

STROMAR⁵

POLPREVODNIŠKA ELEKTRONIKA – REŠITVE
I. kolokvij (20. 4. 2012)

1. V dolgo silicijevo palico s presekom $A = 10^{-3} \text{ cm}^2$ in idealnimi zunanji površinami pri $x = 0$ ustaljeno injiciramo vrzeli z nadkoncentracijo $\Delta p(x=0) = p(x=0) - p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Izračunajte gradient koncentracije vrzeli dp/dx pri $x=0$ in tok vrzeli $I_p(x=0)$, če je difuzijska dolžina vrzeli v palici $L_p = 10^{-3} \text{ cm}$, življenjski čas pa $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$.

Podatki:

$$A = 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$\Delta p(x=0) = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$L_p = 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$$

$$I_p(x=0), dp/dx \text{ pri } x=0$$

Rešitev:

kontinuiteta enačba:
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} = 0$$

transportna enačba:
$$J_p = q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx} \cong -q D_p \frac{dp}{dx}$$

difuzijska enačba:
$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p} = \frac{p - p_0}{L_p^2}$$

difuzijska konstanta:
$$D_p = \frac{L_p^2}{\tau_p} = \frac{10^{-6} \text{ cm}^2}{10^{-6} \text{ s}} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

splošna rešitev difuzijske enačbe:
$$p(x) - p_0 = \Delta p(x) = A e^{-\frac{x}{L_p}} + B e^{\frac{x}{L_p}}$$

robna pogoja:
$$x=0: \quad p(0) - p_0 = \Delta p(x=0)$$

$$x=\infty: \quad p(\infty) - p_0 = 0$$

konstanti:
$$A = \Delta p(x=0) \quad \text{in} \quad B = 0$$

porazdelitev koncentracije vrzeli:
$$p(x) = p_0 + \Delta p(x=0) e^{-\frac{x}{L_p}}$$

gradient koncentracije:
$$\frac{dp(x)}{dx} = \frac{\Delta p(x=0)}{-L_p} e^{-\frac{x}{L_p}}$$

gradient koncentracije pri $x=0$:
$$\frac{dp(x=0)}{dx} = -\frac{\Delta p(x=0)}{L_p} = -\frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{10^{-3} \text{ cm}} = -10^{19} \text{ cm}^{-4}$$

tokova gostota vrzeli:
$$J_p(x) = -q D_p \frac{dp(x)}{dx} = \frac{q D_p \Delta p(x=0)}{L_p} e^{-\frac{x}{L_p}}$$

$$J_p(x=0) = -q D_p \frac{dp(x=0)}{dx} = q D_p \frac{\Delta p(x=0)}{L_p} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-4} = 1,6 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

tok vrzeli pri $x=0$:
$$I_p(x=0) = A \cdot J(x=0) = 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot 1,6 \text{ A cm}^{-2} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ A} = \underline{\underline{1,6 \text{ mA}}}$$

2. Silicijev stopničasti pn -spoj ima v p -plasti $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in v n -plasti $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Določite lego Fermijevega nivoja E_F v strukturi in narišite energijski diagram v termičnem ravnovesju pri sobni temperaturi ($T \approx 300 \text{ K}$). Na osnovi energijskih razlik $E_{Fip} - E_F$ in $E_F - E_{Fin}$ izračunajte difuzijsko napetost U_D . Izračunajte debelini osiromašenih območij x_p in x_n ter električno polje E na metalurškem spoju.

Podatki:

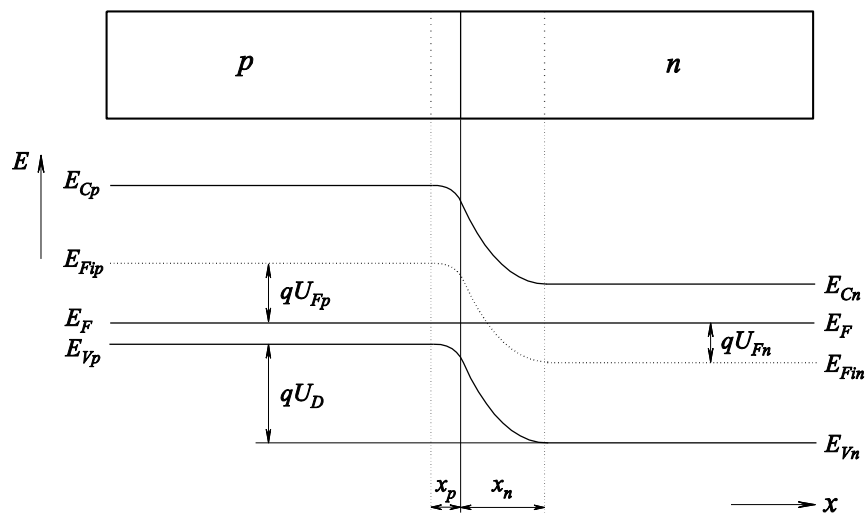
$$N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

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

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

$$E_{Fip} - E_F, E_F - E_{Fin}, U_D, x_p, x_n, E$$

Rešitev:



$$p_p \doteq N_A \doteq n_i e^{\frac{E_{Fip} - E_F}{kT}} \quad n_n \doteq N_D \doteq n_i e^{\frac{E_F - E_{Fin}}{kT}}$$

$$E_{Fip} - E_F = qU_{Fp} = kT \cdot \ln \frac{N_A}{n_i} = 25,66 \text{ meV} \cdot \ln \frac{10^{17} \text{ cm}^{-3}}{10^{10} \text{ cm}^{-3}} = \underline{413,6 \text{ meV}}$$

$$E_F - E_{Fin} = qU_{Fn} = kT \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} = 25,66 \text{ meV} \cdot \ln \frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{10^{10} \text{ cm}^{-3}} = \underline{354,5 \text{ meV}}$$

$$qU_D = qU_{Fp} + qU_{Fn} = 413,6 \text{ meV} + 354,5 \text{ meV} = \underline{768,1 \text{ meV}} \quad \underline{U_D = 768,1 \text{ mV}}$$

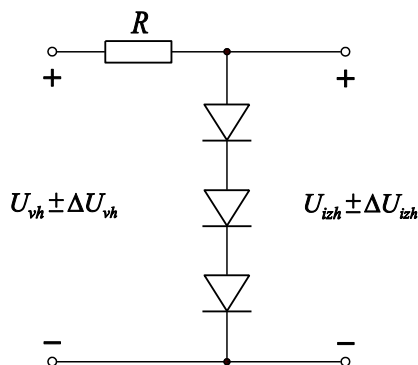
$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_D}{q N_A (N_A + N_D)} U_D} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \text{ As(Vcm)}^{-1} \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot 0,768 \text{ V}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{17} \cdot 1,1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}}} = \underline{2,95 \times 10^{-6} \text{ cm}}$$

$$N_A x_p = N_D x_n \quad x_n = \frac{N_A}{N_D} x_p = \frac{10^{17} \text{ cm}^{-3}}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} 2,95 \times 10^{-6} \text{ cm} = \underline{2,95 \times 10^{-5} \text{ cm}}$$

$$E_{\max} = -\frac{q}{\varepsilon} N_A x_p =$$

$$= -\frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ As}}{10^{-12} \text{ As(Vcm)}^{-1}} 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot 2,95 \times 10^{-6} \text{ cm} = \underline{\underline{-4,73 \times 10^4 \text{ Vcm}^{-1}}}$$

3. Z zaporedno vezavo upora ($R=1\text{ k}\Omega$) in treh enakih diod želimo dobiti čim bolj konstantno izhodno napetost $U_{izh} \doteq 2,1\text{ V}$. Izračunajte, za koliko se bo spremenila izhodna napetost, če se bo vhodna napetost $U_{vh} = 10\text{ V}$ spremenila za $\pm 0,5\text{ V}$.



Podatki:

$$R = 1\text{ k}\Omega$$

$$U_{izh} \doteq 2,1\text{ V}$$

$$U_{vh} = 10 \pm 0,5\text{ V}$$

$$\Delta U_{izh}$$

tok skozi R in diode:
$$I = \frac{U_{vh} - U_{izh}}{R} = \frac{10\text{ V} - 2,1\text{ V}}{10^3\text{ VA}^{-1}} = \underline{7,9\text{ mA}}$$

dif. upornost ene diode:
$$r_D = \frac{U_T}{I} = \frac{25,66\text{ mV}}{7,9\text{ mA}} \doteq \underline{3,25\text{ }\Omega}$$

dif. upornost treh diod:
$$r = 3 \cdot r_D = 3 \cdot 3,25\text{ }\Omega = \underline{9,75\text{ }\Omega}$$

sprememba izh. napetosti:
$$\Delta U_{izh} = \Delta U_{vh} \frac{r}{R + r} = \pm 0,5\text{ V} \frac{9,75\text{ VA}^{-1}}{(10^3 + 9,75)\text{ VA}^{-1}} = \underline{\underline{\pm 4,8\text{ mV}}}$$

4. Stopničasti nesimetrični p^+n -spoj s površino $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$ je v n -plasti dopiran z $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Difuzijsko napetost na spoju ocenjujemo na $U_D \approx 0,8 \text{ V}$, difuzijska konstanta in življenjski čas vrzeli v n -plasti pa sta: $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ in $\tau_p = 0,1 \mu\text{s}$. Izračunajte spojno kapacitivnost C_T pri zaporni napetosti $U_R = 10 \text{ V}$ in difuzijsko kapacitivnost C_d pri prevodnosti napetosti $U = 0,6 \text{ V}$.

Podatki:

$$A = 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$U_D \approx 0,8 \text{ V}$$

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

$$\tau_p = 0,1 \mu\text{s}$$

$$C_T(U_R = 10 \text{ V}), C_d(U = 0,6 \text{ V})$$

Rešitev:

$$\begin{aligned} C_T &= A \sqrt{\frac{q\epsilon}{2} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} \frac{1}{(U_D + U_R)}} \doteq A \sqrt{\frac{q\epsilon}{2} \frac{N_D}{(U_D + U_R)}} = \\ &= 10^{-4} \text{ cm} \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-12} \text{ As}/(\text{Vcm})}{2} \cdot \frac{10^{15} \text{ cm}^{-3}}{10,8 \text{ V}}} = 0,272 \times 10^{-12} \text{ F} = \underline{\underline{0,272 \text{ pF}}} \end{aligned}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{10 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1} \cdot 0,1 \times 10^{-6} \text{ s}} = 10^{-3} \text{ cm}$$

$$I_s = A q n_i^2 \frac{D_p}{N_D L_p} = 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot 1,6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6} \cdot \frac{10 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1}}{10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{-3} \text{ cm}} = 1,6 \times 10^{-14} \text{ A}$$

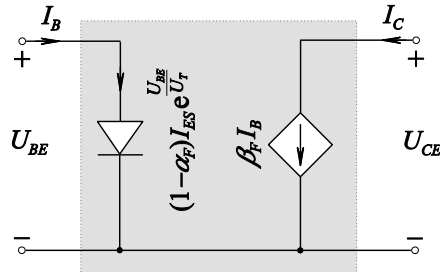
$$I = I_s e^{\frac{U}{U_T}} = 1,6 \times 10^{-14} \text{ A} \cdot e^{\frac{0,6 \text{ V}}{0,02566 \text{ V}}} = \underline{\underline{0,23 \text{ mA}}}$$

$$g = \frac{I}{U_T} = \frac{0,23 \text{ mA}}{25,66 \text{ mV}} = \underline{\underline{8,9 \text{ mS}}}$$

$$C_d = \frac{g \cdot \tau_p}{2} = \frac{8,96 \text{ mAV}^{-1} \cdot 0,1 \mu\text{s}}{2} = \underline{\underline{0,45 \text{ nF}}}$$

POLPREVODNIŠKA ELEKTRONIKA – REŠITVE
II. kolokvij (11. 6. 2012)

1. S pomočjo danega nadomestnega vezja *npn* bipolarnega tranzistorja s tokom nasičenja $I_{ES} = 10^{-14}$ A in tokovnim ojačenjem $\beta_F = 100$ določite kolektorski tok I_C in vhodno napetost U_{BE} , če je bazni tok $I_B = 10 \mu\text{A}$ in izhodna napetost $U_{CE} = 10$ V.



Podatki:

$$I_{ES} = 10^{-14} \text{ A}$$

$$\beta_F = 100$$

$$I_B = 10 \mu\text{A}$$

$$U_{CE} = 10 \text{ V}$$

$$I_C, U_{BE}$$

Rešitev:

$$I_C = \beta_F I_B = 100 \cdot 10 \times 10^{-6} \text{ A} = \underline{10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}}$$

$$I_B = (1 - \alpha_F) I_{ES} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad \alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} = \frac{100}{101} = \underline{0,99}$$

$$U_{BE} = U_T \ln \frac{I_B}{(1 - \alpha_F) I_{ES}} = 25,66 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{-5} \text{ A}}{0,01 \cdot 10^{-14} \text{ A}} \cong \underline{650 \text{ mV}}$$

2. Bipolarni tranzistor v delovni točki in z nadomestnim vezjem kot v prvi nalogi želimo uporabiti kot ojačevalnik majhnih signalov. Izračunajte hibridne četverpolne parametre h_{ije} in narišite pripadajoče linearizirano nadomestno vezje.

Rešitev:

$$\text{Izhodišče: } u_1(i_1, u_2), \quad i_2(i_1, u_2) \quad \rightarrow \quad u_{BE}(i_B, u_{CE}), \quad i_C(i_B, u_{CE})$$

$$u_{BE}(i_B, u_{CE}) = U_T \ln \frac{i_B}{(1 - \alpha_F) I_{ES}}, \quad i_C(i_B, u_{CE}) = \beta_F i_B$$

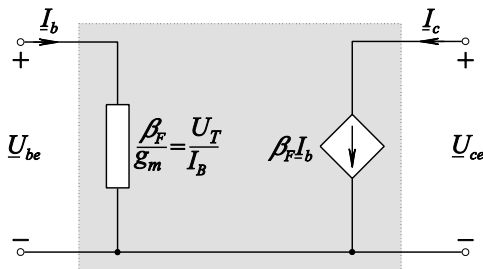
$$u_{be} = h_{11e} \underline{i_b} + h_{12e} \underline{U_{ce}} = h_{11e} i_b + h_{12e} u_{ce}$$

$$i_c = h_{21e} \underline{i_b} + h_{22e} \underline{U_{ce}} = h_{21e} i_b + h_{22e} u_{ce}$$

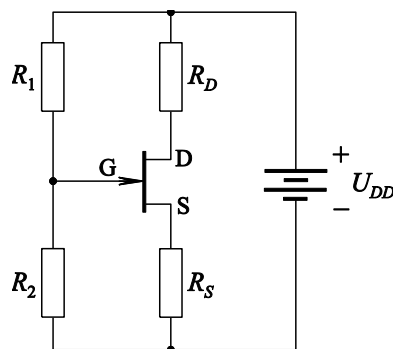
$$h_{11e} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_D = \left. \frac{U_T}{i_B} \right|_D = \frac{U_T}{I_B} = \frac{25,66 \text{ mV}}{10 \mu\text{A}} = \underline{2566 \Omega}, \quad h_{12e} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_D \rightarrow 0$$

$$h_{21e} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_D = \beta_F = \underline{100}, \quad h_{22e} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_D \rightarrow 0$$

$$\begin{bmatrix} h_{11e} & h_{12e} \\ h_{21e} & h_{22e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_T}{I_B} & 0 \\ \beta_F & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2566 \Omega & 0 \\ 100 & 0 \end{bmatrix}$$



3. Izračunajte upornosti R_D in R_S , da bo pri napajalni napetosti $U_{DD} = 15 \text{ V}$ ponorski tok $I_{DS} = 4 \text{ mA}$ in napetost $U_{DS} = 5 \text{ V}$. ($I_{DSS} = 9 \text{ mA}$, $U_P = -3 \text{ V}$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$).



Podatki:

$$I_{DSS} = 9 \text{ mA}, \quad U_P = -3 \text{ V}$$

$$R_1 = 200 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$U_{DD} = 15 \text{ V}$$

$$I_{DS} = 4 \text{ mA}$$

$$U_{DS} = 5 \text{ V}$$

$$\underline{R_D, R_S}$$

Rešitev:

$$U_{GS} + U_{RS} - U_{R2} = 0, \quad U_{RS} = -U_{GS} + U_{R2}$$

$$U_{DD} - U_{RS} - U_{DS} - U_{RD} = 0, \quad U_{RD} = U_{DD} - U_{RS} - U_{DS}$$

$$U_{R2} = \frac{U_{DD}}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{15 \text{ V}}{200 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} 100 \text{ k}\Omega = 5 \text{ V}$$

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2 \rightarrow U_{GS} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_{DS}}{I_{DSS}}}\right) U_P = \left(1 - \sqrt{\frac{4 \text{ mA}}{9 \text{ mA}}}\right) (-3 \text{ V}) = -1 \text{ V}$$

$$U_{RS} = -U_{GS} + U_{R2} = +1 \text{ V} + 5 \text{ V} = 6 \text{ V} \rightarrow R_S = \frac{U_{RS}}{I_{DS}} = \frac{6 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = \underline{1,5 \text{ k}\Omega}$$

$$U_{RD} = U_{DD} - U_{RS} - U_{DS} = 15 \text{ V} - 6 \text{ V} - 5 \text{ V} = 4 \text{ V} \rightarrow R_D = \frac{U_{RD}}{I_{DS}} = \frac{4 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = \underline{1 \text{ k}\Omega}$$

4. Izračunajte najmanjšo napetost U_{DS} MOS-tranzistorja z vgrajenim n -kanalom z $U_T = -2 \text{ V}$, $C_0 \mu_n W/L = 2 \text{ mA/V}^2$, pri kateri bo tranzistor deloval v območju nasičenja, če je $U_{GS} = 1 \text{ V}$. Izračunajte pripadajoči ponorski tok I_D . Narišite simbol in prerez strukture obravnavanega tranzistorja ter izhodne karakteristike.

Podatki:

$$U_T = -2 \text{ V}, C_0 \mu_n W/L = 2 \text{ mA/V}^2$$

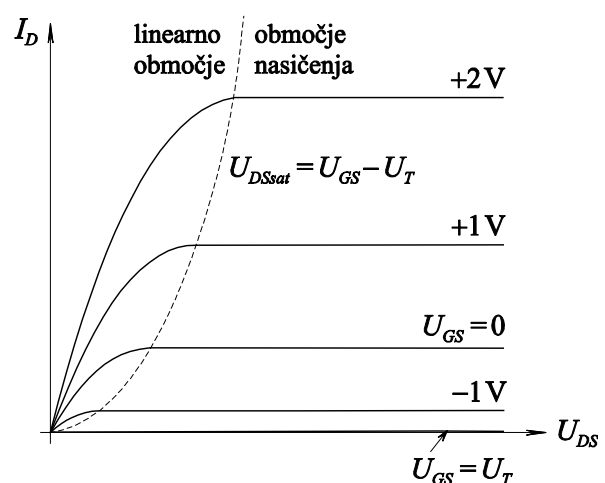
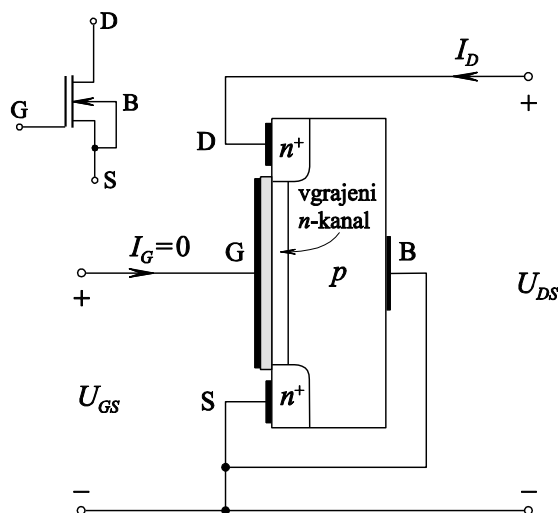
$$U_{GS} = 1 \text{ V}$$

$$U_{DSsat}, I_D$$

Rešitev:

$$U_{DSsat} = U_{GS} - U_T = 1 \text{ V} + 2 \text{ V} = \underline{3 \text{ V}}$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \frac{C_0 W \mu_n}{L} (U_{GS} - U_T)^2 = \frac{2 \text{ mA/V}^2}{2} (1 \text{ V} + 2 \text{ V})^2 = \underline{9 \text{ mA}}$$



POLPREVODNIŠKA ELEKTRONIKA

I. kolokvij – primeri rešenih nalog

1. Silicij vsebuje akceptorske primesi koncentracije $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Izračunajte koncentracijo donorskih primesi N_D , ki jo moramo dodati, da bo silicij postal tipa n in bo pri sobni temperaturi Fermijeva energija 0,20 eV pod robom prevodnega pasu. ($E_{G\text{Si}} = 1,12 \text{ eV}$)

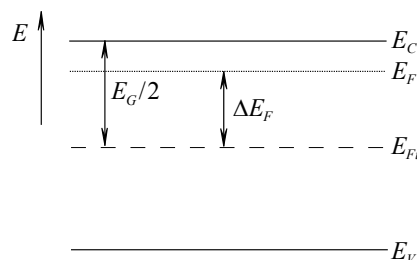
Podatki:

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

$$E_C - E_F = 0,2 \text{ eV}$$

$$E_{G\text{Si}} = 1,12 \text{ eV}$$

$$N_D = ?$$



Rešitev:

$$N_D - N_A \gg n_i$$

$$E_F - E_{Fi} = \Delta E_F = E_G/2 - (E_C - E_F) = 0,56 \text{ eV} - 0,2 \text{ eV} = \underline{0,36 \text{ eV}}$$

$$N_D - N_A \doteq n = n_i e^{\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}}$$

$$N_D = N_A + n_i e^{\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} + 10^{10} \text{ cm}^{-3} e^{\frac{0,36 \text{ eV}}{0,02566 \text{ eV}}} \doteq \underline{\underline{2,24 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}}}$$

2. Koncentracija vrzeli v siliciju se spreminja po enačbi $p(x) = 2 \times 10^{15} e^{-x/L_p} \text{ cm}^{-3}$ za $x \geq 0$. Pri $x = 0$ je vrednost difuzijskega toka vrzeli $J_{pdif} = 6,4 \text{ A cm}^{-2}$. Izračunajte difuzijsko dolžino vrzeli L_p , če je difuzijska konstanta vrzeli $D_p = 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Podatki:

$$p(x) = 2 \times 10^{15} e^{-x/L_p} \text{ cm}^{-3}$$

$$J_{pdif} = 6,4 \text{ A cm}^{-2} \quad (x = 0)$$

$$D_p = 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$L_p = ?$$

Rešitev:

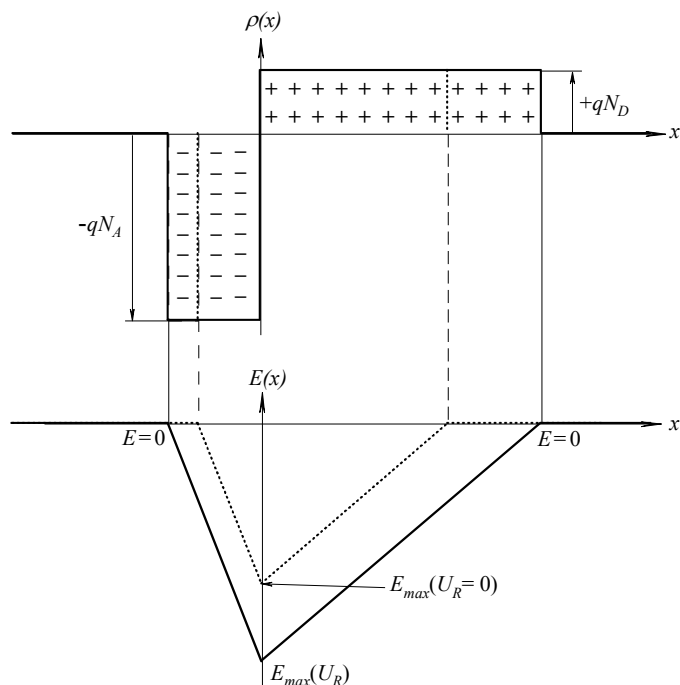
$$J_{pdif} = -qD_p \frac{dp}{dx} = \frac{qD_p}{L_p} 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} e^{-\frac{x}{L_p}} \quad x = 0 \Rightarrow J_{pdif} = \frac{qD_p}{L_p} \cdot 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$L_p = \frac{qD_p 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{J_{pdif}|_{x=0}} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \cdot 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{6,4 \text{ A cm}^{-2}} = \underline{\underline{5 \times 10^{-4} \text{ cm}}}$$

3. Izračunajte, pri kateri zaporni priključeni zunanji napetosti U_R bo električno polje na metalurškem spoju stopničaste silicijeve pn -diode znašalo $|E_{maks.} = 2 \times 10^4 \text{ V cm}^{-1}|$, če je n -plast diode dopirana z $N_D = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ in p -plast z $N_A = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Skicirajte krajevni potek električnega polja pri priključeni zaporni napetosti in brez priključene napetosti.

Podatki:

$$\begin{aligned} |E_{maks.} &= 2 \times 10^4 \text{ V cm}^{-1} \\ N_A &= 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\ N_D &= 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \\ U_R &=? \end{aligned}$$



Rešitev:

$$|E_{maks.}| = \frac{qN_D}{\epsilon} x_n \quad x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{N_A(U_D + U_R)}{N_D(N_A + N_D)}} \quad N_A \gg N_D \Rightarrow x_n \doteq \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{(U_D + U_R)}{N_D}}$$

$$U_D = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0,02566 \text{ V} \cdot \ln \frac{5 \times 10^{17} \cdot 2 \times 10^{14}}{10^{20}} = \underline{0,709 \text{ V}}$$

$$U_R = \frac{E_{maks.}^2 \epsilon}{2qN_D} - U_D = \frac{(2 \times 10^4 \text{ V cm}^{-1})^2 \cdot 10^{-12} \text{ As (V cm)}^{-1}}{2 \cdot 1,6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}} - 0,709 \text{ V} \doteq \underline{\underline{5,54 \text{ V}}}$$

4. Silicijeva dioda s tokom nasičenja pri sobni temperaturi $I_S = 10^{-12}$ A ima dolžino nevtralnega dela n -plasti $l_n = 10^{-2}$ cm s specifično upornostjo $\rho_n = 0,1 \Omega\text{cm}$ in dolžino nevtralnega dela p -plasti $l_p = 5 \times 10^{-2}$ cm s specifično upornostjo $\rho_p = 0,02 \Omega\text{cm}$, površina diode je $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$. Izračunajte napetost na zunanjih sponkah diode, če skozi diodo teče tok $I = 1$ mA. Kolikšna bo napetost pri toku $I = 10$ mA?

Podatki:

$$I_S = 10^{-12} \text{ A}$$

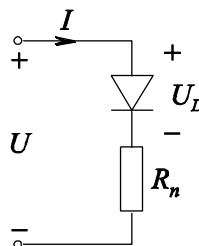
$$l_n = 10^{-2} \text{ cm}, \quad \rho_n = 0,1 \Omega\text{cm}$$

$$l_p = 5 \times 10^{-2} \text{ cm}, \quad \rho_p = 0,02 \Omega\text{cm}$$

$$A = 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$I_1 = 1 \text{ mA}, \quad I_2 = 10 \text{ mA}$$

$$U_1 = ?, \quad U_2 = ?$$



Rešitev:

$$R_n = \frac{\rho_n l_n + \rho_p l_p}{A} = \frac{0,1 \Omega\text{cm} \cdot 10^{-2} \text{ cm} + 0,02 \Omega\text{cm} \cdot 5 \times 10^{-2} \text{ cm}}{10^{-4} \text{ cm}^2} = \underline{20 \Omega}$$

$$U_{D1} = U_T \ln \frac{I_1}{I_S} = 0,02566 \text{ V} \cdot \ln \frac{10^{-3} \text{ A}}{10^{-12} \text{ A}} \doteq \underline{0,532 \text{ V}}$$

$$U_1 = U_{D1} + R_n I_1 = 0,532 \text{ V} + 20 \text{ V A}^{-1} 10^{-3} \text{ A} = \underline{\underline{0,552 \text{ V}}}$$

$$U_{D2} = U_T \ln \frac{I_2}{I_S} = 0,02566 \text{ V} \cdot \ln \frac{10 \times 10^{-3} \text{ A}}{10^{-12} \text{ A}} \doteq \underline{0,591 \text{ V}}$$

$$U_2 = U_{D2} + R_n I_2 = 0,591 \text{ V} + 20 \text{ V A}^{-1} 10^{-2} \text{ A} = \underline{\underline{0,791 \text{ V}}}$$

POLPREVODNIŠKA ELEKTRONIKA

II. kolokvij – primeri rešenih nalog

1. Določite tokove (I_B , I_C , I_E) in napetosti (U_{CB} , U_{CE}) bipolarnega tranzistorja, če je napetost $U_{EB} = -0,7 \text{ V}$ (aktivno območje delovanja) in ojačenje $\alpha_F = 0,98$. ($U_{CC} = 10 \text{ V}$, $U_{EE} = 10 \text{ V}$, $R_C = 5 \text{ k}\Omega$, $R_B = 10 \text{ k}\Omega$).

Podatki:

$$U_{CC} = 10 \text{ V}$$

$$U_{EE} = 10 \text{ V}$$

$$U_{EB} = -0,7 \text{ V}$$

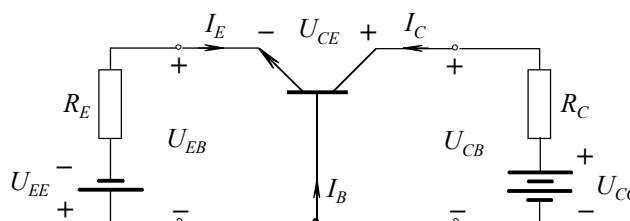
$$R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\alpha_F = 0,98$$

$$I_B, I_C, I_E = ?$$

$$U_{CB}, U_{CE} = ?$$



Rešitev:

$$U_{EE} + R_E I_E + U_{EB} = 0 \quad I_E = \frac{-U_{EE} - U_{EB}}{R_E} = \frac{-10 \text{ V} + 0,7 \text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = -9,3 \times 10^{-4} \text{ A} = \underline{\underline{-0,93 \text{ mA}}}$$

$$I_C = -\alpha_F I_E = -0,98 \cdot (-0,93 \text{ mA}) = \underline{\underline{0,9114 \text{ mA}}}$$

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} = \frac{0,98}{1 - 0,98} = 49$$

$$I_B = -I_E - I_C = 0,93 \text{ mA} - 0,9114 \text{ mA} = 0,0186 \text{ mA} = \underline{\underline{18,6 \mu\text{A}}}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_F} = \frac{0,9114 \text{ mA}}{49} = \underline{\underline{18,6 \mu\text{A}}}$$

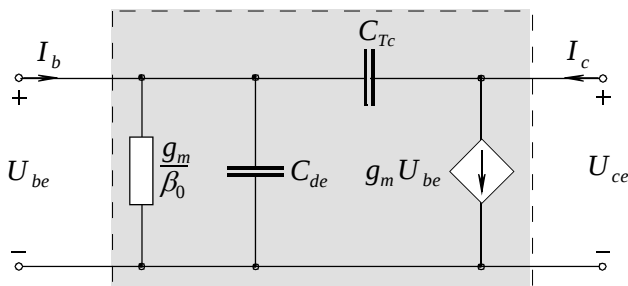
$$U_{CC} - U_{CB} + R_C I_C = 0 \quad U_{CB} = U_{CC} - R_C I_C = 10 \text{ V} - 5 \times 10^3 \Omega \cdot 0,9114 \times 10^{-3} \text{ A} = \underline{\underline{5,443 \text{ V}}}$$

$$U_{EB} - U_{CB} + U_{CE} = 0 \quad U_{CE} = -U_{EB} + U_{CB} = 0,7 \text{ V} + 5,443 \text{ V} = \underline{\underline{6,143 \text{ V}}}$$

2. Določite absolutno vrednost kratkostičnega tokovnega ojačenja $|\underline{\beta}|$ bipolarnega tranzistorja z danim visokofrekvenčnim nadomestnim vezjem, če je frekvenca krmilnega signala

$\omega = 10^8 \text{ rad s}^{-1}$. Ugotovite ali je ta frekvenca pod ali nad mejno frekvenco ω_β .

($\beta_0 = 100$, $g_m = 50 \text{ mS}$, $C_{de} = 2 \text{ pF}$, $C_{Tc} = 0,1 \text{ pF}$).



Podatki:

$$\beta_0 = 100$$

$$g_m = 50 \text{ mS}$$

$$C_{de} = 2 \text{ pF}$$

$$C_{Tc} = 0,1 \text{ pF}$$

$$\omega = 10^8 \text{ rad s}^{-1}$$

$$|\underline{\beta}| = ?$$

$$|\underline{\beta}(\omega)| > \text{ ali } < |\underline{\beta}(\omega_\beta)|$$

Rešitev:

$$\underline{I}_c + j\omega C_{Tc} \underline{U}_{be} - g_m \underline{U}_{be} = 0$$

$$\underline{I}_b - \frac{g_m}{\beta_0} \underline{U}_{be} - j\omega C_{de} \underline{U}_{be} - j\omega C_{Tc} \underline{U}_{be} = 0$$

$$\underline{I}_c + (j\omega C_{Tc} - g_m) \frac{\underline{I}_b}{\frac{g_m}{\beta_0} + j\omega C_{de} + j\omega C_{Tc}} = 0$$

$$\underline{\beta} = - \frac{\underline{I}_c}{\underline{I}_b} \bigg|_{\underline{U}_{ce}=0} = - \frac{g_m - j\omega C_{Tc}}{\frac{g_m}{\beta_0} + j\omega(C_{de} + C_{Tc})}$$

$$\underline{\beta} = - \frac{50 \times 10^{-3} \text{ S} - j10^8 \text{ rad s}^{-1} \cdot 0,1 \times 10^{-12} \text{ F}}{\frac{50 \times 10^{-3} \text{ S}}{100} + j10^8 \text{ rad s}^{-1} (2 \times 10^{-12} \text{ F} + 0,1 \times 10^{-12} \text{ F})} = \underline{-85 + j35,7}$$

$$|\underline{\beta}(\omega)| = 92,2 > |\underline{\beta}(\omega_\beta)| = \frac{\beta_0}{\sqrt{2}} = 70,7$$

Frekvenca krmilnega signala ω je pod mejno frekvenco ω_β .

3. Spojni FET z n -kanalom v orientaciji s skupnim izvorom ima napetost zadržnitve $U_p = -4 \text{ V}$ in tok ponora $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$. Na vhodu je priključena baterijska napetost $U_{GG} = 1 \text{ V}$, na izhodu pa $U_{DD} = 8 \text{ V}$, in sicer prek upornosti $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, kot prikazuje slika. Mirovna delovna točka se nahaja v območju nasičenja. Določite prevodnostne parametre g_{ijs} , narišite nadomestno vezje in izračunajte napetostno ojačenje za majhne nizkofrekvenčne signale. V dano izhodno karakteristiko vrišite uporovno premico in označite delovno točko.

Podatki:

$$U_p = -4 \text{ V}$$

$$I_{DSS} = 4 \text{ mA}$$

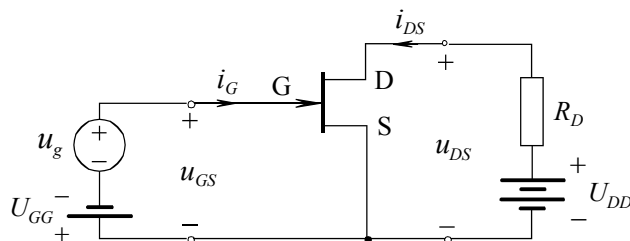
$$U_{GG} = 1 \text{ V}$$

$$U_{DD} = 8 \text{ V}$$

$$R_D = 2 \text{ k}\Omega$$

$$g_{ijs} = ?$$

$$A_u = ?$$



Rešitev:

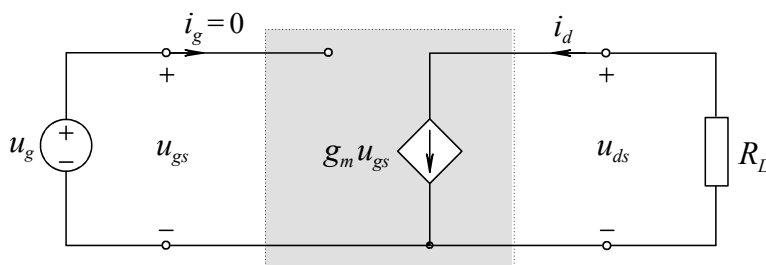
Ker je tok krmilne elektrode $i_G = I_G + i_g$ zanemarljivo majhen, lahko vzamemo, da sta parametra $g_{11s} \cong 0$ in $g_{12s} \cong 0$. Parameter g_{21s} lahko pri majhnih nizkofrekvenčnih signalih določimo z odvodom enačbe ponorskega toka:

$$g_{21s} = \frac{dI_{DS}}{dU_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{U_p} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p}\right) = -\frac{2 \cdot 4 \text{ mA}}{-4 \text{ V}} \left(1 - \frac{-1 \text{ V}}{-4 \text{ V}}\right) = \underline{\underline{1,5 \text{ mS}}}.$$

Parameter g_{21s} imenujemo tudi transkonduktanca in ga navadno označimo z g_m . Določimo še parameter g_{22s} :

$$g_{22s} = \left. \frac{dI_{DS}}{dU_{DS}} \right|_{U_{GS} = \text{konst.}} = \underline{\underline{0}}.$$

Pri danem idealiziranem opisu spojni FET tranzistor v območju nasičenja pri krmiljenju z majhnimi nizkofrekvenčnimi signali nadomestimo s krmiljenim napetostnim generatorjem.



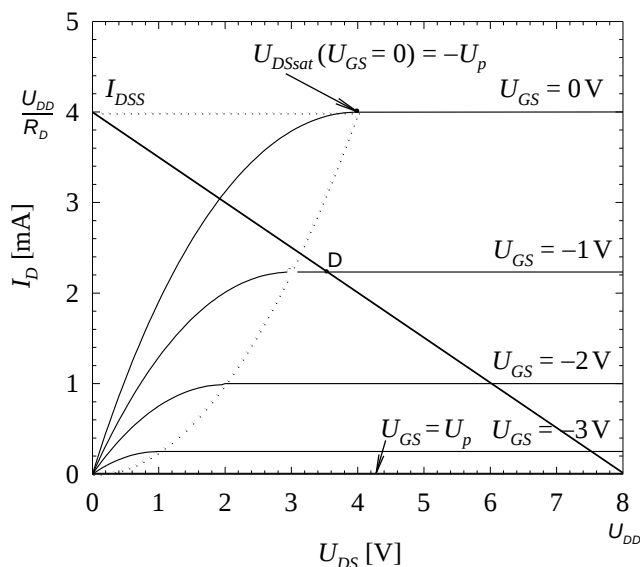
Napetostno ojačenje majhnih signalov lahko izrazimo iz enačbe izhodnega vozlišča nadomestnega vezja:

$$g_m u_{gs} + u_{ds} R_D^{-1} = 0.$$

Dobimo:

$$A_u = \frac{u_{ds}}{u_{gs}} = -g_m R_D = -1,5 \text{ mS} \cdot 2 \text{ k}\Omega = \underline{\underline{-3}}.$$

Negativni predznak pomeni, da ojačevalnik obrača fazo za 180° .



4. Izračunajte ponorski tok I_{DS} MOS-tranzistorja z induciranim n -kanalom s parametri: $\mu_n = 650 \text{ cm}^2 (\text{Vs})^{-1}$, debelina oksidne (SiO_2) plasti $x_{ox} = 20 \text{ nm}$, $W/L = 50$ in pragovno napetostjo $U_T = 0,4 \text{ V}$. Tranzistor deluje v območju nasičenja pri $U_{GS} = 2 \text{ V}$. Kako moramo spremeniti razmerje W/L , da bo pri $U_{GS} = 1 \text{ V}$ tok I_{DS} znašal $100 \mu\text{A}$?

Podatki:

$$\mu_n = 650 \text{ cm}^2 (\text{Vs})^{-1}$$

$$x_{ox} = 20 \text{ nm}$$

$$W/L = 50$$

$$U_T = 0,4 \text{ V}$$

$$U_{GS} = 2 \text{ V}$$

$$U_{GS} = 1 \text{ V}$$

$$I_{DS} = 100 \mu\text{A}$$

$$I_{DS} = ?$$

$$W/L = ?$$

Rešitev:

$$I_{DS} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{rox} W \mu_n}{2 x_{ox} L} (U_{GS} - U_T)^2$$

$$= \frac{8,854 \times 10^{-14} \text{ As(Vcm)}^{-1} \cdot 4 \cdot 50 \cdot 650 \text{ cm}^2 (\text{Vs})^{-1}}{2 \cdot 20 \times 10^{-7} \text{ cm}} (2\text{V} - 0,4\text{V})^2 = \underline{\underline{7,37 \text{ mA}}}$$

$$\frac{W}{L} = \frac{2 x_{ox} I_{DS}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{rox} \mu_n (U_{GS} - U_T)^2}$$

$$= \frac{2 \cdot 20 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot 100 \times 10^{-6} \text{ A}}{8,854 \times 10^{-14} \text{ As(Vcm)}^{-1} \cdot 4 \cdot 650 \text{ cm}^2 \cdot (\text{Vs})^{-1} (1\text{V} - 0,4\text{V})^2} = \underline{\underline{4,83}}$$
