

POLPREVODNIŠKA ELEKTRONIKA
I. kolokvij – primeri rešenih nalog

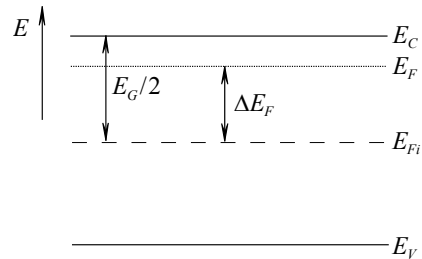
1. Silicij vsebuje akceptorske primesi koncentracije $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Izračunajte koncentracijo donorskih primesi N_D , ki jo moramo dodati, da bo silicij postal tipa n in bo pri sobni temperaturi Fermijeva energija 0,20 eV pod robom prevodnega pasu. ($E_{GSi} = 1,12 \text{ eV}$)

Podatki:

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

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

$$\frac{E_{GSi} = 1,12 \text{ eV}}{N_D = ?}$$



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:

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

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

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

Rešitev:

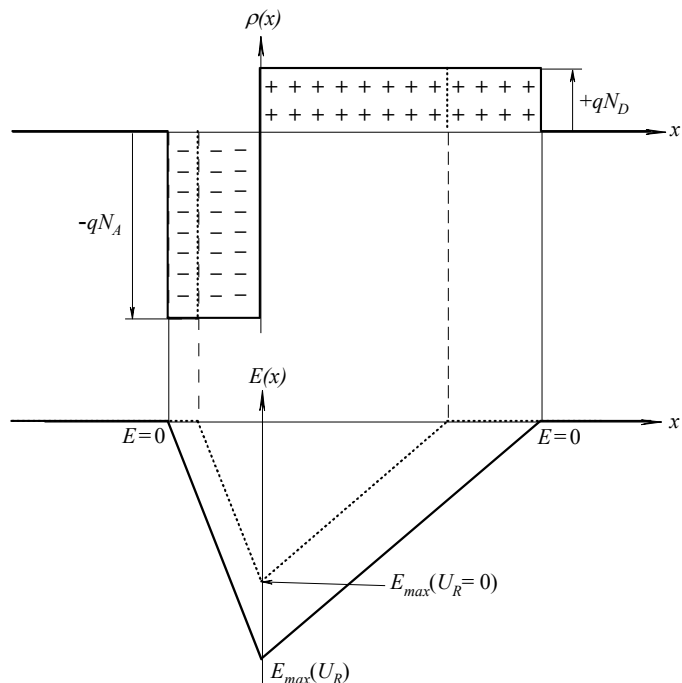
$$J_{pdif} = -qD_p \frac{dp}{dx} = \frac{qD_p}{L_p} 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} e^{-\frac{x}{L_p}} \quad x = 0 \Rightarrow J_{pdif} = \frac{qD_p}{L_p} \cdot 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

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

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:

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

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

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

4. Silicijeva dioda s tokom nasićenja 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 $A = 10^{-4}$ cm². Izračunajte napetost na zunanjih sponkah diode, če skozi diodo teče tok $I = 1$ mA. Kolikšna bo napetost pri toku $I = 10$ mA?

Podatki:

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

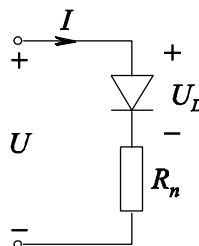
$$l_n = 10^{-2} \text{ cm}, \quad \rho_n = 0,1 \Omega\text{cm}$$

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

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

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

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



Rešitev:

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

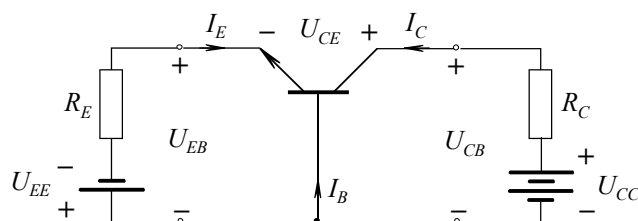
$$R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

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

$$\alpha_F = 0,98$$

$$I_B, I_C, I_E = ?$$

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



Rešitev:

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

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

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

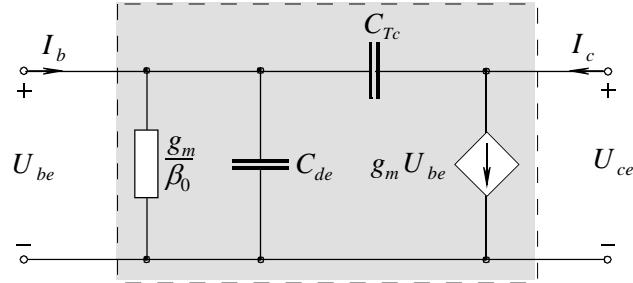
$$I_B = -I_E - I_C = 0,93 \text{ mA} - 0,9114 \text{ mA} = 0,0186 \text{ mA} = \underline{\underline{18,6 \mu\text{A}}}$$

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

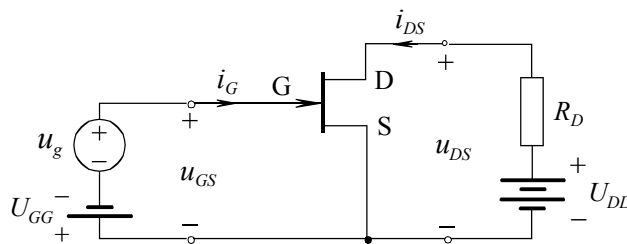
$$|\underline{\beta}(\omega)| = 92,2 > |\underline{\beta}(\omega_\beta)| = \frac{\beta_0}{\sqrt{2}} = 70,7$$

Frekvenca krmilnega signala ω je pod mejno frekvenco ω_β .

3. Spojni FET z n -kanalom v orientaciji s skupnim izvorom ima napetost zadržnitve $U_p = -4$ V in tok ponora $I_{DSS} = 4$ mA. Na vhodu je priključena baterijska napetost $U_{GG} = 1$ V, na izhodu pa $U_{DD} = 8$ V, in sicer prek upornosti $R_D = 2$ k Ω , 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:

$$\begin{aligned}
 U_p &= -4 \text{ V} \\
 I_{DSS} &= 4 \text{ mA} \\
 U_{GG} &= 1 \text{ V} \\
 U_{DD} &= 8 \text{ V} \\
 R_D &= 2 \text{ k}\Omega \\
 g_{ijs} &= ? \\
 A_u &= ?
 \end{aligned}$$



Rešitev:

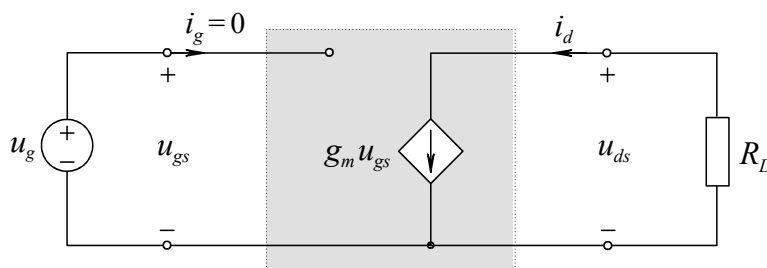
Ker je tok krmilne elektrode $i_G = I_G + i_g$ zanemarljivo majhen, lahko vzamemo, da sta parametra $g_{11s} \cong 0$ in $g_{12s} \cong 0$. Parameter g_{21s} lahko pri majhnih nizkofrekvenčnih signalih določimo z odvodom enačbe ponorskega toka:

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

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.



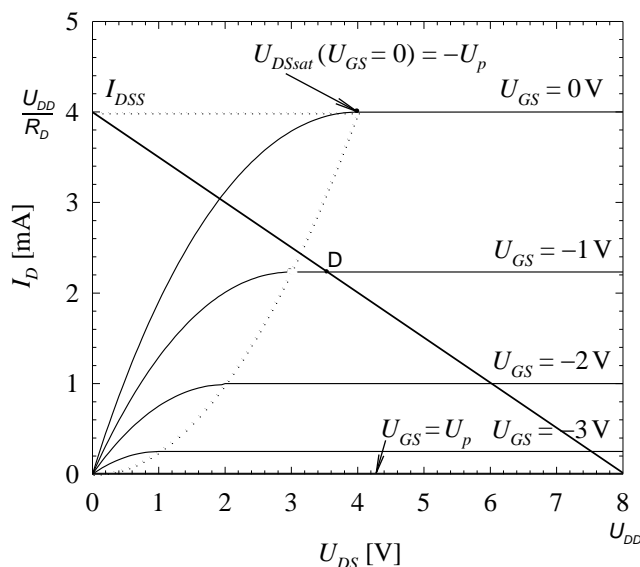
Napetostno ojačenje majhnih signalov lahko izrazimo iz enačbe izhodnega vozlišča nadomestnega vezja:

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

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:

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

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

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

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