

Šolsko leto
Izvajalec

2008 / 2009
Franc Smole

Avtor dokumenta
Skeniranje

UREJANJE DOKUMENTA

VERZIJA 01 REVIZIJA 02
DATUM 5. 4. 2009

ZADNJI POPRAVLJAL
PREGLEDAL

OPOMBE

Gre za nov predmet POLPREVODNIŠKI ELEMENTI.

Obstoječe rešitve (pdf) in kolokvije (gif) smo uredili v obliko primerno za tiskanje (A4). Dodali smo list z formulami, ki ga imamo lahko na kolokvijih (vir.: http://lpvo.fe.uni-lj.si/LSD_student.html).

POPRAVKI

25. 12. 2010 – Zapiski označeni kot zastareli

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

Četveropoli:

$$\begin{aligned} y_{mn} &= g_{mn} + j b_{mn} & z_{mn} &= r_{mn} + j x_{mn} & I_1 &= y_{11} U_1 + y_{12} U_2 & U_1 &= z_{11} I_1 + z_{12} I_2 & U_1 &= h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \\ h_{mn} &= \operatorname{Re}[h_{mn}] + j \operatorname{Im}[h_{mn}] & I_2 &= y_{21} U_1 + y_{22} U_2 & U_2 &= z_{21} I_1 + z_{22} I_2 & I_2 &= h_{21} I_1 + h_{22} U_2 \end{aligned}$$

Polprevodnik:

$$\begin{aligned} n &= N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{E_F - E_{Fi}}{qU_T}} = n_i e^{\frac{V_F - V_{Fi}}{U_T}} & J_n &= q \mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx} & \frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{n - n_0}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x} & \rho &= q(p - n + N_D - N_A) & L &= \sqrt{D \tau} \\ p &= N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} = n_i e^{\frac{E_{Vi} - E_F}{qU_T}} = n_i e^{\frac{V_F - V_{Vi}}{U_T}} & J_p &= q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx} & \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial j_p}{\partial x} & -\frac{d^2 V}{dx^2} &= \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} & \frac{D}{\mu} &= \frac{kT}{q} = U_T \end{aligned}$$

pn dioda:

$$\begin{aligned} I &= A J = A q \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \\ U_D &= V_{Fin} - V_{Fip} = U_T \ln \frac{p_{p0}}{p_{n0}} = U_T \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = U_{Fp} + U_{Fn} = U_T \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{n_i^2} \cong \\ &\cong U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = U_p + U_n = \frac{q}{2\epsilon} (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) \\ x_n &= \sqrt{\frac{2\epsilon N_A (U_D + U_R)}{q N_D (N_A + N_D)}} \\ x_p &= \sqrt{\frac{2\epsilon N_D (U_D + U_R)}{q N_A (N_A + N_D)}} \end{aligned}$$

$$D = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_D + U_R)}$$

Malosignalni model pn diode:

$$\begin{aligned} C_T &= \frac{\epsilon A}{D} \\ N_A &\gg N_D: \\ y &= \frac{I}{U} = \frac{I}{U_T} \sqrt{1 + j\omega\tau_p} = g + jb \\ g|_{NF} &= \frac{I}{U_T} & C_d|_{NF} &= \frac{g|_{NF} \tau_p}{2} \\ g|_{VF} &= g|_{NF} \sqrt{\frac{\omega\tau_p}{2}} & C_d|_{VF} &= \frac{g|_{VF}}{\omega} \end{aligned}$$

Ebers-Molloy model bipolarnega tranzistorja (pnp):

$$\begin{aligned} I_E &= I_F - \alpha_R I_R & I_F &= I_{ES} \left(e^{\frac{U_{EB}}{U_T}} - 1 \right) & I_E &= I_{E0} \left(e^{\frac{U_{EB}}{U_T}} - 1 \right) - \alpha_R I_C \\ I_C &= -\alpha_F I_F + I_R & I_R &= I_{CS} \left(e^{\frac{U_{CB}}{U_T}} - 1 \right) & I_C &= -\alpha_F I_E + I_{C0} \left(e^{\frac{U_{CB}}{U_T}} - 1 \right) \\ I_{E0} &= I_{ES} (1 - \alpha_F \alpha_R) & I_{C0} &= I_{CS} (1 - \alpha_F \alpha_R) & \alpha_F I_{ES} &= \alpha_R I_{CS} \end{aligned}$$

Malosignalni model bipolarnega tranzistorja:

$$\begin{aligned} g_m &= \alpha_0 g_e = \frac{I_C}{U_T} & g_e &= \frac{I_E}{U_T} & r_{be} &= \frac{\beta}{g_m} \\ A_i|_{U_{CB}=0} &= -\frac{I_C}{I_E}|_{U_{CB}=0} = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_a}} = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{jf}{f_a}} = \underline{\alpha}(f) \end{aligned}$$

Spojini FET (n kanal):

$$\begin{aligned} I_{DS} &= I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 & U_P &= U_D - \frac{q N_D D^2}{8\epsilon} \\ U_{DSSat} &= U_{GS} - U_P \end{aligned}$$

MOS tranzistor (n kanal):

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{C_0 W \mu_n}{L} \left[(U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \\ I_{DS} &= \frac{C_0 W \mu_n}{2L} U_T^2 \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_T} \right)^2 & U_{DSSat} &= U_{GS} - U_T \end{aligned}$$

Štirislojna dioda:

$$I = \frac{M I_{C0}}{1 - M \alpha_1 - M \alpha_2}$$

Tiristor:

$$I = \frac{M I_{C0} + M \alpha_2 I_G}{1 - M \alpha_1 - M \alpha_2}$$

Fotodioda:

$$I = -I_S \left(e^{-\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) + I_L$$

Fototranzistor:

$$-I_C = -I_B \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} + \frac{I_{C0} + I_L}{1 - \alpha_F}$$

Tabela fizikalnih konstant

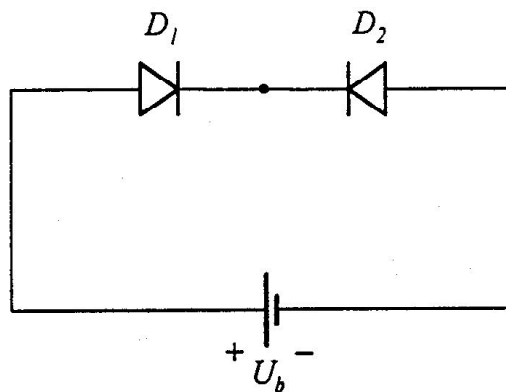
Boltzmannova konstanta	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
absolutna vrednost naboja elektrona	$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$
Planckova konstanta	$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$
masa elektrona	$m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
termična napetost	$U_T = kT/q = 25.66 \text{ mV} (T = 297.8 \text{ K} = 24.8 \text{ }^\circ\text{C})$
intrinzična koncentracija (Si)	$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3} (T = 297.8 \text{ K} = 24.8 \text{ }^\circ\text{C})$
dielektrična konstanta	$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)} = 8.854 \cdot 10^{-14} \text{ As/(Vcm)}$
relativna dielektrična konstanta Si	$\epsilon_r(\text{Si}) = 11.7 \approx 12$
relativna dielektrična konstanta SiO ₂	$\epsilon_r(\text{SiO}_2) = 3.85 \approx 4$

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij

24. 4. 1998

1. Izračunajte diferencialno prevodnost g polprevodniške pn diode za majhne signale nizkih frekvenc, če sta znana tok nasičenja diode $I_S = 1 \text{ pA}$ in napetost na diodi $U = 615 \text{ mV}$. Princip linearizacije prikažite s sliko $I(U)$ karakteristike.
2. Izračunajte difuzijsko napetost U_D , širino osiromašenega področja D in električno poljsko jakost E_{max} idealnega stopničastega pn spoja, ki ima v p plasti $N_A = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in v n plasti $N_D = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Izračun dopolnite s skico krajevnih odvisnosti potencialnih nivojev, prostorskega naboja in električnega polja znotraj strukture.
3. Diodi D_1 in D_2 sta antiserijsko povezani in priključeni na baterijsko napetost $U_b = 4,5 \text{ V}$. Izračunajte napetosti na diodah, če je tok nasičenja diode D_1 šestkrat manjši od toka nasičenja diode D_2 . Pri izračunu si pomagajte s skico, na kateri vrišite karakteristiki obeh diod in označite njuni delovni točki.



4. Izračunajte pri kateri temperaturi okolice bo temperatura pn spoja dosegla maksimalno dopustno temperaturo $T_{jmax} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, če je termična upornost med spojem in ohišjem $R_{thjc} = 4 \text{ }^\circ\text{C/W}$ in je dioda pritrjena na hladilno telo s površino $A = 25 \text{ cm}^2$ in s specifično konstanto toplotne izmenjave $\sigma = 2.5 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{ }^\circ\text{Ccm}^2)$. Skozi diodo teče tok $I = 3 \text{ A}$, njen tok nasičenja pa je $I_S = 1.6 \times 10^{-11} \text{ A}$.

Pišete 60 minut, dovoljena je uporaba lista z osnovnimi enačbami in konstantami.

Rezultati bodo objavljeni najpozneje v ponedeljek 4. 5. na oglasni deski v III. nadstropju.

1. KOL.

24. 4. 1998

①

$g = ? \rightarrow N_F \rightarrow$ min. izg.
pn-diode

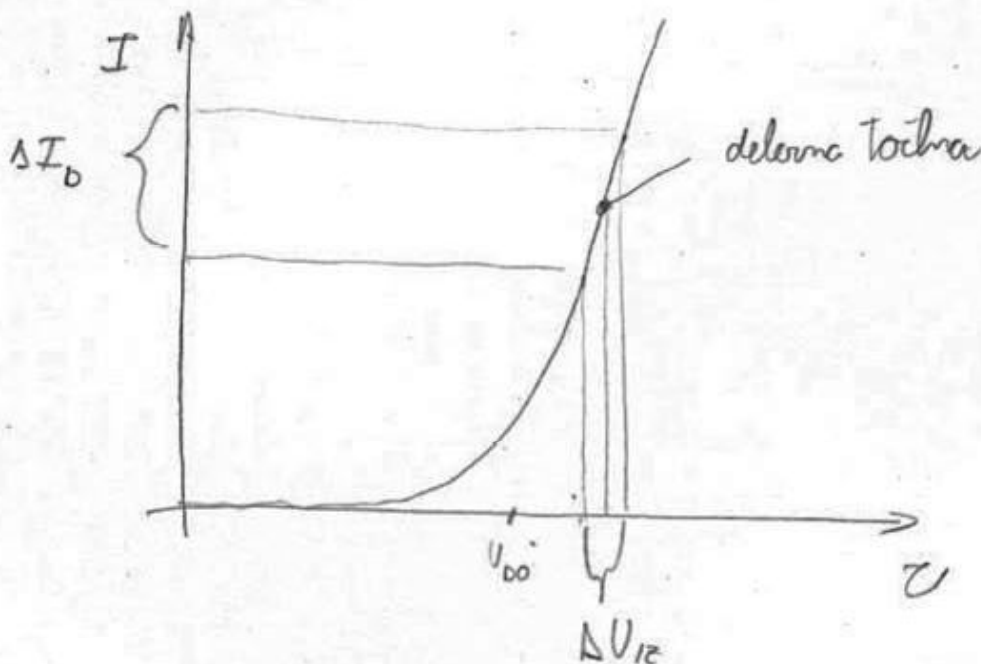
$$I_s = 1 \text{ pA}$$

$$U = 615 \text{ mV}$$

linearnizacija priklari z $I(U)$ kar.

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) = 1 \text{ pA} \left(e^{\frac{615 \text{ mV}}{25,66 \text{ mV}}} - 1 \right) = 25,63 \text{ mA}$$

$$g_{mF} = \frac{I}{U_T} = \frac{25,63 \text{ mA}}{25,66 \text{ mV}} = \underline{\underline{0,998 \text{ S}}}$$



2.

1. kolekvij 1998

$V_D = 2 \checkmark$
 $D = 2 \checkmark$

$E_{max} = 2$

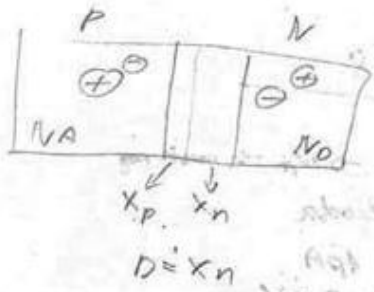
pm spoj - idealni

p-plast

$N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

n-plast

$N_D = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$



šmca krajnjih odmernosti pater.
 prostorski malaj
 E max kraj Struktore

$$V_D = V_T \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = 25,66 \text{ mV} \ln \frac{5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}{10^{20} \text{ cm}^{-6}} = 709,01 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

$V_D = 709 \text{ mV}$

$$D = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_D)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \text{ As}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}} \right) \cdot 709 \text{ mV}} =$$

$D = 210 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$

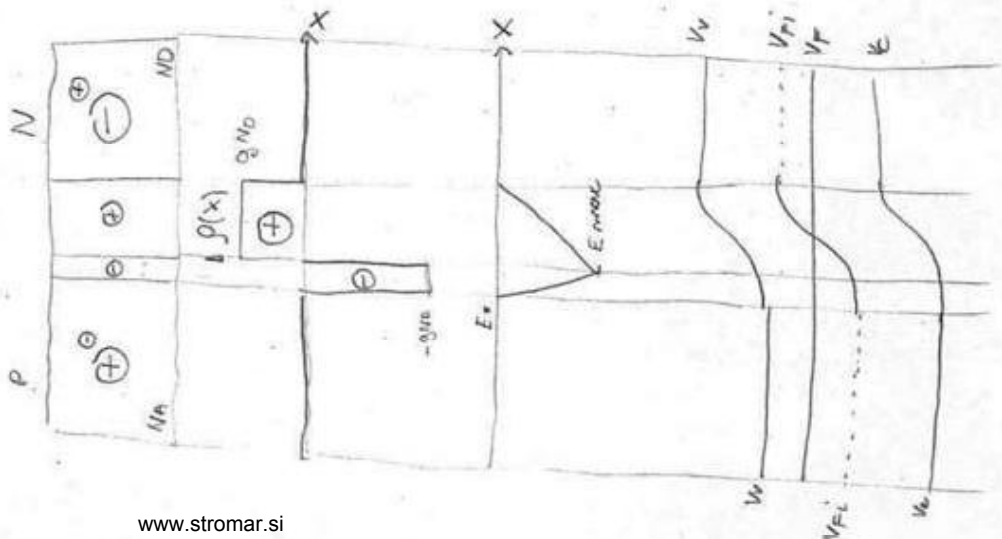
$\rho = q \cdot (p - n + N_D - N_A) \Rightarrow q \cdot N_A$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow E = - \int_0^{x_n} \frac{\rho}{\epsilon} dx = - \frac{q \cdot N_A}{\epsilon} x_n$$

$$E = - \frac{q \cdot N_A \cdot x_n}{\epsilon} = - \frac{q \cdot N_A \cdot D}{\epsilon \cdot \epsilon_r} = - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot 210 \cdot 10^{-6} \text{ cm}}{10 \cdot 10^{-12} \text{ As}}$$

$D = x_n$

$= -168 \text{ kV/cm} = -16,8 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$



3

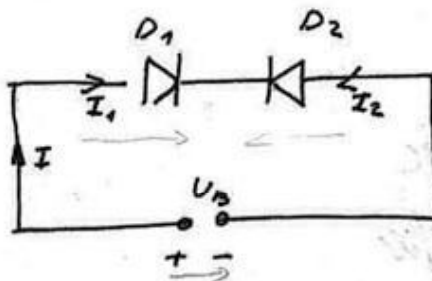
1. kolokvij 1998

$$U_B = 1,5V$$

$$U_{D1}, U_{D2} = ?$$

$$I_{S1} = 6 I_{S2}$$

pomagaj si zbirco



$$I_1 = -I_2$$

$$U_D + U_2 - U_1 = \phi$$

$$I_1 = I_{S1} \left(e^{+\frac{U_1}{U_T}} - 1 \right) = 6 I_{S2} \left(e^{\frac{U_1}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_2 = I_{S2} \left(e^{+\frac{U_2}{U_T}} - 1 \right) = I_{S2} \left(e^{\frac{U_2}{U_T}} - 1 \right)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 6 \frac{\left(e^{\frac{U_1}{U_T}} - 1 \right)}{\left(e^{\frac{U_2}{U_T}} - 1 \right)} = -1$$

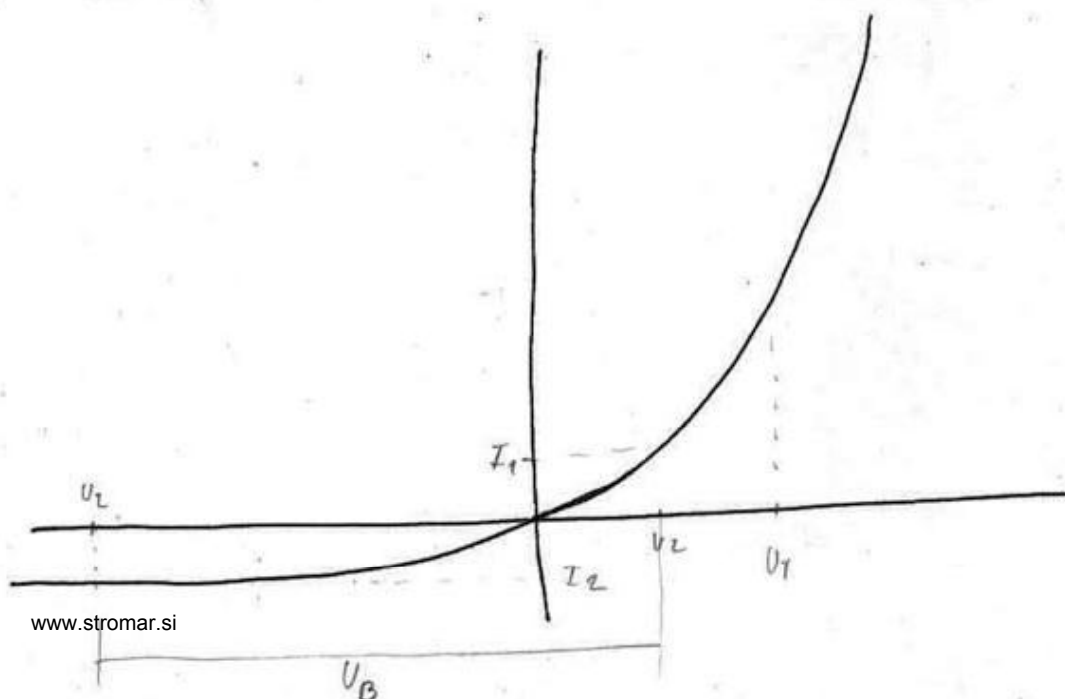
$\Rightarrow \phi$

$$-1 = 6 \left(e^{\frac{U_1}{U_T}} - 1 \right) / -1 \quad / \cdot (-1)$$

$$\frac{7}{6} = e^{\frac{U_1}{U_T}} \rightarrow U_1 = U_T \ln \frac{7}{6} = \underline{\underline{3,95 \cdot 10^{-3} V}}$$

$$U_2 = U_B - U_1 = \underline{\underline{4,496 V}}$$

SKICA



4.

$$T_A = ?$$

$$T_j = \text{max} = 150^\circ\text{C}$$

$$R_{THJC} = 4^\circ\text{C/W}$$

$$A = 25\text{cm}^2$$

$$\sigma = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C cm}^2$$

$$I = 3\text{A}$$

$$I_s = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ A}$$



$$I = I_s \cdot (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \Rightarrow U$$

$$\frac{I}{I_s} - 1 = e^{\frac{U}{U_T}}$$

$$U = U_T \ln \left(\frac{I}{I_s} - 1 \right) =$$

$$= 25,68 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{3\text{A}}{1,6 \cdot 10^{-14} \text{ A}} - 1 \right)$$

$$= 660,05 \text{ mV}$$

$$P = U \cdot I = 1,938 \text{ W}$$

$$\Delta T = T_j - T_A = P \cdot (R_{THJC} + R_{THCA}) =$$

$$R_{THCA} = \frac{1}{\sigma \cdot A} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C cm}^2 \cdot 25 \text{ cm}^2} = 16^\circ\text{C/W}$$

$$T_A = T_j - P \cdot (R_{THJC} + R_{THCA}) = 150^\circ\text{C} - 1,938 \text{ W} (20^\circ\text{C/W}) = \underline{\underline{110^\circ\text{C}}}$$

✓

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij
(22. 4. 1999)

1. Določite napetostno ojačenje nelinearnega četveropolnega elementa, ki deluje kot ojačevalnik majhnih harmoničnih signalov. Znani so prevodnostni parametri elementa ($g_{11} = 2 \text{ mS}$, $g_{12} \cong 0 \text{ S}$, $g_{21} = 25 \text{ mS}$ in $g_{22} = 0.1 \text{ mS}$) in na izhodu priključeno breme $R_b = 2.5 \text{ k}\Omega$.
2. Če na silicijevo pn diodo priključimo napetost $U = 1 \text{ V}$, teče skozi tok $I = 250 \text{ mA}$. Dioda ima stopničasti pn spoj z $N_A = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ v p -plasti in $N_D = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ v n -plasti; ostali podatki pa so naslednji: $L_n = 14 \text{ }\mu\text{m}$, $L_p = 35 \text{ }\mu\text{m}$, $D_n = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p = 12.5 \text{ cm}^2/\text{s}$, serijaska upornost od zunanjih priključkov do zaporne plasti pa znaša $1.2 \text{ }\Omega$. Kolikšna je površina te diode? Narišite še sliko tokovih gostot skozi strukturo.
3. Pri zaporni napetosti $U_R = 6 \text{ V}$ znaša spojna kapacitivnost diode $C_T = 8 \text{ pF}$. Kolikšna je spojna kapacitivnost diode v termičnem ravnovesju in kolikšna je koncentracija akceptorskih primesi v p -plasti nesimetričnega ($N_D \gg N_A$) stopničastega pn spoja, če ima dioda površino $A = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ in difuzijsko napetost $U_D = 0.75 \text{ V}$?
4. Prebojna (Zenerjeva) dioda z $U_Z = 5.6 \text{ V}$ je priključena na nestabilizirani napetostni vir preko upora $R = 285 \text{ }\Omega$. Kolikšno diferencialno nadomestno upornost r_Z mora imeti prebojna dioda, da bodo spremembe napetosti na diodi zaradi variacij vhodne napetosti med 7 in 9 V manjše od 100 mV ? Princip delovanja prebojne diode kot stabilizatorja napetosti pojasnite s skico (karakteristiko in uporovno premico).

Pišete 60 minut, dovoljena je uporaba lista z osnovnimi enačbami in konstantami. Rezultati bodo objavljeni v sredo 28. 4. na oglasni deski v III. nadstropju.

1. KOL.

22. 9. 1999

1. $A_v = ?$

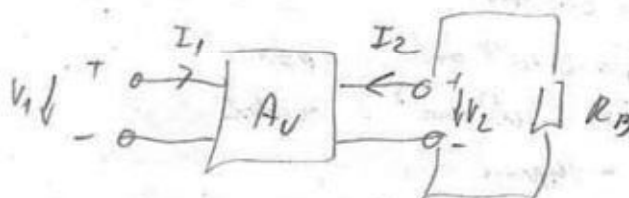
$$g_{11} = 2 \text{ mS}$$

$$g_{12} = 0 \text{ S}$$

$$g_{21} = 25 \text{ mS}$$

$$g_{22} = 0,1 \text{ mS}$$

$$R_B = 2,5 \text{ k}\Omega$$



$$A_v = \frac{U_2}{U_1}$$

$$I_2 = - \frac{U_2}{R_B}$$

$$I_1 = g_{11} U_1 + g_{12} U_2$$

$$I_2 = g_{21} U_1 + g_{22} U_2$$

$$I_1 = g_{11} U_1$$

$$I_2 = g_{21} U_1 + g_{22} U_2$$

$$\frac{-U_2}{R_B} = g_{21} U_1 + g_{22} U_2$$

$$U_2 \left(g_{22} + \frac{1}{R_B} \right) = g_{21} U_1$$

$$A_v = \frac{U_2}{U_1} = \frac{g_{21}}{g_{22} + \frac{1}{R_B}} = \frac{25 \text{ mS}}{0,1 \text{ mS} + \frac{1}{2,5 \text{ k}\Omega}} = \underline{\underline{50}}$$

2.

pn - dioda

 $U = 1V$ $I = 250mA$ $N_A = 2 \cdot 10^{18} cm^{-3}$

p-don

 $N_D = 3 \cdot 10^{17} cm^{-3}$

n-plot

 $L_n = 14\mu m = 0,000014 m = 0,0014 cm$ $L_p = 35\mu m = 0,000035 m = 0,0035 cm$ $D_n = 20 cm^2/s$ $D_p = 12,5 cm^2/s$ $r = 1,2\Omega$ $A = ?$

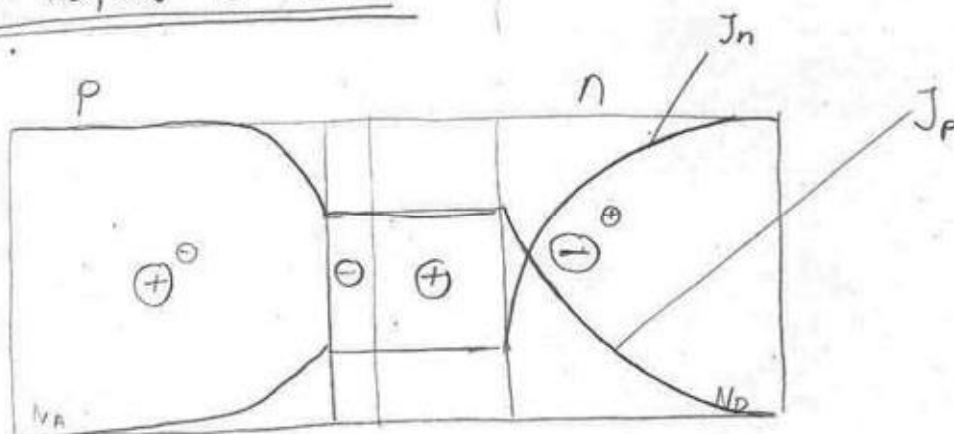
Najna tabelirani podatki shemi struktura

$$I = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \Rightarrow A = ?$$

$$A = \frac{I}{q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)}$$

$$= \frac{250 mA}{1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 10^{20} cm^{-3} \left(\frac{12,5 cm^2/s}{3,5 \cdot 10^{-3} cm \cdot 3 \cdot 10^{17}} + \frac{20,0 cm^2/s}{8,4 \cdot 10^{-3} cm \cdot 2 \cdot 10^{18}} \right) \left(e^{\frac{1V}{25,00 mV}} - 1 \right)}$$

$$= 15,59 \cdot 10^{-9} cm^2$$



1999

3.

$$U_R = 6V$$

$$C_T = 8pF$$

$$C_T = ? \text{ pri } V \text{ - lemičnem ravnanju}$$

$$\text{izračunaj } N_A \text{ in } p \text{ plošč } N_D \gg N_A$$

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

$$U_D = 0,75V$$

$$C_T = \frac{\epsilon A}{D} \Rightarrow D = \frac{\epsilon A}{C_T} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_D + U_R)} \Rightarrow N_A$$

$$\left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{C_T} \right)^2 = \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r (U_D + U_R)}{q N_A}$$

$$N_A = \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r (U_D + U_R) C_T^2}{q \epsilon_0 \epsilon_r^2 A^2} = \frac{2 (U_D + U_R) C_T^2}{q \epsilon_0 \epsilon_r A^2} =$$

$$= \frac{2 \cdot (6 + 0,75) V \cdot (8 \cdot 10^{-12})^2 (As)^2 V_{cm}}{1,6 \cdot 10^{-19} As \cdot 10^{-12} As \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 cm^2} = \underline{\underline{1,35 \cdot 10^{15} cm^{-3}}}$$

$$C_T = \frac{\epsilon A}{D} = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{\sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_r U_D}{2 N_A}}} = \sqrt{\frac{(\epsilon_r \epsilon_0)^2 A^2 q N_A}{2 \epsilon_0 \epsilon_r U_D}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A^2 q N_A}{2 U_D}} =$$

$$= \sqrt{\frac{10^{-12} As \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 cm^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} As \cdot 1,35 \cdot 10^{15}}{V_{cm} cm^3 \cdot 2 \cdot 0,75 V}} = \underline{\underline{23 pF}}$$

glej na lab roje - krajši poteh

4.

$$U_Z = 5,1 \text{ V}$$

$$R = 285 \Omega$$

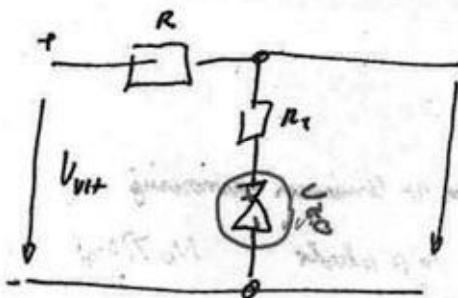
$$r_Z = ?$$

$$U_{VH \text{ min}} = 7$$

$$U_{VH \text{ max}} = 9 \text{ V}$$

$$\Delta U_{VZ} = 100 \text{ mV}$$

Nacrt

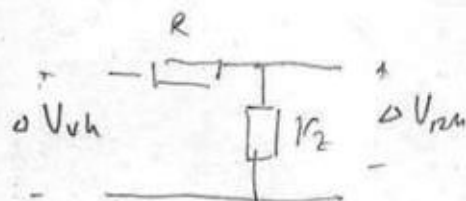


$$U_{VH \text{ min}} = I_{Z \text{ min}} (R + r_Z) + U_Z$$

$$U_{VH \text{ max}} = I_{Z \text{ max}} (R + r_Z) + U_Z$$

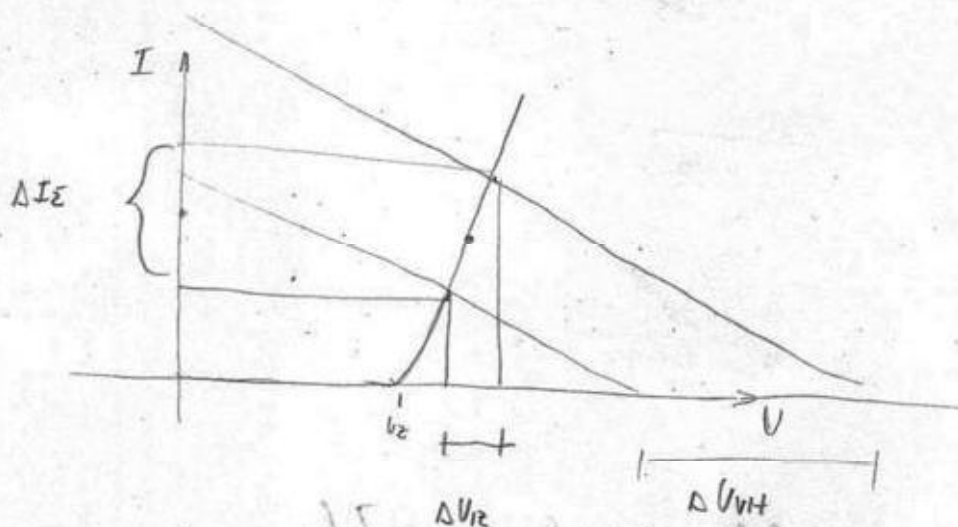
$$r_Z = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{\Delta U_{VZ}}{\Delta I_Z} = \frac{\Delta U_{VZ} \cdot R}{\Delta U_{VH} - \Delta U_{VZ}} =$$

$$\Delta I_Z = \frac{\Delta U_{VH} - \Delta U_{VZ}}{R}$$



$$\Delta U_{VH} = \frac{r_Z}{R + r_Z} \Delta U_{VZ}$$

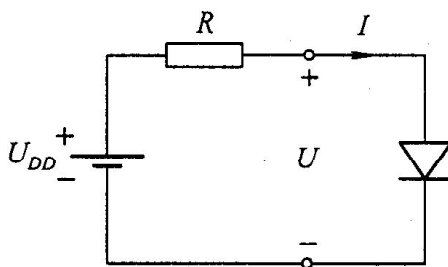
$$r_Z = \frac{\Delta U_{VZ} \cdot R}{\Delta U_{VH} - \Delta U_{VZ}} = \frac{100 \text{ mV} \cdot 285 \Omega}{3 \text{ V} - 100 \text{ mV}} = \underline{\underline{9,827 \Omega}}$$



OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij
(20. 4. 2000)

1. V silicijevem vzorcu dolžine $l = 100 \mu\text{m}$ koncentracija donorskih primesi eksponentno narašča ($N_D(x) = N_{D0} \times \exp(x/L)$, $N_{D0} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $L = 10 \mu\text{m}$). Izračunajte vgrajeno električno polje v sredini vzorca v termičnem ravnovesju.
2. Stopničasta silicijeva pn dioda z difuzijsko napetostjo $U_D = 0.7 \text{ V}$ ima v p -plasti 10^{16} cm^{-3} dodanih akceptorskih primesi. Kolikšna je koncentracija vrzeli v n -plasti na robu osiromašenega področja, če je na diodo priključena prevodna napetost $U = 0.5 \text{ V}$? Razmere v diodi ponazorite s skico krajevnih odvisnosti potencialnih nivojev in koncentracij prostih nosilcev naboja.
3. Izračunajte, za koliko moramo povečati baterijsko napetost U_{DD} , da se bo tok skozi diodo povečal z $1 \mu\text{A}$ na 5 mA . Tok nasičenja diode je $I_S = 10^{-15} \text{ A}$, serijska upornost med diodo in baterijo pa $R = 156 \Omega$.



4. Določite nadomestno vezje diode s stopničastim pn -spojem pri krmiljenju z majhnimi signali, če je v delovni točki na diodi napetost $U = 0.6 \text{ V}$, frekvenca majhnih signalov je $f = 5 \text{ kHz}$, ostali podatki diode pa so $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $L_p = 5 \mu\text{m}$, $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ in površina spoja $A = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$.

Pišete 60 minut, dovoljena je uporaba lista z osnovnimi enačbami in konstantami. Rezultati bodo objavljeni v torek 25. 4. na oglasni deski v III. nadstropju.

1. KOL

20.4.2000

1.

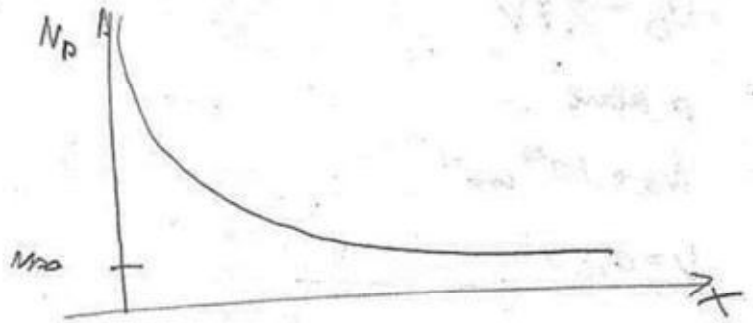
$$L = 100 \mu\text{m}$$

$$N_D = N_{D0} e^{\frac{x}{L}} \Rightarrow n\text{-tip}$$

$$N_{D0} = 10^{17} \text{cm}^{-3}$$

$$L = 10 \mu\text{m}$$

$$E = ? \quad x = L/2$$



$$n \approx N_D$$

$$n \approx N_D = n_i e^{\frac{V_{Fi} - V_F}{V_T}}$$

$$V_{Fi} - V_F = V_T \ln \frac{N_D(x)}{n_i} = V_T \ln \frac{N_{D0} e^{\frac{x}{L}}}{n_i} =$$

$$\Delta V = V_T \ln \frac{N_{D0}}{n_i} + \frac{x}{L}$$

$$-\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{dE}{dx}$$

$$E = -\frac{dV}{dx} = -\frac{V_T}{L} = -\frac{25,66 \text{ mV}}{10 \mu\text{m}} = \underline{\underline{-2,566 \cdot 10^3 \text{ V/m}}}$$

polje E je po celini veseno konstantno

ker x ΔV lin. spreminja (odhod lin. premice je konst.)

(2.)

pn - dioda

$$U_D = 0,7 \text{ V}$$

p plast

$$N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow N_A \gg P_{p0}$$

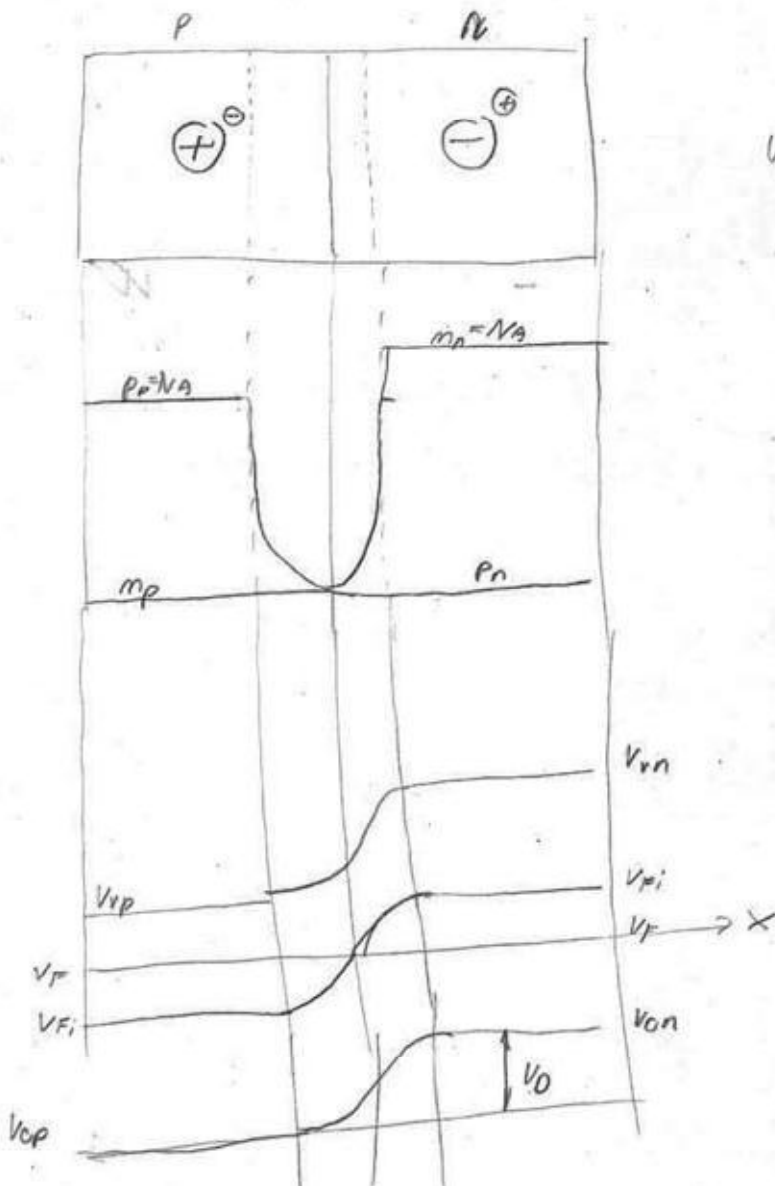
$$U = 0,5 \text{ V}$$

$$m_{pn} = 2$$

$$U_D = U_T \ln \frac{P_{p0}}{P_{n0}} \Rightarrow P_{n0} = P_{p0} \cdot e^{\frac{U_D}{U_T} - 10^{16}} \cdot e^{\frac{0,7 \text{ V}}{25,66 \text{ mV}}} = 7,038 \cdot 10^{27}$$

$$p_n = p_{n0} \cdot e^{\frac{U}{U_T}}$$

$$p_n = P_{n0} \cdot e^{\frac{U}{U_T}} = 7,038 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-3} \cdot e^{\frac{0,5 \text{ V}}{25,66 \text{ mV}}} = \underline{\underline{2,04 \cdot 10^{36}}}$$



$$U_D = U_T \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

$$N_D = \frac{n_i^2}{N_A} \cdot e^{\frac{U_D}{U_T}} = 6,92 \cdot 10^{27}$$

3.

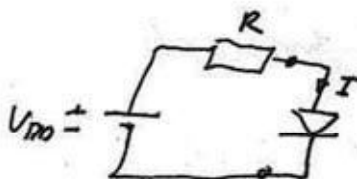
$$V_{DD} = ?$$

$$I_{D1} = 1 \mu A$$

$$I_{D2} = 5 \text{ mA}$$

$$I_s = 10^{-15} A$$

$$R = 156 \Omega$$



2000

✓

$$I_1 = I_s \left(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_1 = V_T \ln \left(\frac{I_1}{I_s} + 1 \right) = 25,66 \text{ mV} \ln \left(\frac{1 \mu A}{10^{-15} A} + 1 \right) = 0,531 \text{ V}$$

$$I_2 = I_s \left(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_2 = V_T \ln \left(\frac{I_2}{I_s} + 1 \right) = 25,66 \text{ mV} \ln \left(\frac{5 \text{ mA}}{10^{-15} A} + 1 \right) = 0,750 \text{ V}$$

$$V_{DD1} = I \cdot R + V_1 = 0,531 \text{ V} + 1 \mu A \cdot 156 \Omega = 0,531$$

$$V_{DD2} = I \cdot R + V_2 = 0,750 \text{ V} + 5 \text{ mA} \cdot 156 \Omega = 1,53 \text{ V}$$

$$\Delta V_{DD} = 0,998 \text{ V}$$

41

madonestno rešje na majhne signale

$$U = 0,6V$$

delovni točki → prevara smer

$$f = 5kHz$$

$$N_A = 10^{18} cm^{-3} \quad N_D = 10^{14} cm^{-3} \quad L_p = 5\mu m \quad D_p = 10 cm^2/s \quad A = 4 \cdot 10^{-4} cm^2$$

$$g = \frac{\partial I}{\partial U} = \frac{I_s}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} = \frac{I_s}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}}$$

$$I = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_D} \right) \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_s = A q n_i^2 \frac{D_p}{L_p \cdot N_D} = 4 \cdot 10^{-4} cm^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} A \cdot (10^{10} cm^{-3})^2 \cdot \frac{10 cm^2/s}{0,5 \cdot 10^{-3} cm \cdot 10^{14}} =$$

$$5\mu m = 0,000005 m$$

$$0,0005 cm$$

$$I_s = 128 pA$$

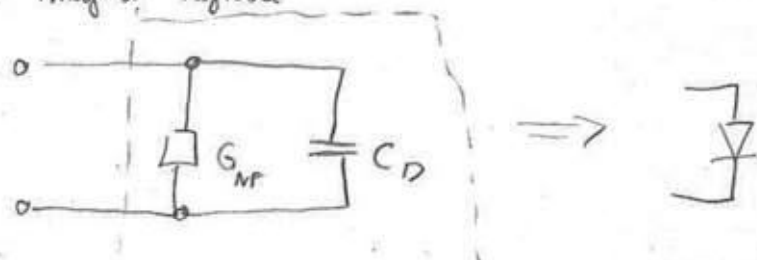
$$g = \frac{128 pA}{25,66 mV} \cdot e^{\frac{0,6 V}{25,66 \cdot 10^{-3} V}} = 71,27 S$$

$$W_{TP} \leq 1 \Rightarrow NF \checkmark$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} = \frac{(5\mu m)^2}{10 cm^2/s} = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3} cm)^2}{10 cm^2/s} = 25 ns$$

$$C_D|_{NF} = \frac{g_{NF} \cdot \tau_p}{2} = \frac{71,27 S \cdot 25 ns}{2 V} = 890,87 mF$$

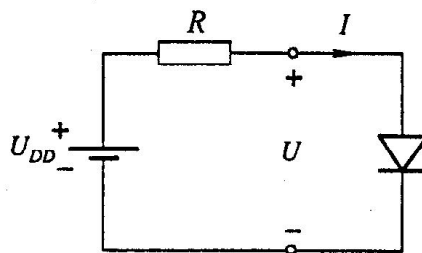
na majhne signale



OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij
(19. 4. 2001)

1. Za koliko in na kolikšni razdalji se ob idealnem stopničastem pn spoju v termičnem ravnovesju ukrivijo potencialni nivoji, če je koncentracija dodanih primesi v p -plasti $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in v n -plasti $N_D = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$? Izračun dopolnite s skico krajevne odvisnosti potencialnih nivojev.
2. Silicijeva dioda ima stopničasti pn -spoj s podatki: $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, površina $A = 10^{-3} \text{ cm}^2$, vrzeli v n -plasti imajo difuzijsko konstanto $D_p = 12,5 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ in življenjski čas $\tau_p = 2 \mu\text{s}$. Določite nadomestni vezji diode za majhne harmonične signale s frekvenco $f = 5 \text{ kHz}$, in sicer za enosmerni napetosti $+0.7 \text{ V}$ in -10 V . ($L_p^2 = D_p \tau_p$)
3. Izračunajte, za koliko se spremeni napetost U na diodi, če se vhodna napetost U_{DD} poveča s 5 V na 6 V . Karakteristika polprevodniške diode je dana z dvema aproksimiranima linearnima segmentoma, in sicer: $I = 0$ za $U \leq U_0$ in $I = (U - U_0)/r_D$ za $U \geq U_0$. Napetost $U_0 = 0.7 \text{ V}$ in $r_D = 12 \Omega$, serijska upornost R pa znaša $1 \text{ k}\Omega$. Rešitev prikažite tudi grafično!



Pišete 60 minut, dovoljena je uporaba lista z osnovnimi enačbami in konstantami. Rezultati bodo objavljeni v ponedeljek, 23. 4., na oglasni deski v III. nadstropju.

1. KOL. 19. 4. 2001

N_A	N_D
VER	EER
P	N
V	

GEISEL
PRIVATHOTELS
SEIT 1990

HOTEL KÖNIGSH

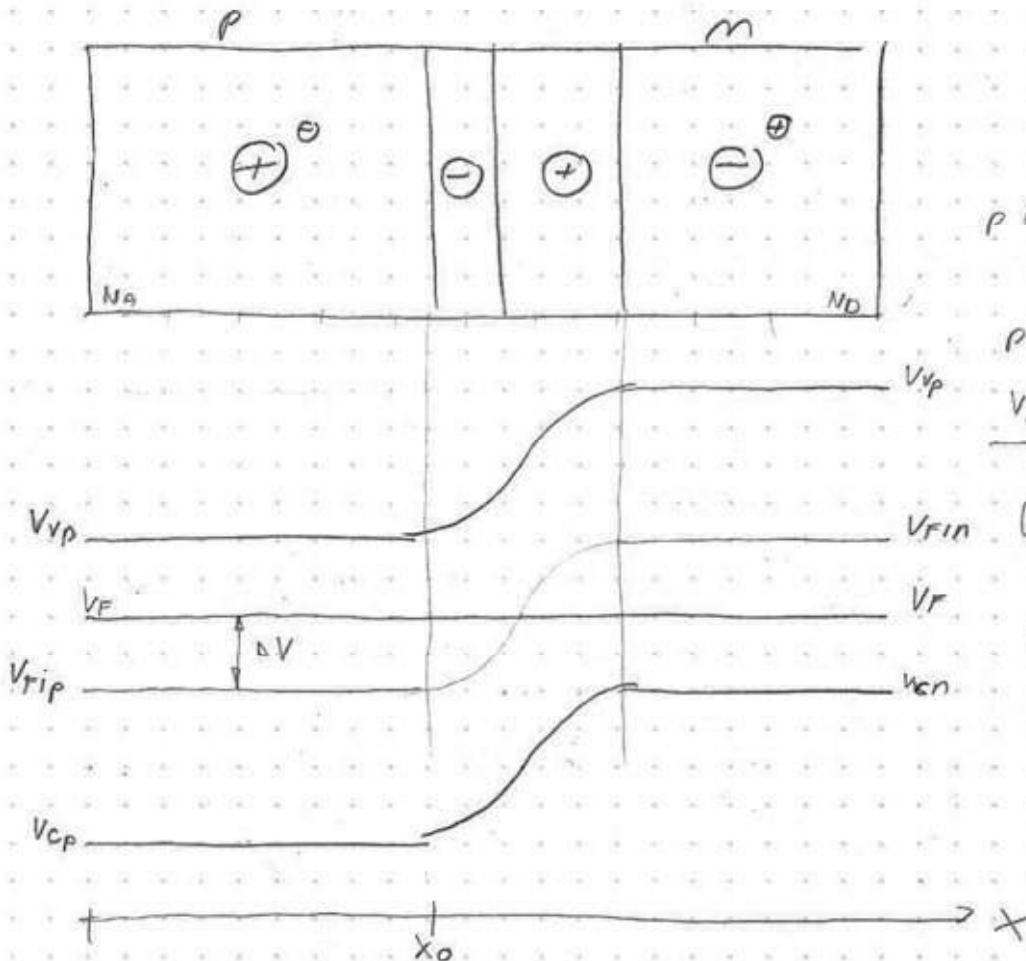
HOTEL EXCELSIC

anna hotel

COSMOPOLITAN HOT
EL

P plast $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
n plast $N_D = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

D = ? pri balenem se ulovljeno paten nivojsi



$$p \approx n \Rightarrow N_A \approx N_D \Rightarrow N_A = p$$

$$p = N_A = n_i e^{\frac{V_F - V_{Fi}}{V_T}}$$

$$V_F - V_{Fi} = V_T \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$V_D = V_T \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = 0,678,118 \text{ mV}$$

$$D = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_D)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \text{ As cm}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \left(\frac{1}{10^{17} \text{ cm}^{-3}} + \frac{1}{3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}} \right) 0,678 \text{ mV}} = 168,32 \mu\text{m}$$

$$\Delta V_p = V_F - V_{FIN} = V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 25,66 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{17}}{10^{10}} = 0,413 \text{ V}$$

$$\Delta V_n = V_{FIN} - V_F = V_T \ln \frac{N_D}{n_i} = 25,66 \text{ mV} \cdot \ln \frac{3 \cdot 10^{14}}{10^{10}} = 0,264 \text{ V}$$

$$\Delta V_p + \Delta V_n = 0,677 \text{ V} = V_D$$

2.

np pn spoj

$$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D = 7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

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

$$D_p = 12,5 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\tau_p = 2 \text{ ns}$$

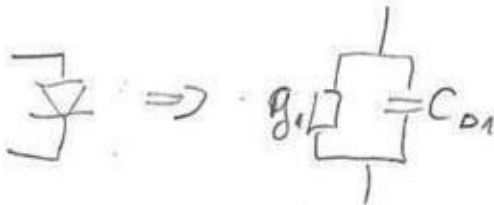
$$g, C = ?$$

$$f = 5 \text{ kHz}$$

$$a) U = 0,7 \text{ V}$$

$$b) U = 10,1 \text{ V}$$

a)



$$g_1 = \frac{I_1}{U_T} = \underline{\underline{1,567 \text{ S}}}$$

$$C_{D1} = \frac{G_{NF} \cdot \tau_p}{2} = \underline{\underline{1,567 \text{ pF}}}$$

$$W \cdot \tau_p \ll 1 \Rightarrow \text{NF}$$

$$2\pi \cdot f \cdot \tau_p \ll 1 \checkmark$$

$$b) g_2 = \phi$$

$$C_T = \frac{A \epsilon_0 \epsilon_r}{D} = \sqrt{\frac{A^2 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 q N_D \epsilon_0 \epsilon_r}{28 (V_D + V_R)}} =$$

$$V_D = V_T \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = 25,66 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{18} \cdot 7 \cdot 10^{14}}{10^{20}} = 0,758 \text{ V}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{(10^{-3})^2 \text{ cm}^4 \cdot 10^{-12} \text{ As} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}{V_{D1} \text{ cm}^2 \cdot 2 \cdot (0,758 + 10) \text{ V}}} = \underline{\underline{2,28 \text{ pF}}}$$

3.

$$\Delta V_o$$

$$V_{DD} \ 5 \rightarrow 6V$$

$$I = \phi \text{ za } V < V_o$$

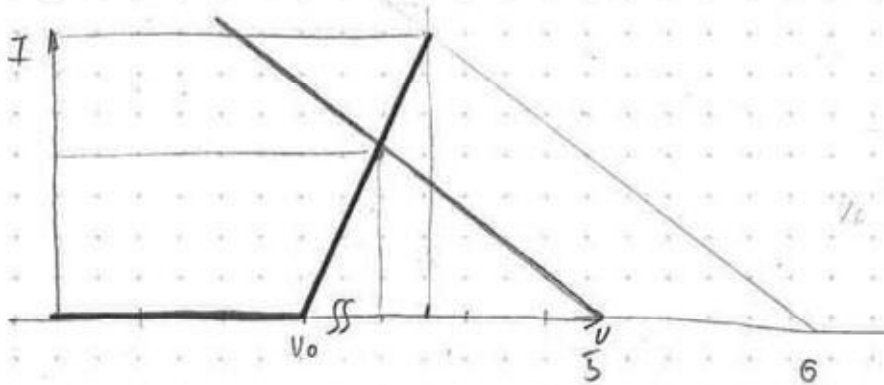
$$I = (V - V_o) / r_d \text{ za } V > V_o$$

$$V_o = 0,7V$$

$$r_d = 12,2\Omega$$

$$R = 1k\Omega$$

grafikon + računski rešen



$$\Delta V_{VH} = 1V$$

$$\Delta V_{VZ} = 2$$

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{\Delta V_{VZ}}{\Delta I_D}$$

$$\Delta V_{VZ} = r_d \cdot \Delta I_D =$$

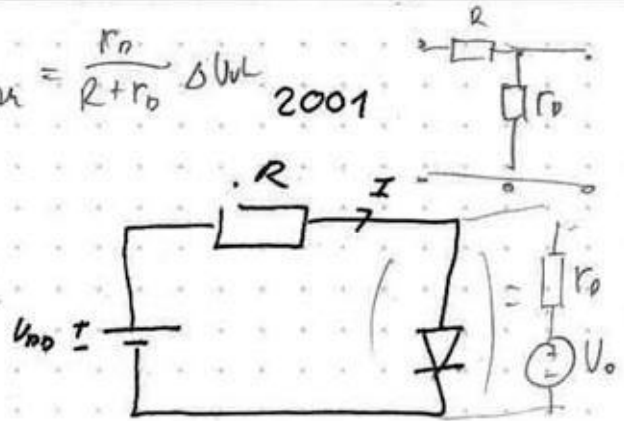
$$\Delta I_D = \frac{\Delta V_{VH} - \Delta V_{VZ}}{R}$$

$$\Delta V_{VZ} = r_d \frac{\Delta V_{VH} - \Delta V_{VZ}}{R}$$

$$\Delta V_{VZ} (R + r_d) = r_d \Delta V_{VH}$$

$$\Delta V_{VZ} = \frac{r_d \Delta V_{VH}}{R + r_d} = \frac{12,2\Omega \cdot 1V}{1k\Omega + 12,2\Omega} = 11,85mV \quad \checkmark$$

$$\Delta V_{VZ} = \frac{r_d}{R + r_d} \Delta V_{VH} \quad 2001$$

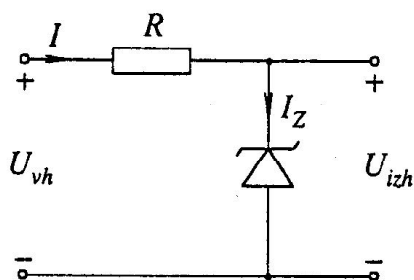


OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij

(18. 4. 2002)

1. Homogeno dopirana silicijeva palica n -tipa s površino $A = 10^{-2} \text{ cm}^2$ in dolžino $l = 1 \text{ cm}$ ima upornost $R = 500 \Omega$. Izračunajte koncentracijo dodanih donorskih primesi in narišite diagram energijskih nivojev s Fermijevim nivojem znotraj energijske špranje (gibljivost elektronov $\mu_n = 1250 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$, gibljivost vrzeli $\mu_p = 440 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$, energijska špranja silicija $E_G = 1,12 \text{ eV}$).
2. Idealni stopničasti silicijev pn -spoj ima v p -plasti $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in v n -plasti $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Izračunajte toka injiciranih manjšinskih nosilcev naboja na robovih osiromašenih plasti pri prevodni napetosti, ki je enaka polovici difuzijske napetosti. Izračun dopolnite s skico krajevne odvisnosti komponent toka skozi diodo ($\tau_p = 0,1 \mu\text{s}$ in $\tau_n = 0,01 \mu\text{s}$, $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$, $\mu_n = 801 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$, $\mu_p = 438 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$, $U_T = 25,66 \text{ mV}$).
3. Izračunajte, v katerih mejah se lahko spreminja napetost na vhodu preprostega napetostnega stabilizatorja, da napetost na izhodu ne bo manjša od $5,4 \text{ V}$ in ne večja od $5,6 \text{ V}$. Pri napetosti $U_{izh} = 5,6 \text{ V}$ teče skozi prebojno diodo tok $I = 50 \text{ mA}$ ($r_Z = 10 \Omega$, $R = 250 \Omega$). Princip delovanja preprostega napetostnega stabilizatorja pojasnite s karakteristiko prebojne diode in uporovno premico.



4. Krmiljenje diode z velikimi pravokotnimi signali: a) narišite časovni diagram in na njem označite značilne zakasnilne čase diode, b) s skico pojasnite dogajanje v diodi, za katero predpostavimo, da ima koncentracijo $N_A \gg N_D$.

Pišete 60 minut, dovoljena je uporaba lista z osnovnimi enačbami in konstantami. Rezultati bodo objavljeni v ponedeljek, 22. 4., na oglasni deski v III. nadstropju.

1. m-tip homogena

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

$$l = 1 \text{ cm}$$

$$R = 500 \Omega$$

$$n = 2$$

→ Koncentracija dodelanih dom. primerov

$$\mu_n = 1250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$N_D = 540 \text{ cm}^{-3}/\text{Vs}$$

$$E_g = 1,12 \text{ eV}$$

Nariši energ. nivoje + Fermi nivo

$$n\text{-tip} \Rightarrow N_D \gg N_A \Rightarrow N_D \approx n = 2$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} \Rightarrow \text{zanemarljivo}$$

$$R = \frac{l}{\sigma A} \Rightarrow \sigma$$

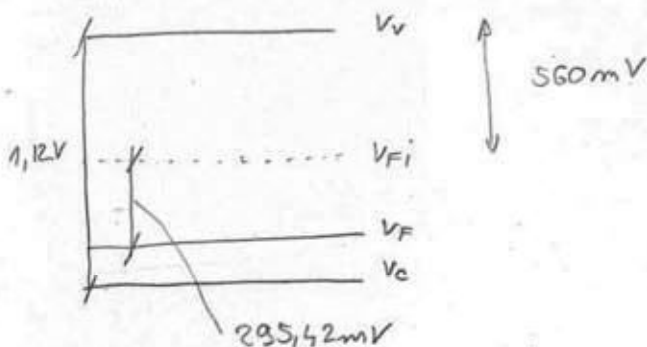
$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \approx q(\mu_n N_D)$$

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot A} = q \mu_n N_D \Rightarrow$$

$$N_D = \frac{l}{R \cdot A \cdot q \mu_n} = \frac{1 \text{ cm}}{500 \Omega \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1250 \text{ cm}^2/\text{Vs}} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$n \approx N_D = n_i e^{\frac{V_{Fi} - V_F}{V_T}}$$

$$V_{Fi} - V_F = V_T \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} = 25,69 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{15}}{10^{10}} = 295,42 \text{ mV}$$



2. pn-poj

p-plast

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

n-plast

$$N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$U = U_D/2$$

$$(T_p = 0,1 \mu\text{s} \quad T_n = 0,01 \mu\text{s}, A = 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad \mu_n = 801 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad \mu_p = 438 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad U_T = 25,66 \text{ mV})$$

$$I = ?$$

$$L_n = \sqrt{D_n T_n} = \sqrt{20,55 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 0,01 \mu\text{s}} = 4,37 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

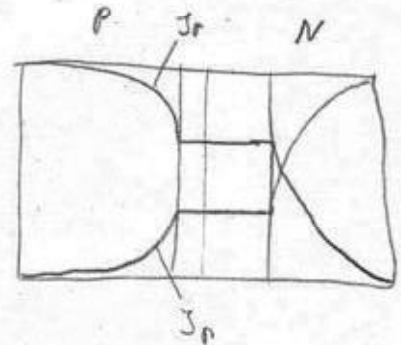
$$L_p = \sqrt{D_p T_p} = \sqrt{11,33 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 0,1 \mu\text{s}} = 1,064 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$I_n = A q n_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} \left(e^{\frac{U_D}{2U_T}} - 1 \right) =$$

$$I_p = A q n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} \left(e^{\frac{U_D}{2U_T}} - 1 \right) =$$

$$D_n = U_T \mu_n = 25,66 \text{ mV} \cdot 801 \text{ cm}^2/\text{Vs} = 20,55 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_p = U_T \mu_p = 25,66 \text{ mV} \cdot 438 \text{ cm}^2/\text{Vs} = 11,23 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$



$$U_D = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 25,66 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{17} \cdot 5 \cdot 10^{15}}{10^{20}} = 0,750 \text{ V}$$

$$I_n = 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \frac{20,55 \text{ cm}^2}{5 \cdot 4,37 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}} \left(e^{\frac{0,750 \text{ V}}{2 \cdot 25,66 \text{ mV}}} - 1 \right) = 167,22 \mu\text{A}$$

$$I_p = 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \frac{11,33 \text{ cm}^2}{1,064 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}} \left(e^{\frac{0,750 \text{ V}}{2 \cdot 25,66 \text{ mV}}} - 1 \right) = 7,57 \text{ mA}$$

3.

 $U_{VH} \text{ min - max}$ $U_{IZ} \text{ min} = 5,4 \text{ V}$ $U_{IZ} \text{ max} = 5,6 \text{ V}$ $U_{IZ} = 5,5 \text{ V}$ $I = 50 \text{ mA}$ $r_z = 10 \Omega$ $R = 250 \Omega$ Uprava prenosa, diodna lam.

$$\Delta U_{IZ} = 0,2 \text{ V}$$

$$\Delta U_{IZH} = r_z \cdot \Delta I_z$$

$$\Delta I_z = \frac{\Delta U_{VH} - \Delta U_{IZH}}{R} = \frac{\Delta U_{IZH}}{r_z}$$

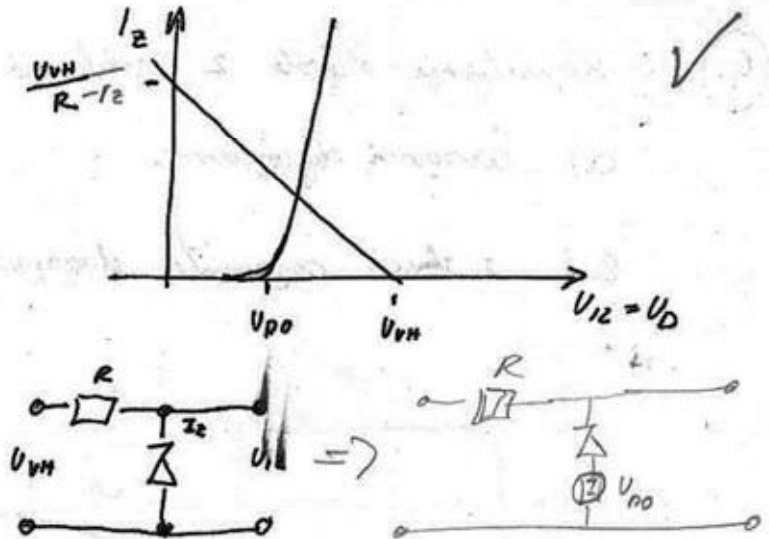
$$\Delta U_{VH} = \frac{\Delta U_{IZH} \cdot R}{r_z} - \Delta U_{IZ} = \frac{0,2 \text{ V} \cdot 250 \Omega}{10 \Omega} - 0,2 \text{ V} = 4,8 \text{ V}$$

$$r \cdot I_z + U_{IZ} + R \cdot I_z = U_{VH}$$

$$U_{VH_{\text{max}}} = 5,6 \text{ V} + 250 \Omega \cdot 50 \text{ mA} + 10 \Omega \cdot 50 \text{ mA} = 18,6 \text{ V}$$

$$U_{VH} = \{ 13,8 \text{ V} - 18,6 \text{ V} \}$$

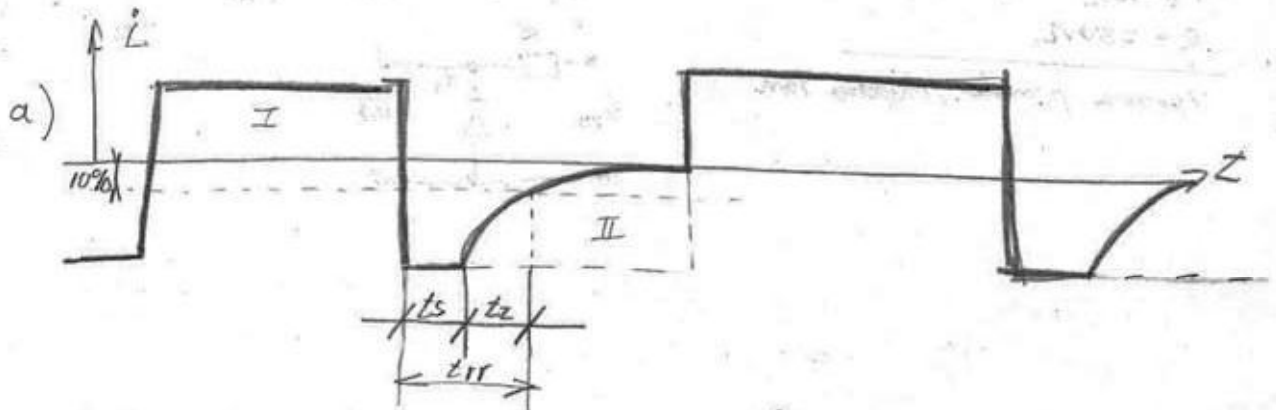
2002



4. Krmiljenjski diode z nelinearnimi $\square$ signali

a) časovni diagrami

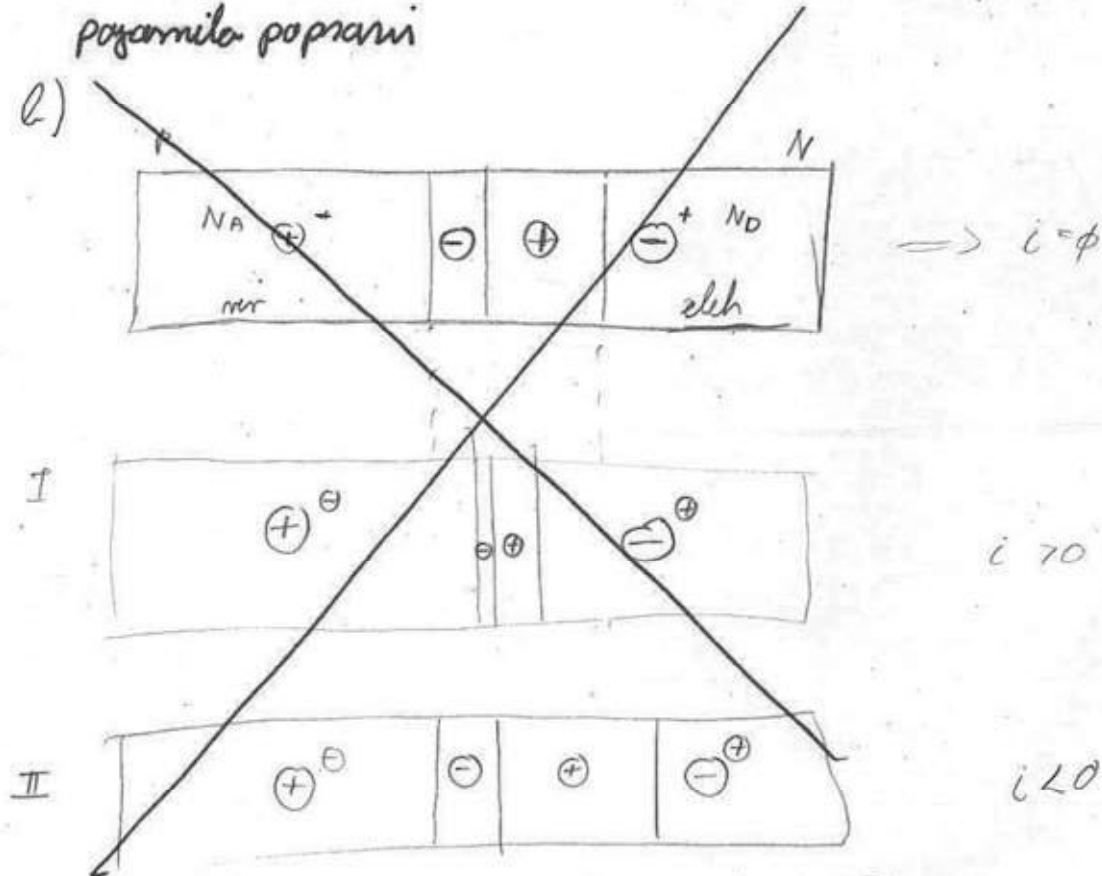
b) s strogo poravnate dogajanje v diodi na, $N_A \text{ } 77 N_D$



t_s čas hupanja naložja
 t_r prehodni čas
 t_{rr} skupni čas

poravnate popravni

b)

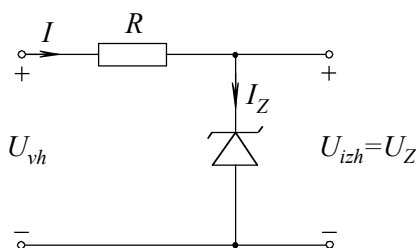


glej zapisne predavanja str 85
 poglavje 3.8 !!!

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij (24. 4. 2003)

1. Izračunajte upornost silicijevega fotoupora dolžine 1 cm in preseka $100 \mu\text{m}^2$ za primera:
 - a) brez osvetlitve
 - b) pri osvetlitvi, ki povzroči presežek prostih nosilcev $n = \Delta p = 100 \times n_{n0}$.
($N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 1300 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$, $\mu_p = 400 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$)
2. Izračunajte kapacitivnost silicijeve diode pri sobni temperaturi:
 - a) če se dioda nahaja v termičnem ravnovesju
 - b) če je na diodo priključena zaporna napetost $U_R = 10 \text{ V}$.
($A = 0.1 \text{ mm}^2$, $N_A = 100 \times N_D$, $U_D = 709 \text{ mV}$)
3. Izračunajte minimalno površino hladilnega telesa diode, skozi katero teče enosmerni tok 10 A in je priključena na enosmerno napetost 0.9 V, da temperatura spoja T_j ne bo presegla $T_{j \max} = 150^\circ\text{C}$. Določite tudi temperaturo hladilnega telesa diode T_c .
($R_{thjc} = 6.67^\circ\text{C/W}$, $\sigma_{thca} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ W}(\text{cm}^2^\circ\text{C})^{-1}$, $T_a = 60^\circ\text{C}$).
4. Za preprost napetostni stabilizator s prebojno diodo določite vrednost upora R in parametra r_z , če želimo stabilizirati izhodno napetost na približno $U_{izh} = 5 \text{ V}$, sprememba izhodne napetosti ΔU_{izh} pa naj bo manjša od 0.05 V, pri čemer se vhodna napetost U_{vh} spreminja med 10 V in 17 V. Upor R določite tako, da bo pri maksimalni vhodni napetosti $U_{vh \max} = 17 \text{ V}$ tok skozi prebojno diodo približno enak $I_{z \max} = 25 \text{ mA}$. Pri izračunu vrednosti upora R vpliv upornosti r_z zanemarite (r_z majhen).
Princip delovanja napetostnega stabilizatorja prikažite s karakteristike prebojne diode in uporovno premico.



Pišete 60 minut. Dovoljena je uporaba listov z enačbami. Rezultati bodo objavljeni v ponedeljek 28. 4. 2003 na oglasni deski v III. nadstropju in na spletnem naslovu: <http://lzd.fe.uni-lj.si/predmeti/ONE/rezultati.htm>.

1. Kol

24.4.2003

AS

①

$$l = 1 \text{ cm}$$

$$A = 100 \mu\text{m}^2 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 100 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$R = ?$$

a) brez opredelila

b) pri opredelitvi hi poročam $\Delta n = \Delta p = 100 \times n_{no}$

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

$$\mu_n = 1300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$N_D \gg n_i \Rightarrow n \approx p \Rightarrow N_D \approx n_n = n_{no}$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{15} \text{ cm}^{-3}} = 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

pno

$$G_i = q (\mu_n \cdot n_i + \mu_p \cdot p_i) =$$

a)

$$R = \frac{1}{G} \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\frac{q (\mu_n \cdot n_i + \mu_p \cdot p_i)}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}} \cdot \frac{1 \text{ cm}}{100 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2} =$$

$$= \frac{1 \text{ cm}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} (1300 \cdot 10^5 + 400 \cdot 10^5) \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}} \cdot \frac{1}{100 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2} = 48976 \Omega$$

narrativno

$$b) G_i = q (\mu_n (n + \Delta n) + \mu_p (p + \Delta p)) = q (\mu_n (n_{no} + 100 n_{no}) + \mu_p (p_{no} + 100 p_{no})) =$$

$$= q (101 n_{no} \mu_n + \mu_p \cdot 100 n_{no}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} (101 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot 1300 \text{ cm}^2/\text{Vs} + 400 \text{ cm}^2/\text{Vs} \cdot 100 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3})$$

$$G_i = 27,408 \frac{\text{A}}{\text{V cm}}$$

$$R = \frac{1}{G_i} \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{27,408 \text{ A}} \cdot \frac{1 \text{ cm}}{100 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2} = 3,64 \Omega$$

2. C diode ?

$$1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ cm}^2 = 100 \text{ mm}^2$$

a) nahaja v ter. ravnovesju

b) na diodi $U_R = 10 \text{ V}$

$$(A = 0,1 \text{ mm}^2, N_A = 100 N_D, U_D = 709 \text{ mV})$$

a)

$$\rightarrow N_A \gg n_i \Rightarrow$$

$$C_T = \frac{EA}{D} = \frac{10^{-12} \text{ As}^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2}{V_{\text{cm}}} = 105,65 \text{ pF} = 0,105 \text{ pF}$$

$$D = \sqrt{\frac{2E}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) U_D} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \text{ As}^{-1}}{V_{\text{cm}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \left(\frac{1}{100 N_D} + \frac{1}{N_D} \right) \cdot 0,709 \text{ V}} = 9,465 \mu\text{m}$$

$$= 9,465 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

b)

$$C_T = \frac{E \cdot A}{D} = \frac{8,854 \cdot 10^{-14} \text{ As}^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot 11,7}{374,20 \cdot 10^{-6} \text{ cm}} = 2,768 \text{ pF}$$

$$D = \sqrt{\frac{2E}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_D + U_R)}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ As}^{-1} \cdot 11,7}{V_{\text{cm}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \left(\frac{1}{100 N_D} + \frac{1}{N_D} \right) (0,709 \text{ V} + 10 \text{ V})}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ As}^{-1} \cdot 11,7}{V_{\text{cm}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \cdot \frac{1,01}{999,76} \cdot 10,709 \text{ V}} = 374,20 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$$

$$U_D \approx U_T \ln \frac{100 N_D^2}{n_i^2} = 2 U_T \ln \frac{10 N_D}{n_i} \Rightarrow N_D = \frac{n_i}{10} e^{\frac{U_D}{2 U_T}}$$

$$N_D = \frac{10^{10} \text{ cm}^{-3}}{10} e^{\frac{709 \text{ mV}}{2 \cdot 25,66 \text{ mV}}} = 999,76 \cdot 10^{12}$$

2003

3.

$$S_{min} = ?$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$U = 0,9 \text{ V}$$

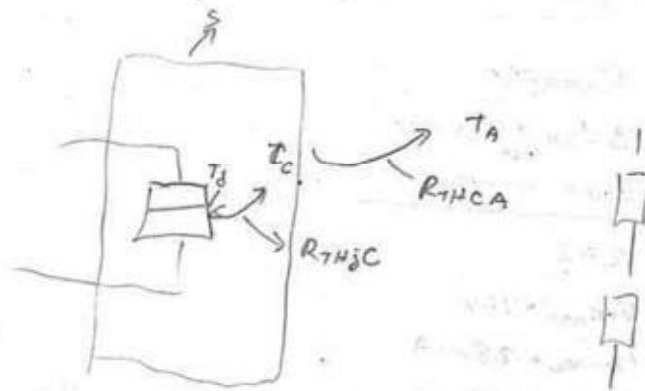
$$T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$$

$$T_c = ?$$

$$R_{THJC} = 6,67^\circ\text{C/W}$$

$$\sigma_{THCA} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2\text{C}$$

$$T_a = 60^\circ\text{C}$$



$$P = I \cdot U = 9 \text{ W}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{JC} &= R_{THJC} \cdot P \\ \Delta T_{CA} &= R_{THCA} \cdot P \end{aligned} \right\} \Delta T_{JA} = P (R_{THJC} + R_{THCA})$$

$$R_{THCA} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{THJC}$$

$$R_{THCA} = \frac{1}{\sigma_{THCA} A}$$

$$A = \frac{1}{\sigma_{THCA} \left(\frac{T_j - T_a}{P} - R_{THJC} \right)} =$$

$$= \frac{\text{cm}^2/\text{K}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ W/K} \left(\frac{150^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{9 \text{ W}} - 6,67^\circ\text{C/W} \right)} = \underline{\underline{100,10 \text{ cm}^2}}$$

$$\Delta T_{JC} = R_{THJC} \cdot P$$

$$T_j - T_c = R_{THJC} \cdot P$$

$$T_c = T_j - R_{THJC} \cdot P = 150^\circ\text{C} - 6,67^\circ\text{C/W} \cdot 9 \text{ W} = \underline{\underline{89,97^\circ\text{C}}}$$

(4.)

$$U_{IZH} = 5V$$

$$\Delta U_{IZH} = 0,05V$$

$$U_{VH} = 10-17V$$

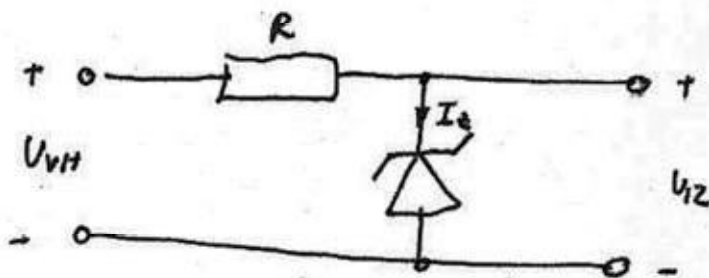
$$R = ?$$

$$U_{VHmax} = 17V$$

$$I_{Zmax} = 25mA$$

$$r_z \rightarrow \text{NAJMANJ.}$$

PRIKOŽI PRINCIP DELOVANJA Z KAR. IN UPOR. PREMIČNO



$$R = U/I = (U_{VHmax} - U_D) \cdot I_{max} = (17V - 5V) / 25mA = \underline{480\Omega}$$

$$r_z = \frac{dU_z}{dI_z} \Rightarrow \Delta U_{IZH} = r_z \cdot \Delta I_z$$

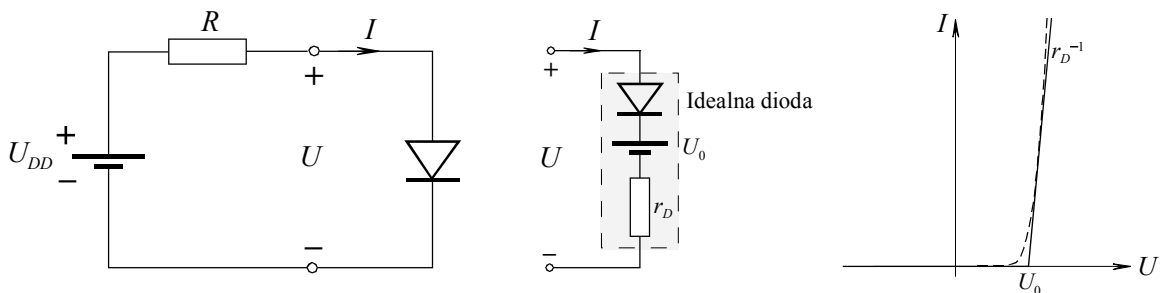
$$\Delta I_z = \frac{\Delta U_{VH} - \Delta U_{IZH}}{R}$$

$$r_z = \frac{\Delta U_{IZH} \cdot R}{\Delta U_{VH} - \Delta U_{IZH}} = \frac{0,05V \cdot 480\Omega}{5V - 0,05V} = \underline{4,89\Omega}$$

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij (23. 4. 2004)

1. Narišite krajevni potek energijskih nivojev ($E_C(x)$, $E_V(x)$, $E_{Fi}(x)$, $E_F(x)$) v silicijevem vzorcu, če se koncentracija donorskih primesi v smeri x spreminja po zakonitosti: $N_D(x) = N_{D0} \exp(-x/L)$. Polprevodnik se nahaja v termičnem ravnovesju na sobni temperaturi. (Podatki: $N_{D0} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L = 4.343 \text{ m}$, dolžina vzorca $l = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $E_G = 1.12 \text{ eV}$).
2. Izračunajte, pri kateri priključeni zunanji napetosti bo osiromašeno območje silicijeve stopničaste pn -diode znašalo $5 \text{ }\mu\text{m}$. (Podatki: $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). Kolikšno bo pri tej napetosti električno polje na metalurškem pn -spoju?
3. Določite vrednosti elementov nadomestnega vezja diode U_0 in r_D , če pri priključeni napetosti $U_{DD} = 5 \text{ V}$ teče skozi dano vezje tok $I = 1 \text{ mA}$. Upornost r_D določite kot tangento skozi delovno točko diode. (Podatek: $R = 4.3 \text{ k}\Omega$).



4. Izračunajte, kolikšen življenjski čas τ_n morajo imeti elektroni v p -plasti nesimetrične ($N_D \gg N_A$) stopničaste pn -diode, da bo realni del admitance $\underline{Y}$ 100-krat večji od imaginarnega dela. Dioda je v okolici delovne točke $I = 1 \text{ mA}$ krmiljena z majhnimi signali frekvence $f = 10 \text{ kHz}$.

Pišete 60 minut. Dovoljena je uporaba listov z enačbami. Rezultati bodo objavljeni najpozneje v sredo, 28. 4., na oglasni deski v III. nadstropju in na spletnem naslovu: <http://lzd.fe.uni-lj.si/predmeti/ONE/rezultati.htm>.

1. KOL.

23. 4. 2004

(1) $E_c(x)$ $E_v(x)$ $E_{Fi}(x)$ $E_F(x)$

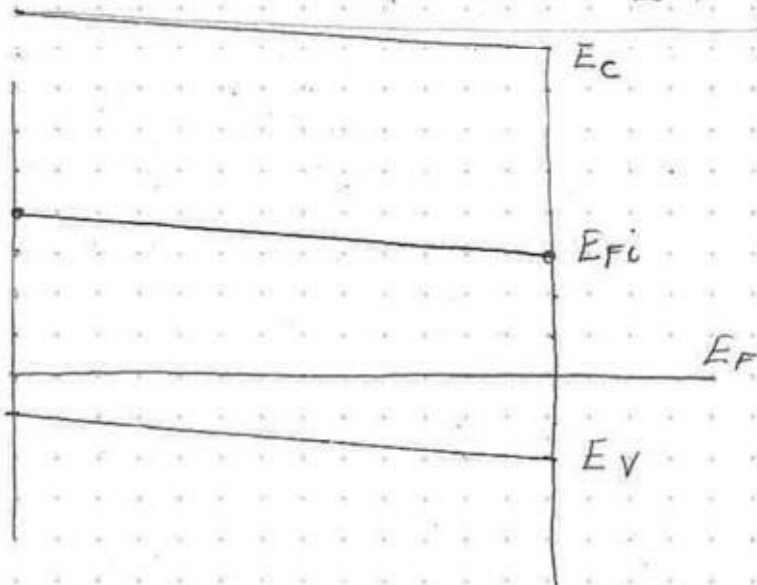
$$N_D = N_{D0} e^{-x/L} \Rightarrow n\text{-tip}$$

$$N_{D0} = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad L = 4,343 \mu\text{m} \quad L = 20 \mu\text{m} \quad E_0 = 1,12 \text{ eV}$$

$$n = N_D = n_i e^{\frac{E_F - E_{Fi}}{gV_T}}$$

$$E_F - E_{Fi} = gV_T \ln \frac{N_D}{n_i} = gV_T \ln \frac{N_{D0} e^{-x/L}}{n_i} =$$

$$E_F - E_{Fi} = gV_T \left(\ln \frac{N_{D0}}{n_i} - \frac{x}{L} \right) =$$



$$\Delta E|_{x=0} = gV_T \left(\ln \frac{N_{D0}}{n_i} \right) = 2 \cdot 25,66 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{17} \text{ cm}^{-3}}{10^{10} \text{ cm}^{-3}} = 0,413 \text{ meV}$$

$$\Delta E|_{x=L} = gV_T \left(\ln \frac{N_{D0}}{n_i} - \frac{x}{L} \right) = 2 \cdot 25,66 \text{ mV} \left(\ln(10^7) - \frac{20 \mu\text{m}}{4,343 \mu\text{m}} \right) = 0,895 \text{ meV}$$

3.

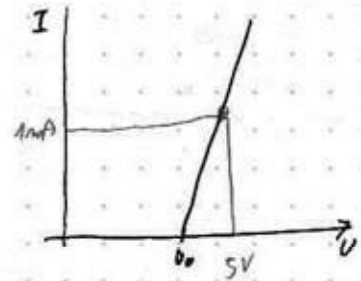
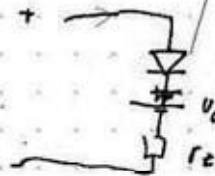
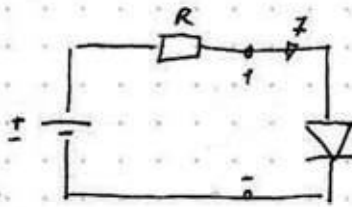
$$V_0, r_d = ?$$

$$V_{DD} = 5V$$

$$I = 1mA$$

 $r_d = \text{Tangentna štiri DT}$

$$R = 4,3 k\Omega$$



$$V_{VH} = I \cdot R + I \cdot r_d + V_0$$

$$V_D = V_0 + I \cdot r_d \rightarrow V_0 = V_D - I \cdot r_d$$

$$V_{VH} = I \cdot R + I \cdot r_d + V_0 - I \cdot r_d$$

$$V_{VH} = I \cdot R + V_0$$

$$V_0 = 0.7V$$

$$r_d = \frac{V_D - V_0}{I}$$

$$I = \frac{V_{VH} - V_0}{R + r_d}$$

$$r_d = \frac{dV_D}{dI}$$

$$g_d = \frac{dI}{dV}$$

$$g = \frac{I}{V_T}$$

NI

nalen, sugrelin model

$$g = \frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} \left(I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \right) = I_s e^{\frac{V}{V_T}} \frac{1}{V_T} = \frac{I}{V_T}$$

$$r_d = \frac{V_T}{I} = \underline{\underline{25,66 \Omega}}$$

$$V_0 = V_D - I \cdot r_d = 0.7V - 25,66mV = \underline{\underline{0,674}}$$

(4.)

$$\tau_n = ?$$

elektroni v p plasti

$$N_D \gg N_A$$

$$Y = 100 I_m + g I_m$$

$$I = 1 \text{ mA}$$

$$f = 10 \text{ kHz}$$

$$g = 100 I_m = \frac{I}{V_T} =$$

$$g = g + j \omega C$$

$$g = 100 I_m = \frac{I_0}{V_T} = \frac{1 \text{ mA}}{25,60 \text{ mV}} = 0,032 \text{ S}$$

$$B_C = 0,389,71 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

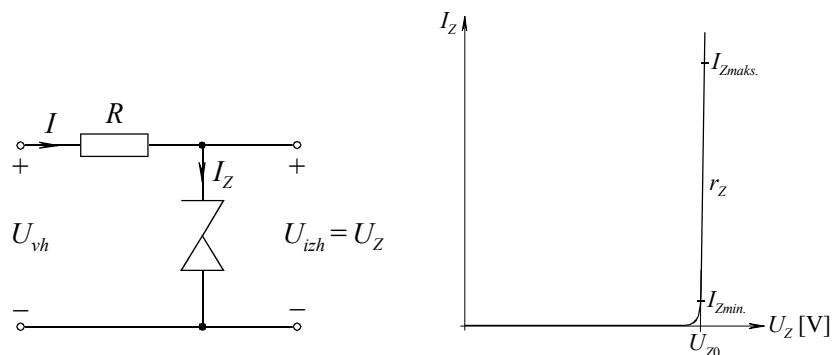
$$B_C = 2\pi f \cdot C = 2\pi f \cdot \frac{g_{mF} \cdot \tau_n}{g}$$

$$\tau_n = \frac{B_C}{\pi f \cdot g_{mF}} = \frac{\frac{g_{mF}}{g} \cdot 100}{\pi f \cdot g_{mF}} = \frac{1}{\pi f \cdot 100} = \frac{1}{\pi \cdot 10 \text{ kHz} \cdot 100} = \underline{\underline{3,18 \text{ ns}}}$$

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij (21. 4. 2005)

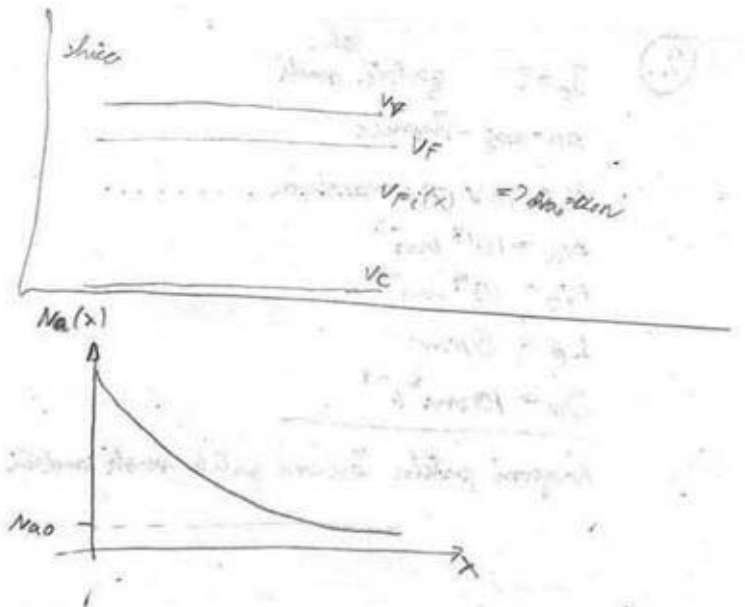
1. Izračunajte vgrajeno električno polje v silicijskem vzorcu, v katerem se koncentracija akceptorskih primesi v smeri x spreminja po zakonitosti: $N_A(x) = N_{A0} \exp(-x/L)$. Skicirajte krajevni potek potencialnih nivojev ($V_C(x)$, $V_V(x)$, $V_{Fi}(x)$, $V_F(x)$). Polprevodnik se nahaja v termičnem ravnovesju na sobni temperaturi. (Podatki: $N_{A0} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L = 3.421 \text{ m}$, dolžina vzorca $l = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $E_G = 1.12 \text{ eV}$).
2. Izračunajte tokovo gostoto vrzeli J_p na robu osiromašenega območja stopni astega pn -spoja, če je na diodo priključena prevodna napetost $U = 0,6 \text{ V}$. Podatki: $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $L_p = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $D_p = 10 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$. Narišite (shematsko) krajevni potek tokove gostote vrzeli vzdolž pn -diode.
3. Izračunajte, pri kateri zaporni napetosti U_R na stopničasti silicijski pn -diodi bo spojna kapacitivnost diode C_T znašala 5 pF . Kolikšna je spojna kapacitivnost C_T pri $U_R = 0 \text{ V}$. Podatki: $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $A = 10^{-3} \text{ cm}^2$.
4. Prebojno diodo z $U_{Z0} = 5,6 \text{ V}$ in $r_Z = 5 \text{ }\Omega$ želimo uporabiti za stabilizacijo enosmerne napetosti. Določite območje dopustnega spreminjanja vhodne napetosti U_{vh} , če je največji dopustni tok obremenitve diode $I_{\text{maks.}} = 10 \text{ mA}$ in tok, pri katerem dioda še zadovoljivo deluje kot stabilizator, $I_{\text{min.}} = 1 \text{ mA}$. Določite obseg spreminjanja izhodne napetosti. Princip stabilizacije napetosti prikažite z vrisano uporovno premico v $I_Z(U_Z)$ diagramu. Vrednost predupora $R = 220 \text{ }\Omega$.



Pišete 60 minut. Dovoljena je uporaba listov z ena bami. Rezultati bodo objavljeni najpozneje v torek, 26. 4., na oglasni deski v III. nadstropju in preko e-Študenta.

1. KOL 24.2.2005

1. $N_A(x) = N_{A0} e^{-\frac{x}{L}}$
 $V_C(x), V_V(x), V_{Fi}(x), V_F(x) = ?$
 termome ravnovesje
 $N_{A0} = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow p \text{ tip}$
 $L = 3,421 \mu\text{m}$
 $\ell = 20 \mu\text{m}$
 $E_0 = 1,12 \text{ eV}$
 $E = ?$



$$N_{A0} > n_i \Rightarrow p \text{ tip}$$

$$p = N_A$$

$$p = n_i e^{\frac{V_F - V_{Fi}}{V_T}} \Rightarrow$$

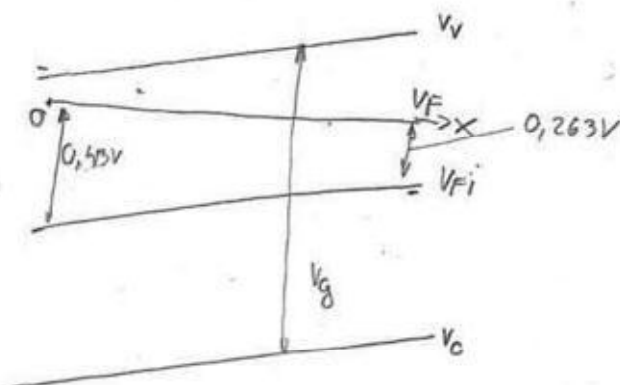
$$V_F - V_{Fi} = V_T \ln \frac{p}{n_i} = V_T \ln \frac{p(x)}{n_i} = V_T \ln \frac{N_A(x)}{n_i}$$

$$V_F - V_{Fi} = V_T \ln \frac{N_{A0} e^{-\frac{x}{L}}}{n_i} = V_T \left(\ln \frac{N_{A0}}{n_i} - \frac{x}{L} \right)$$

$$V_F - V_{Fi} \Big|_{x=0} = V_T \ln \frac{N_{A0}}{n_i} = 10^{-3} 25,66 \text{ eV} \cdot \ln \frac{10^{17} \text{ cm}^{-3}}{10^{10} \text{ cm}^{-3}} = 0,413 \text{ V}$$

$$V_F - V_{Fi} \Big|_{x=\ell} = V_T \left(\ln \frac{N_{A0}}{n_i} - \frac{x}{L} \right) = 25,66 \text{ mV} \left(\ln \frac{10^{17} \text{ cm}^{-3}}{10^{10} \text{ cm}^{-3}} - \frac{20 \mu\text{m}}{3,421 \mu\text{m}} \right) = 0,263 \text{ V}$$

$$E_g = V_g - 1,12 \text{ V} \Rightarrow \frac{V_g}{2} = 0,560 \text{ V}$$



$$\frac{dE}{dx} = - \frac{dV}{dx}$$

$$E = - \frac{dV}{dx} = - \frac{dV_{Fi}}{dx} = - \frac{V_T}{L} = \frac{25,66 \text{ mV}}{3,421 \mu\text{m}} = 7,50 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

②

 $J_p = ?$ gostota nosilci

pn-spoj - stopnica

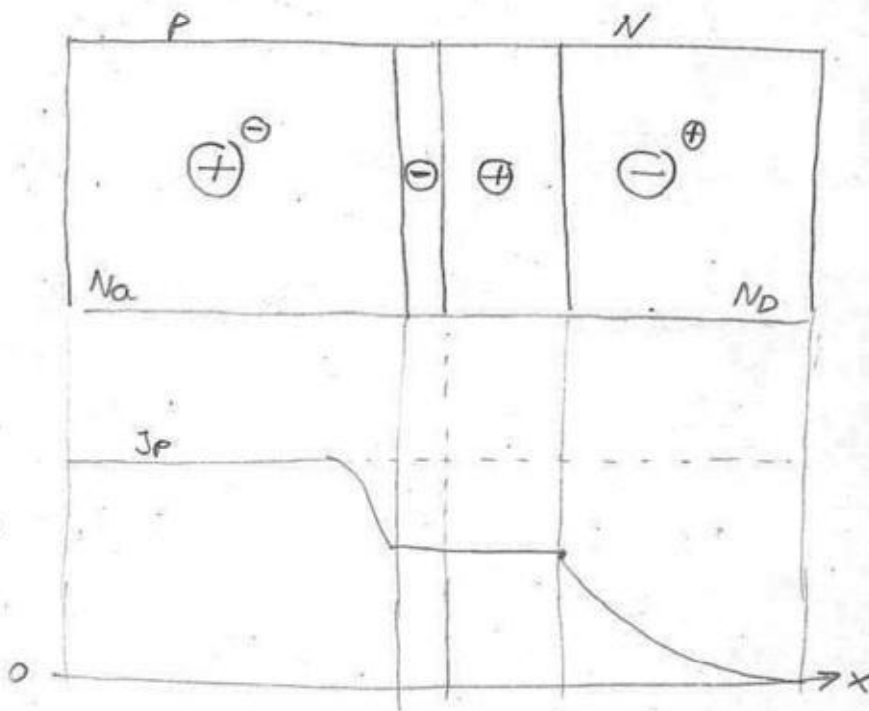
 $V = 0,6V \rightarrow$ prerazna $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $L_p = 5 \mu\text{m} \rightarrow$ $D_p = 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

0,000005

Krojevni pateri tovarne gostote nosilci nedeji PN spoja

$$J_p = q n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot (10^{-10})^2 \text{ cm}^{-6} \cdot \frac{10 \text{ cm}^2 \text{ cm}^2}{5 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}} \left(e^{\frac{0,6V}{25,60 \text{ mV}}} - 1 \right) = 45,72 \text{ A/cm}^2$$



3.

$$U_R = ?$$

$$C_T = 5 \text{ pF}$$

$$C_T = ? \quad (U_R = 0 \text{ V})$$

$$N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad A = 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$C_T = \frac{\epsilon A}{D}$$

$$D = \frac{\epsilon A}{C_T} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_D + U_R)} \Rightarrow U_R$$

$$U_D = \frac{q}{2\epsilon} (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 25,66 \text{ mV} \ln \frac{10^{15} \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}}{10^{20} \text{ cm}^{-6}} =$$

$$U_D = 9,768 \text{ mV}$$

$$F = \frac{AS}{\dots}$$

$$\left(\frac{\epsilon A}{C_T} \right)^2 = \frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_D + U_R)$$

9,2

$$U_R = \frac{\epsilon^2 A^2 N_A q}{C_T^2 2\epsilon} - U_D = \frac{\epsilon A^2 N_A q}{C_T^2 2} - U_D =$$

$$= \frac{10^{12} \text{ AS} \cdot (10^{-3})^2 \text{ cm}^2 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ AS V}^{\frac{1}{2}}}{\text{V cm}^3 \text{ cm}^3 \text{ AS}^2 (10^{-12})^2 \cdot 2} - 9,768 \text{ mV}$$

$$= 2,432 \text{ V}$$

$$C_T = \frac{\epsilon A}{D}$$

$$D|_{U_R=0} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) U_D} = \sqrt{\frac{2\epsilon U_D}{q N_A}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \text{ cm} \cdot 2,432 \text{ V}}{\text{V cm} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ AS} \cdot 10^{15}}} = 174,510^{-6} \text{ cm} = 0,00017435 \text{ cm}$$

$$C_T|_{U_R=0} = \frac{10^{12} \text{ AS} \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot 10^{-12}}{\text{V cm} \cdot 174,535 \cdot 10^{-3} \text{ cm}} = 5,7295 \text{ pF}$$

4.

$$U_{E0} = 5,6V$$

$$r_z = 5\Omega$$

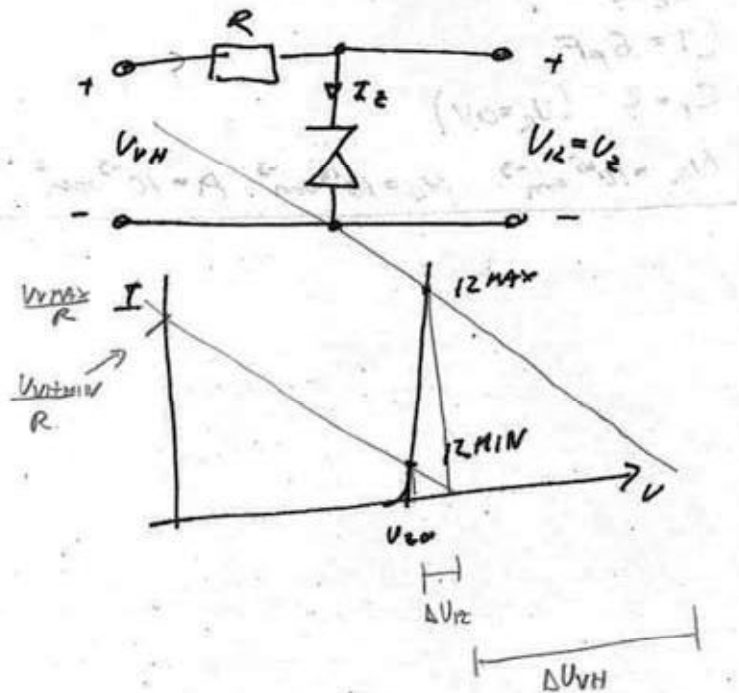
$$U_{VH\min}, U_{VH\max} = ?$$

$$I_{\max} = 10mA$$

$$I_{\min} = 1mA$$

$$U_{Iz\min}, U_{Iz\max} = ?$$

$$R = 220\Omega$$



$$U_{VH} = (R + r_z)I + U_{E0}$$

$$U_{VH\max} = (R + r_z)I_{\max} + U_{E0} = (220\Omega + 5\Omega)10mA + 5,6V = \underline{7,85V}$$

$$U_{VH\min} = (R + r_z)I_{\min} + U_{E0} = (220\Omega + 5\Omega)1mA + 5,6V = \underline{5,82V}$$

$$\Delta U_{VH} = 2,03V$$

$$r_z = \left. \frac{\Delta U_z}{\Delta I} \right|_{I=I_z} \Rightarrow \Delta U_z = r_z \Delta I_z = r_z \frac{\Delta U_{VH} - \Delta U_z}{R}$$

$$\Delta I_z = \frac{\Delta U_{VH} - \Delta U_z}{R}$$

$$\Delta U_z \cdot R = r_z (\Delta U_{VH} - \Delta U_z)$$

$$\Delta U_z (R + r_z) = r_z \Delta U_{VH}$$

$$\Delta U_z = \frac{r_z \Delta U_{VH}}{R + r_z} = \frac{5\Omega \cdot 2,03V}{220 + 5} = 45,11mV$$

$$U_{Iz\max} = U_{VH\max} - R \cdot I_{\max} = 7,85V - 220\Omega 10mA = \underline{5,85V}$$

$$U_{Iz\min} = U_{Iz\max} - \Delta U_z = \underline{5,609V}$$

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij (24. 4. 2006)

1. Silicijev stopničasti pn -spoj je dopiran tako, da je v p -plasti $E_F - E_V = 0,18$ eV in v n -plasti $E_C - E_F = 0,21$ eV. Skicirajte energijski diagram pn -spoja, določite koncentracijo dodanih primesi v obeh plasteh in izračunajte difuzijsko napetost U_D . Spoj se nahaja v termičnem ravnovesju pri sobni temperaturi ($T = 24,8$ °C, $E_G = 1,12$ eV).

(Rešitev: $N_A = 2,7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 8,4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $U_D = 730 \text{ mV}$)

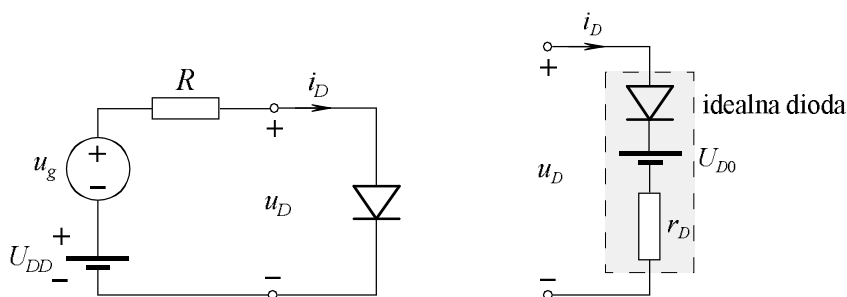
2. Idealna silicijeva dioda s stopničastim pn -spojem ima naslednje snovne parametre: $\tau_n = \tau_p = 0,1 \times 10^{-6} \text{ s}$, $D_n = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$. Kolikšno mora biti razmerje koncentracij N_A/N_D , da bo tok elektronov predstavljal 95 %-ni delež celotnega toka skozi osiromašeno območje diode.

(Rešitev: $\frac{A}{B} = 0,083$)

3. Pri sobni temperaturi ima prevodno polarizirana p^+n -dioda s tokom nasičenja $I_S = 2 \times 10^{-11} \text{ A}$ diferencialno upornost $r = 48 \Omega$. Izračunajte napetost na diodi. Kolikšno impedanco bo predstavljala dioda za majhne harmonične signale frekvence $f = 100 \text{ kHz}$, če je življenjski čas vrzeli v n -plasti $\tau_p = 10^{-7} \text{ s}$?

(Rešitev: $U = 0,4388 \text{ V}$, $Y = 0,02 + j0,00628 \text{ S}$, $Z = 50 - j1,57 \Omega$)

4. Določite medvršno vrednost izmenične sinusne napetosti u_{dpp} na diodi, če je generatorjeva medvršna napetost $u_{gpp} = 200 \text{ mV}$, ostali podatki pa so: $U_{DD} = 5 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $U_{D0} = 0,6 \text{ V}$, nadomestna upornost diode $r_D = 50 \Omega$. Rešitev ponazorite tudi grafično (narišite $i(u)$ diagram z aproksimirano karakteristiko diode in uporovno premico ter ustrezno označite vhodni in izhodni izmenični signal).



Rešitev: $u_D = 0,524 \text{ mV}$, $i_D = 4,12 \text{ mA}$, $U_D = 0,8095 \text{ mV}$)

Pišete 60 minut. Dovoljena je uporaba listov z enačbami. Rezultati bodo objavljeni predvidoma v sredo, 26. 4., na oglasni deski v III.

OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij (23. 4. 2007)

1. Izračunajte lego Fermijevega energijskega nivoja glede na intrinzični Fermijev energijski nivo v n -tipu silicija pri sobni temperaturi, če je koncentracija dodanih donorskih primesi $N_D = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in dodanih akceptorskih primesi $N_A = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Rešitev: $E_F - E_{Fi} = 0,427 \text{ eV}$)

2. Idealna silicijeva dioda s stopničastim p n -spojem ima površino $A = 10^{-3} \text{ cm}^2$ in naslednje snovne parametre: $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $D_n = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau_n = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$, $\tau_p = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$. Izračunajte difuzijska toka manjšinskih elektronov in vrzeli na robovih osiromašenega območja in celotni diodni tok, če je na diodo priključena prevodna napetost $U = 0,625 \text{ V}$.

(Rešitev: $I_{ndif} = 0,0856 \text{ mA}$, $I_{pdif} = 0,6056 \text{ mA}$, $I_{dif} = 0,6912 \text{ mA}$)

3. Izračunajte serijsko notranjo upornost R_n diode, pri kateri je pri prevodnem toku $I = 1 \text{ mA}$ na zunanjih priključkih napetost $U = 0,7 \text{ V}$, pri toku $I = 50 \text{ mA}$ pa $U = 1 \text{ V}$.

Rešitev: $R_n = 4 \Omega$)

4. Silicijeva dioda s stopničastim p^+n -spojem ima površino $A = 10^{-3} \text{ cm}^2$, difuzijsko napetost $U_D = 0,77 \text{ V}$ in dopiranje n -plasti z $N_D = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Izračunajte spojno kapacitivnost diode pri $U = 0 \text{ V}$ in pri zaporni napetosti $U_R = 10 \text{ V}$.

(Rešitev: $C_{T0} = 10,2 \text{ pF}$, $C_T(U_R = 10 \text{ V}) = 2,73 \text{ pF}$)

Pišete 60 minut. Dovoljena je uporaba listov z enačbami. Rezultati bodo objavljeni predvidoma v četrtek, 26. 4., na oglasni deski v II

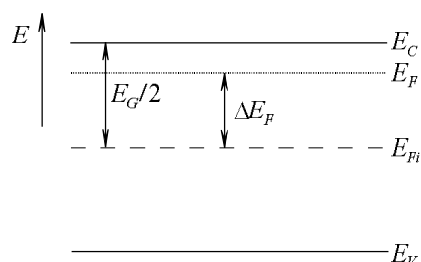
OSNOVE NELINEARNIH ELEMENTOV

I. kolokvij (21. 4. 2008)

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:

$$\begin{aligned} N_A &= 10^{16} \text{ cm}^{-3} \\ E_C - E_F &= 0,2 \text{ eV} \\ E_{GSi} &= 1,12 \text{ eV} \\ N_D &= ? \end{aligned}$$



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:

$$\begin{aligned} p(x) &= 2 \times 10^{15} e^{-x/L_p} \text{ cm}^{-3} \\ J_{pdif} &= 6,4 \text{ A cm}^{-2} (x=0) \\ D_p &= 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \\ L_p &= ? \end{aligned}$$

Rešitev:

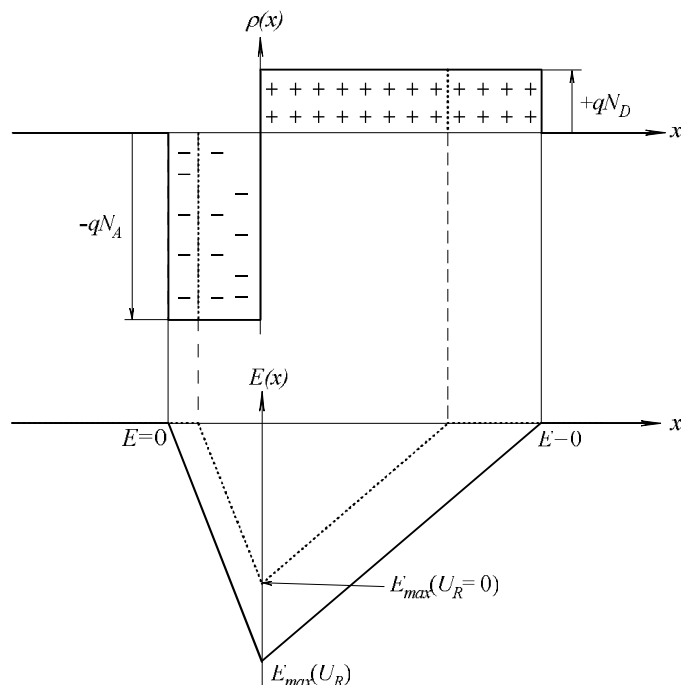
$$J_{pdif} = -qD_p \frac{dp}{dx} = \frac{qD_p}{L_p} 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} e^{\frac{x}{L_p}} \quad x=0 \Rightarrow J_{pdif} = \frac{qD_p}{L_p} \cdot 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

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

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

Podatki:

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

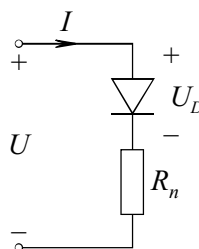
$$l_n = 10^{-2} \text{ cm}, \quad \rho_n = 0,1 \text{ } \Omega\text{cm}$$

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

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

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

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



Rešitev:

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

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

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

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

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