

pn – DIODA

ZADATAK.1. Za skokoviti pn -spoj izračunati širinu osiromašenog područja na $T=300$ K u stanju ravnoteže (napon na pn spoju je $U=0$ V). Koncentracije dopanada na p i n strani su $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je kapacitet osiromašenog sloja ako je površina pn -spoja $S=5 \text{ } \mu\text{m}^2$?

Rješenje:

Za većinske nosioce na zadanoj temperaturi vrijedi:

$$p_{0p} \cong N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad \text{i} \quad n_{0n} \cong N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

Kontaktni potencijal iznosi:

$$U_K = U_T \cdot \ln\left(\frac{n_{0n} \cdot p_{0p}}{n_i^2}\right) = \frac{300}{11600} \cdot \ln\left(\frac{10^{16} \cdot 10^{17}}{(1,45 \cdot 10^{10})^2}\right) = 0,755 \text{ V}$$

Širina osiromašenog područja:

$$d_B = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \cdot (U_K - U)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{10^{16}}\right) \cdot (0,755 - 0)} = 0,328 \text{ } \mu\text{m}$$

Kapacitet osiromašenog područja:

$$C_B = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d_B} = 8,854 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-8}}{0,328 \cdot 10^{-4}} = 1,58 \cdot 10^{15} \text{ F} = 1,58 \text{ fF}$$

ZADATAK.2. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=1 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_p=0,5 \text{ } \mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=300$ K. Vrijedi $w_n \gg L_p$ i $w_p \gg L_n$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5$ V? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje:

Struja zasićenja za diodu s obje široke strane:

$$I_S = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{L_p} \right)$$

Za manjinske nosioce na p -strani računamo:

$$n_{0p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{15}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \cdot U_T = \mu_n \cdot \frac{T}{11600} = 900 \cdot \frac{300}{11600} = 23,28 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = \sqrt{23,28 \cdot 10^{-6}} = 48,25 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 48,25 \text{ } \mu\text{m}$$

Za manjinske nosioce na n -strani računamo:

$$p_{0n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_p = \mu_p \cdot U_T = \mu_p \cdot \frac{T}{11600} = 300 \cdot \frac{300}{11600} = 7,76 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{7,76 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 19,7 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 19,7 \text{ } \mu\text{m}$$

Uvrštenjem u gornju jednadžbu dobivamo:

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{L_p} \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \left(23,28 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5}{48,25 \cdot 10^{-4}} + 7,76 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^3}{19,7 \cdot 10^{-4}} \right) = 1,63 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

Uz zadani napon kroz diodu poteče:

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) = 1,63 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\exp\left(\frac{0,5}{1 \cdot \frac{300}{11600}}\right) - 1 \right) = 0,41 \text{ mA}$$

ZADATAK.3. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=0,5 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_p=1 \text{ } \mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=300 \text{ K}$. Vrijedi $L_p \gg w_n=1 \text{ } \mu\text{m}$ i $L_n \gg w_p=2 \text{ } \mu\text{m}$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5 \text{ V}$? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje:

Struja zasićenja za diodu s obje uske strane:

$$I_S = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{w_p} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{w_n} \right)$$

Za manjinske nosioce na p -strani računamo:

$$n_{0p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \cdot U_T = \mu_n \cdot \frac{T}{11600} = 700 \cdot \frac{300}{11600} = 18,1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = \sqrt{18,1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 30,1 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 30,1 \text{ } \mu\text{m} \gg w_p = 2 \text{ } \mu\text{m}$$

Za manjinske nosioce na n -strani računamo:

$$p_{0n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{15}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_p = \mu_p \cdot U_T = \mu_p \cdot \frac{T}{11600} = 350 \cdot \frac{300}{11600} = 9,05 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{9,05 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 30,1 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 30,1 \text{ } \mu\text{m} \gg w_n = 1 \text{ } \mu\text{m}$$

Uvrštenjem u gornju jednadžbu dobivamo:

$$I_S = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{w_p} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{w_n} \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \left(18,1 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{-4}} + 9,05 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^{-4}} \right) = 3,1 \cdot 10^{-11} \text{ A}$$

Uz zadani napon kroz diodu poteče:

$$I = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) = 3,1 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\exp\left(\frac{0,5}{1 \cdot \frac{300}{11600}}\right) - 1 \right) = 7,72 \text{ mA}$$

ZADATAK.4. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=1 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_p=0,5 \text{ } \mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=300 \text{ K}$. Vrijedi $L_p \gg w_n=1 \text{ } \mu\text{m}$ i $L_n \ll w_p$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5 \text{ V}$? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje:

Zadana je dioda s uskom n stranom ($L_p \gg w_n$) i širokom p stranom ($L_n \ll w_p$). Struja zasićenja za takvu diodu je:

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{w_n} \right)$$

Za manjinske nosioce na p -strani računamo:

$$n_{0p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{15}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \cdot U_T = \mu_n \cdot \frac{T}{11600} = 900 \cdot \frac{300}{11600} = 23,28 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = \sqrt{23,28 \cdot 10^{-6}} = 48,25 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 48,25 \text{ } \mu\text{m} \ll w_p$$

Za manjinske nosioce na n -strani računamo:

$$p_{0n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_p = \mu_p \cdot U_T = \mu_p \cdot \frac{T}{11600} = 300 \cdot \frac{300}{11600} = 7,76 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{7,76 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 19,7 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 19,7 \text{ } \mu\text{m} \gg w_n = 1 \text{ } \mu\text{m}$$

Uvrštenjem u gornju jednadžbu dobivamo:

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{w_n} \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \left(23,28 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5}{48,25 \cdot 10^{-4}} + 7,76 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-4}} \right) = 1,88 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

Uz zadani napon kroz diodu poteče:

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) = 1,88 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\exp\left(\frac{0,5}{1 \cdot \frac{300}{11600}}\right) - 1 \right) = 4,68 \text{ mA}$$

ZADATAK.5. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=0,5 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_p=1 \text{ } \mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=300 \text{ K}$. Vrijedi $L_p \ll w_n \text{ } \mu\text{m}$ i $L_n \gg w_p=1 \text{ } \mu\text{m}$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5 \text{ V}$? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje:

Zadana je dioda s uskom p stranom ($L_n \gg w_p$) i širokom n stranom ($L_p \ll w_n$). Struja zasićenja za takvu diodu je:

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{w_p} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{L_p} \right)$$

Za manjinske nosioce na p -strani računamo:

$$n_{0p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \cdot U_T = \mu_n \cdot \frac{T}{11600} = 700 \cdot \frac{300}{11600} = 18,1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = \sqrt{18,1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 30,1 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 30,1 \text{ } \mu\text{m} \gg w_p = 1 \text{ } \mu\text{m}$$

Za manjinske nosioce na n -strani računamo:

$$p_{0n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{15}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_p = \mu_p \cdot U_T = \mu_p \cdot \frac{T}{11600} = 350 \cdot \frac{300}{11600} = 9,05 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{9,05 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 30,1 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 30,1 \text{ } \mu\text{m} \ll w_n$$

Uvrštenjem u gornju jednadžbu dobivamo:

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{w_p} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{L_p} \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \left(18,1 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-4}} + 9,05 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5}{30,1 \cdot 10^{-4}} \right) = 1,62 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

Uz zadani napon kroz diodu poteče:

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) = 1,62 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\exp\left(\frac{0,5}{1 \cdot \frac{300}{11600}}\right) - 1 \right) = 0,404 \text{ mA}$$

ZADATAK.6. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=850 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=1,2 \text{ }\mu\text{s}$, $\tau_p=0,8 \text{ }\mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=300 \text{ K}$. Vrijedi $L_p \gg w_n=1 \text{ }\mu\text{m}$ i $L_n \gg w_p=2 \text{ }\mu\text{m}$. Izračunati dinamički otpor uz priključene propusne napone $U=0,5 \text{ V}$ i $U=50 \text{ mV}$? Nacrtati raspodjele manjinskih nosilaca za priključen napon $U=0,5 \text{ V}$. Pretpostaviti $m=1$.

Struja zasićenja za diodu s obje uske strane:

$$I_S = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{w_p} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{w_n} \right)$$

Za manjinske nosioce na p -strani računamo:

$$n_{0p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{5 \cdot 10^{15}} = 4,2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \cdot U_T = \mu_n \cdot \frac{T}{11600} = 850 \cdot \frac{300}{11600} = 21,98 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = \sqrt{21,98 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}} = 51,36 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 51,36 \text{ }\mu\text{m} \gg w_p = 2 \text{ }\mu\text{m}$$

Za manjinske nosioce na n -strani računamo:

$$p_{0n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_p = \mu_p \cdot U_T = \mu_p \cdot \frac{T}{11600} = 300 \cdot \frac{300}{11600} = 7,76 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{7,76 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6}} = 24,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 24,9 \text{ }\mu\text{m} \gg w_n = 1 \text{ }\mu\text{m}$$

Uvrštenjem u gornju jednadžbu dobivamo:

$$I_S = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{0p}}{w_p} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{w_n} \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot \left(21,98 \cdot \frac{4,2 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-4}} + 7,76 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-4}} \right) = 7,65 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

Strujno naponska karakteristika opisana je Shockley-evom jednadžbom:

$$I = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right)$$

Dinamički otpor je definiran kao

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{1}{\frac{dI}{dU}} = \frac{1}{I_s \cdot \exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) \cdot \frac{1}{U_T}} = \frac{U_T}{I_s \cdot \exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - I_s + I_s} = \frac{U_T}{I + I_s}$$

Uz priključen napon $U=0,5$ V struja kroz diodu je:

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) = 7,65 \cdot 10^{-12} \left(\exp\left(\frac{0,5}{1 \cdot \frac{300}{11600}}\right) - 1 \right) = 1,91 \text{ mA}$$

$I \gg I_s$ pa vrijedi

$$r_d \cong \frac{U_T}{I} = \frac{\frac{300}{11600}}{1,91 \cdot 10^{-3}} = 13,6 \text{ } \Omega$$

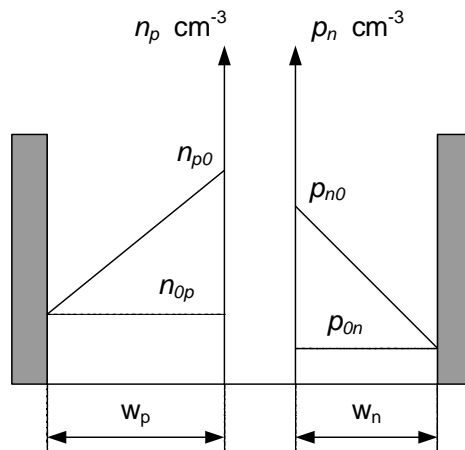
Uz priključen napon $U=50$ mV struja kroz diodu je:

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) = 7,65 \cdot 10^{-12} \left(\exp\left(\frac{0,05}{1 \cdot \frac{300}{11600}}\right) - 1 \right) = 4,523 \cdot 10^{-11} \text{ A}$$

U ovom slučaju ne vrijedi $I \gg I_s$ ($U < 3 \cdot U_T$) pa dinamički otpor računamo:

$$r_d = \frac{U_T}{I + I_s} = \frac{\frac{300}{11600}}{4,523 \cdot 10^{-11} + 7,65 \cdot 10^{-12}} = 489 \text{ M}\Omega$$

Raspodjele manjinskih nosilaca za napon propusne polarizacije prikazan je na slici.



Ravnotežne koncentracije manjinskih nosilaca su prije izračunati i iznose

$$n_{0p} = 4,2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3} \quad \text{i} \quad p_{0n} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

Rubne koncentracije računaju se preko Boltzmannovih relacija:

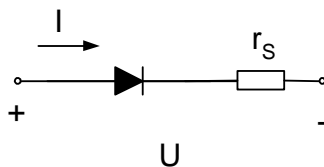
$$n_{p0} = n_{0p} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) = 4,2 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(\frac{0,5}{\frac{300}{11600}}\right) = 1,046 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_{n0} = p_{0n} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) = 2,1 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(\frac{0,5}{\frac{300}{11600}}\right) = 5,231 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

ZADATAK.7. Struja zasićenja neke pn -diode na $T=300$ K iznosi 1 pA. Serijski otpor neutralnih p i n strana iznose redom 2 i 8 Ω . Koliki napon treba priključiti na stezaljke diode da na zadanoj temperaturi kroz nju poteče struja 1 mA.

Rješenje:

Realnu diodu možemo prikazati kao idealnu diodu kojoj je u seriju spojen serijski otpor:



Shockley-eva jednačba uz $m=1$ opisuje strujno naponsku karakteristiku idealne diode. Uz zadanu struju dio vanjskog napona bit će na pn -spoju (idealna dioda), a dio na serijskom otporu diode. Možemo napisati:

$$U = U_D + I \cdot R_s$$

U_D možemo uz zadanu struju izračunati iz Shockley-eve jednačbe

$$U_D = U_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) = \frac{300}{11600} \cdot \ln\left(\frac{10^{-3}}{10^{-12}} + 1\right) = 0,536 \text{ V}$$

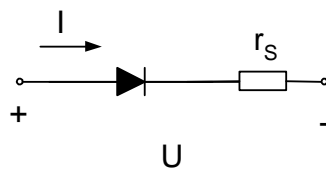
Napon koji treba priključiti jednak je

$$U = U_D + I \cdot R_S = 0,536 + 10^{-3} \cdot 10 = 0,546 \text{ V}$$

ZADATAK.8. Struja zasićenja neke *pn*-diode iznosi 1 pA. Serijski otpor diode iznosi 10 Ω. Koliki napon moramo priključiti na diodu da bi potekla struja $i_D = 1,5 [mA] + 0,25 \sin(\omega t) [mA]$? Uzeti $U_T = 25 \text{ mV}$.

Rješenje:

Realnu diodu u statičkim uvjetima rada (za istosmjerne napone) možemo prikazati sljedećim nadomjesnim sklopom



Istosmjerni napon na diodi jednak je

$$U = U_D + I \cdot R_S = U_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) + I \cdot R_S = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}} + 1\right) + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 0,543 \text{ V}$$

Za mali izmjenični signal idealnu diodu predstavljamo dinamičkim otporom i gornja shema izgleda:



Dinamički otpor iznosi

$$r_d \cong \frac{U_T}{I} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 16,67 \text{ } \Omega$$

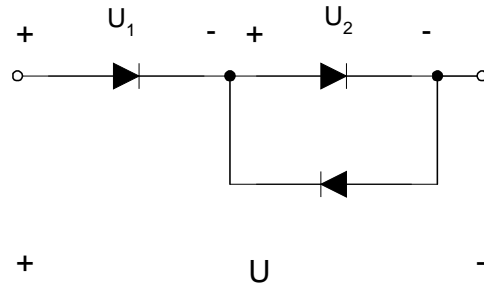
Izmjenična komponenta struje generirat će na vanjskim priključcima diode napon:

$$u_d = i_d \cdot (r_d + R_S) = 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (16,67 + 10) = 6,67 \text{ mV}$$

Prema tome na stezaljke diode treba priključiti napon:

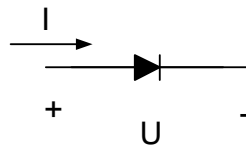
$$u_D = 0,543 [V] + 6,67 \cdot \sin(\omega t) [mV]$$

ZADATAK.9. Na spoj dioda priključen je napon $U=60$ mV. Izračunati napone U_1 i U_2 ako su diode jednakih karakteristika i imaju rstruju zasićenja $I_S=10$ pA. Uzeti $U_T= 25$ mV i $m=1$.

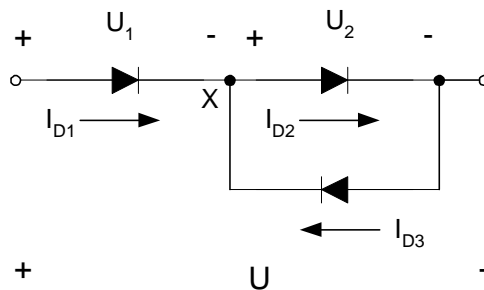


Rješenje:

Shockley-eva jednađžba opisuje strujno-naponsku karakteristiku diode i napisana je za sljedeći polaritet napona i smjer struje:



Prema tome za gornji spoj dioda možemo označiti struje:



Pojedine struje možemo napisati kao (zbog $U < 3 \cdot U_T$ jedinice u Shockley-evoj jednađžbi ne smiju se zanemariti):

$$I_{D1} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_1}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_{D2} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_2}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_{D3} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{-U_2}{U_T}\right) - 1 \right]$$

Za čvor X možemo napisati:

$$I_{D1} + I_{D3} = I_{D2}$$

Za napone vrijedi:

$$U = U_1 + U_2 \quad \Rightarrow \quad U_1 = U - U_2$$

Uvrštenjem struja dobivamo:

$$I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U - U_1}{U_T}\right) - 1 \right] + I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{-U_2}{U_T}\right) - 1 \right] = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_2}{U_T}\right) - 1 \right]$$

I_S su jednake pa se može napisati:

$$\frac{\exp\left(\frac{U}{U_T}\right)}{\exp\left(\frac{U_1}{U_T}\right)} - 1 + \frac{1}{\exp\left(\frac{U_2}{U_T}\right)} - 1 = \exp\left(\frac{U_2}{U_T}\right) - 1$$

Uz supstituciju $\exp\left(\frac{U_2}{U_T}\right) = x$ gornja jednačba prelazi u:

$$\frac{\exp\left(\frac{U}{U_T}\right)}{x} + \frac{1}{x} = x + 1,$$

odnosno

$$x^2 + x - \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) + 1 \right) = 0$$

Uvrštenjem U dobivamo:

$$x^2 + x - 12 = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} x_1 &= 3 \\ x_2 &= -4 \end{aligned}$$

Prihvatljivo rješenje je $x_1=3$ što daje:

$$\exp\left(\frac{U_2}{U_T}\right) = 3 \quad \Rightarrow \quad U_2 = 27,47 \text{ mV}, \quad U_1 = 32,53 \text{ mV}$$

Zadaci za vježbu

VJ.1. Za skokoviti pn -spoj izračunati širinu osiromašenog područja na $T=300$ K u stanju ravnoteže (napon na pn spoju je $U=0$ V). Koncentracije dopanada na p i n strani su $N_A=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je kapacitet osiromašenog sloja ako je površina pn -spoja $S=25 \text{ } \mu\text{m}^2$?

Rješenje: $d_B=0,324 \text{ } \mu\text{m}$, $C_B=7,98 \text{ fF}$

VJ.2. Za skokoviti pn -spoj izračunati širinu osiromašenog područja na $T=300$ K uz napon na pn spoju $U= - 3$ V. Koncentracije dopanada na p i n strani su $N_A=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je kapacitet osiromašenog sloja ako je površina pn -spoja $S=50 \text{ } \mu\text{m}^2$?

Rješenje: $d_B=2,2 \text{ } \mu\text{m}$, $C_B=2,35 \text{ fF}$

VJ.3. Za skokoviti pn -spoj izračunati širinu osiromašenog područja na $T=300$ K uz napon na pn spoju $U=0,3$ V. Koncentracije dopanada na p i n strani su $N_A=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je kapacitet osiromašenog sloja ako je površina pn -spoja $S=50 \text{ } \mu\text{m}^2$?

Rješenje: $d_B=0,71 \text{ } \mu\text{m}$, $C_B=7,34 \text{ fF}$

VJ.4. Za skokoviti pn -spoj izračunati širinu osiromašenog područja na $T=350$ K u stanju ravnoteže (napon na pn spoju je $U=0$ V). Koncentracije dopanada na p i n strani su $N_A=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je kapacitet osiromašenog sloja ako je površina pn -spoja $S=100 \text{ } \mu\text{m}^2$?

Rješenje: $d_B=0,43 \text{ } \mu\text{m}$, $C_B=24,3 \text{ fF}$

VJ.5. Za skokoviti pn -spoj izračunati širinu osiromašenog područja na $T=350$ K uz na pn spoju $U= - 2$ V. Koncentracije dopanada na p i n strani su $N_A=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je kapacitet osiromašenog sloja ako je površina pn -spoja $S=100 \text{ } \mu\text{m}^2$?

Rješenje: $d_B=0,84 \text{ } \mu\text{m}$, $C_B=12,34 \text{ fF}$

VJ.6. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=0,8 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_p=0,5 \text{ } \mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=300$ K. Vrijedi $w_n \gg L_p$ i $w_p \gg L_n$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,6$ V? Pretpostaviti $m=1$

Rješenje: $I_S=1,74 \cdot 10^{-13} \text{ A}$, $I=2,1 \text{ mA}$

VJ.7. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=280 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n=0,8 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_p=0,5 \text{ } \mu\text{s}$. Površina pn spoja iznosi $S=1 \text{ mm}^2$. Izračunati struju zasićenja na $T=350$ K. Vrijedi $w_n \gg L_p$ i $w_p \gg L_n$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,6$ V? Pretpostaviti $m=1$

Rješenje: $I_S=2,2\cdot 10^{-10}$ A, $I=94,8$ mA

VJ.8. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5\cdot 10^{15}$ cm⁻³ i $N_A=10^{17}$ cm⁻³. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=700$ cm²/Vs, $\mu_p=320$ cm²/Vs, $\tau_n=0,5$ μs, $\tau_p=0,8$ μs. Površina pn spoja iznosi $S=0,1$ mm². Izračunati struju zasićenja na $T=300$ K. Vrijedi $L_p \gg w_n=1,5$ μm i $L_n \gg w_p=2$ μm. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5$ V? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje: $I_S=4,02\cdot 10^{-13}$ A, $I=0,1$ mA

VJ.9. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5\cdot 10^{15}$ cm⁻³ i $N_A=10^{17}$ cm⁻³. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=600$ cm²/Vs, $\mu_p=300$ cm²/Vs, $\tau_n=0,5$ μs, $\tau_p=0,8$ μs. Površina pn spoja iznosi $S=0,1$ mm². Izračunati struju zasićenja na $T=350$ K. Vrijedi $L_p \gg w_n=1,5$ μm i $L_n \gg w_p=2$ μm. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5$ V? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje: $I_S=5,1\cdot 10^{-10}$ A, $I=8$ mA

VJ.10. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5\cdot 10^{17}$ cm⁻³ i $N_A=10^{16}$ cm⁻³. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=800$ cm²/Vs, $\mu_p=280$ cm²/Vs, $\tau_n=0,8$ μs, $\tau_p=0,4$ μs. Površina pn spoja iznosi $S=0,1$ mm². Izračunati struju zasićenja na $T=300$ K. Vrijedi $L_p \gg w_n=2$ μm i $L_n \ll w_p$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5$ V? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje: $I_S=1,95\cdot 10^{-14}$ A, $I=4,87$ μA

VJ.11. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=10^{16}$ cm⁻³ i $N_A=5\cdot 10^{17}$ cm⁻³. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=500$ cm²/Vs, $\mu_p=350$ cm²/Vs, $\tau_n=0,4$ μs, $\tau_p=0,8$ μs. Površina pn spoja iznosi $S=0,1$ mm². Izračunati struju zasićenja na $T=300$ K. Vrijedi $L_p \gg w_n=2$ μm i $L_n \ll w_p$. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5$ V? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje: $I_S=1,53\cdot 10^{-13}$ A, $I=38$ μA

VJ.12. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5\cdot 10^{15}$ cm⁻³ i $N_A=5\cdot 10^{17}$ cm⁻³. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=500$ cm²/Vs, $\mu_p=300$ cm²/Vs, $\tau_n=0,5$ μs, $\tau_p=1$ μs. Površina pn spoja iznosi $S=0,1$ mm². Izračunati struju zasićenja na $T=300$ K. Vrijedi $L_p \ll w_n$ μm i $L_n \gg w_p=1$ μm. Kolika struja poteče kroz diodu kad se na nju priključi napon $U=0,5$ V? Pretpostaviti $m=1$.

Rješenje: $I_S=2,74\cdot 10^{-14}$ A, $I=6,84$ μA

VJ.13. Koncentracije primjesa na n i p strani diode iznose $N_D=5\cdot 10^{15}$ cm⁻³ i $N_A=5\cdot 10^{17}$ cm⁻³. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n=400$ cm²/Vs, $\mu_p=250$ cm²/Vs, $\tau_n=0,5$ μs, $\tau_p=1$ μs. Površina pn spoja iznosi $S=0,1$ mm². Izračunati struju zasićenja na $T=350$ K. Vrijedi

$L_p \ll w_n$ μm i $L_n \gg w_p = 1 \mu\text{m}$. Kolika struja poteće kroz diodu kad se na nju priključi napon $U = 0,5 \text{ V}$? Pretpostaviti $m = 1$.

Rješenje: $I_s = 3,11 \cdot 10^{-11} \text{ A}$, $I = 0,49 \text{ mA}$

VJ.14. Struja zasićenja neke pn -diode iznosi 10 pA . Serijski otpor neutralnih p i n strana iznose redom 5 i 10Ω . Koliki napon treba priključiti na stezaljke diode da kroz nju poteće struja 10 mA . $T = 300 \text{ K}$.

Rješenje: $U = 0,686 \text{ V}$

VJ.15. Struja zasićenja neke pn -diode na $T = 350$ iznosi 1 nA . Serijski otpor neutralnih p i n strana iznose redom 5 i 10Ω . Koliki napon treba priključiti na stezaljke diode da na zadanoj temperaturi kroz nju poteće struja 10 mA .

Rješenje: $U = 0,636 \text{ V}$

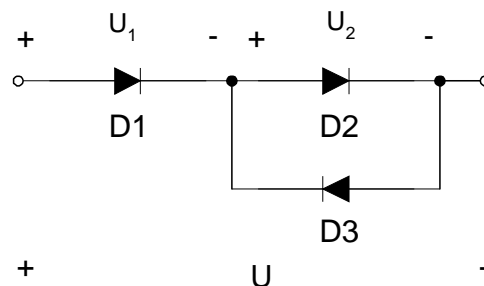
VJ.16. Struja zasićenja neke pn -diode iznosi 10 pA . Serijski otpor diode iznosi 15Ω . Koliki napon moramo priključiti na diodu da bi potekla struja $i_D = 1,5 [mA] + 0,25 \sin(\omega t) [mA]$? Uzeti $T = 300 \text{ K}$.

Rješenje: $u_D = 0,509 [V] + 8,1 \cdot \sin(\omega t) [mV]$

VJ.17. Struja zasićenja neke pn -diode iznosi 10 pA . Serijski otpor diode iznosi 12Ω . Koliki napon moramo priključiti na diodu da bi potekla struja $i_D = 2,5 [mA] + 0,35 \sin(\omega t) [mA]$? Uzeti $T = 300 \text{ K}$.

Rješenje: $u_D = 0,53 [V] + 7,8 \cdot \sin(\omega t) [mV]$

VJ.18. Na spoj dioda priključen je napon $U = 65 \text{ mV}$. Izračunati napone U_1 i U_2 ako za struje zasićenja dioda vrijedi $I_{S1} = I_{S2} = 10 \text{ pA}$ i $I_{S3} = 20 \text{ pA}$. Uzeti $U_T = 25 \text{ mV}$ i $m = 1$.



Rješenje: $U_2 = 27,94 \text{ mV}$; $U_1 = 37,06 \text{ mV}$