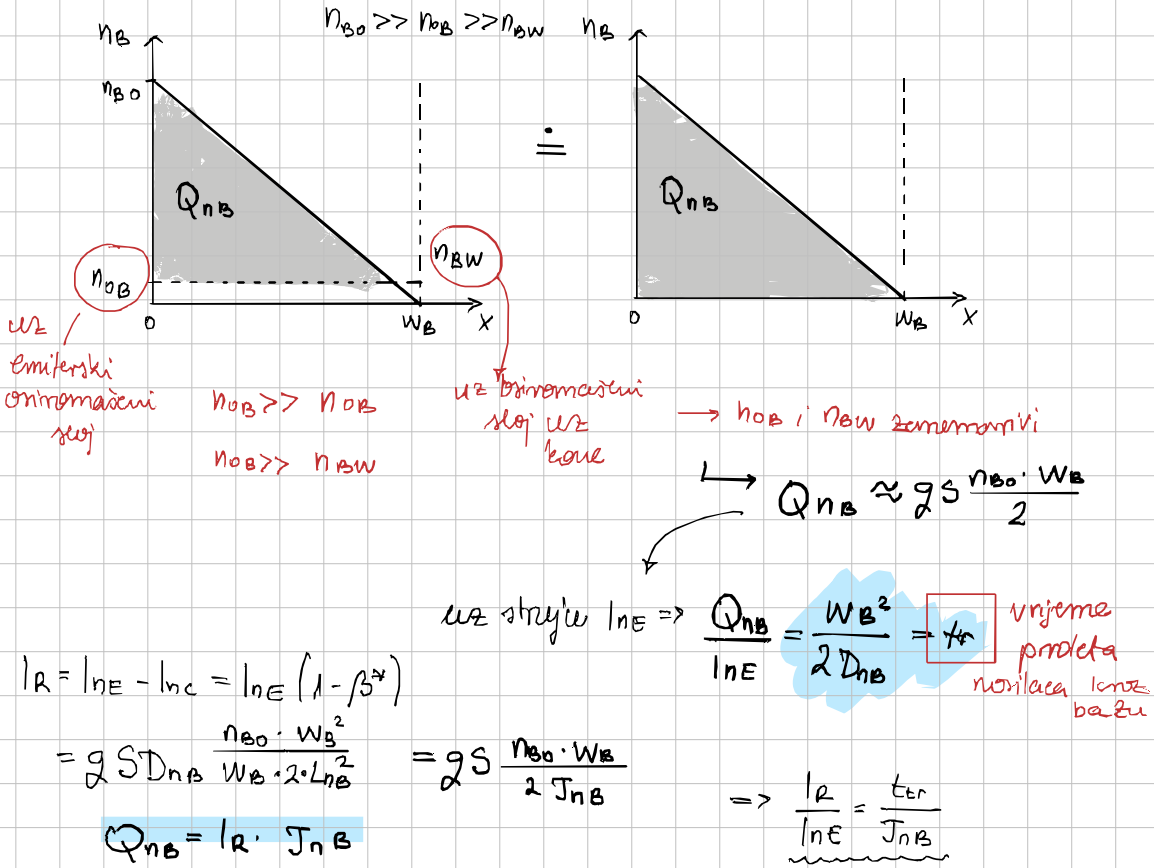
$\Rightarrow n_B = n_{BW} + (n_B - n_{BW}) \frac{\text{sh}\left(\frac{W_B - x_B}{L_{nB}}\right)}{\text{sh}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}$
 $I_{nC} < I_{nE}$ (struja e^- koja napušta B, manja od struje e^- koji su ušli u B)

$I_{nE} = -I_{nB} \Big|_{x_B=0} = -q S D_{nB} \frac{dn_B}{dx_B} \Big|_{x=0} = q S D_{nB} \frac{n_{B0} - n_{BW}}{L_{nB}} \frac{\text{ch}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}$

$I_{nC} = -I_{nB} \Big|_{x_B=W_B} = -q S D_{nB} \frac{dn_B}{dx_B} \Big|_{x=W_B} = q S D_{nB} \frac{n_{B0} - n_{BW}}{L_{nB}} \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}$

=> transportni faktor β^* : $\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}$
 $\beta^* \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)^2$
 baza je uska, $W_B \ll L_{nB}$

Nalracami nalraj menjinski nroilaca u bazi



PNP tranzistor \rightarrow obrnuto

\rightarrow šupljine su glavne

$\rightarrow I_{pE} \uparrow \uparrow$, nastojimo smanjiti I_{nE}

$$I_E > 0$$

$$I_B < 0$$

$$I_C < 0$$

$$I_{C0} < 0$$

\rightarrow isto ovako detaljno u skripti str. 284.

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

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

$$I_C = -I_{pC} + I_{C0}$$

$$\beta^* = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{pE}}$$

$$I_B = -I_{nE} - I_R - I_{C0}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_E = I_B + I_C$$

Primer 9.2

$$N_{DE} = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$S = 1 \text{ mm}^2$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$N_{AB} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$I_{CBO} = 0,45 \text{ pA}$$

$$W_B = 1 \mu\text{m}$$

(E)

$$D_{pE} = 8 \text{ cm}^2/\text{s}$$

(B)

$$D_{nB} = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$$

E i C → diodi

$$L_{pE} = 20 \mu\text{m}$$

$$L_{nB} = 15 \mu\text{m}$$

B - uški

* dve komponente struje
- ukupne struje E, B, C

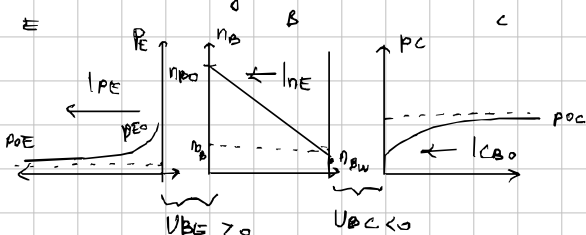
$$a) U_{BE} = 0,55 \text{ V}, U_{CB} = 5 \text{ V}$$

$$b) U_{BE} = 0,55 \text{ V}, U_{CB} = 0$$

$$\text{Za } T = 300 \text{ K} \rightarrow n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}, U_T = \frac{T}{11600} \text{ V} = 0,026 \text{ V}$$

ravnoteže najvišnji konc.

$$\text{Boltzman: } n_{p0} = n_{op} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$



$$I_{pE0} = I_{pE} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

rubna ravnotež.

ravnotežna

$$p_{0E} = \frac{n_i^2}{N_{0E}} = \frac{n_i^2}{N_{DE}} = \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{2 \cdot 10^{17}} \rightarrow p_{0E} = 1,05 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$N_{0B} = \frac{n_i^2}{N_{AB}} = \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{10^{16}} \rightarrow N_{0B} = 21,03 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$a) U_{BE} = 0,55 \text{ V} \quad U_{CB} = 5 \text{ V}$$

* uz ekstremni sloj zbog CB

ukupne:

$$I_{pE0} = \dots = 1,81 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{BW} = N_{0B} \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) = N_{0B} \cdot \exp\left(\frac{-U_{CB}}{U_T}\right)$$

$$n_{B0} = \dots = 3,62 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{BW} = 2,29 \times 10^{-20} \approx 0$$

* Zbog toga da je $W_B \ll L_{nB} \rightarrow$ raspodela najvišnji c^- u bazi je linearna

$$I_{nE} = q S D_{nB} \frac{n_{B0}}{W_B} = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot \frac{3,62 \times 10^{13}}{10^{-4}} = 5,79 \text{ mA}$$

$$I_{pE} = q S D_{pE} \frac{p_{E0}}{L_{pE}} = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot \frac{1,81 \times 10^{12}}{20 \cdot 10^{-4}} = 11,6 \mu\text{A}$$

$$\text{Ukupna struja emitera: } I_E = -I_{pE} - I_{nE} = -5,80 \text{ mA}$$

$$\text{nabijeni naboj u bazi iznosi } Q_{nB} = q S \frac{n_{B0} \cdot W_B}{2} = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \frac{3,62 \times 10^{13} \cdot 10^{-4}}{2}$$

$$Q_{nB} = 2,90 \text{ pAs}$$

$$\text{vreme života } c^- \text{ u B: } L_{nB} = \sqrt{D_{nB} \cdot \tau_{nB}}$$

$$\tau_{nB} = \frac{L_{nB}^2}{D_{nB}} \rightarrow \frac{(15 \times 10^{-4})^2}{10} = 0,225 \mu\text{s} = \tau_{nB}$$

▷ rekombinacijska struja I_R i elektronska komponenta struje I_n : (struje manjih naponskih naponskih)

$$I_R = \frac{Q_{nB}}{T_{nB}} = \frac{2,90 \times 10^{-12}}{0,225 \times 10^{-6}} = \boxed{12,9 \mu A}$$

struja baze: $I_B = I_{pE} + I_{R-} - I_{cB0}$

$$\Rightarrow \boxed{I_B = 2,45 \times 10^{-5} A}$$

$$I_B = 11,6 \mu A + 12,9 \mu A - 0,45 \mu A$$

! mora vrijediti $I_B + I_E + I_C = 0$; odstupanja su posljedica zaokruživanja

b) $U_{BE} = 0,55V$ $U_{CB} = 0V$

→ hv na npgu EB ostaje isto, ali mijenja se n_{BW} zbog $U_{BC} = 0$

$$n_{BW} = n_{0B} \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) = n_{0B} \rightarrow \boxed{n_{BW} = 21,03 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}}$$

→ trebali da su izračunali $n_{B0} \gg n_{0B}$, $n_{BW} \rightarrow$ izračunati komponente se ne mijenjaju

Primjer 7.3) Za tranzistor iz prošlog primjera odrediti faktor strujnog pojačanja α .

koliko li iznosa α kada li širina emitera bila $W_E = 3 \mu m \ll L_{pE}$

! gdje je: $\alpha = \gamma \cdot \beta^*$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_E \cdot W_B \cdot N_B}{D_B \cdot L_E \cdot N_E}} \rightarrow \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} \cdot W_B \cdot N_{AB}}{D_{nB} \cdot L_{pE} \cdot N_{0E}}} = \frac{1}{1 + \frac{8 \cdot 1 \cdot 10^{16}}{10 \cdot 20 \cdot 2 \times 10^{17}}}$$

$\gamma = 0,938$

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_B} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W_B}{L_{nB}} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{15} \right)^2 \rightarrow \boxed{\beta^* = 0,967}$$

$$\alpha = \gamma \cdot \beta^* \rightarrow \boxed{\alpha = 0,965}$$