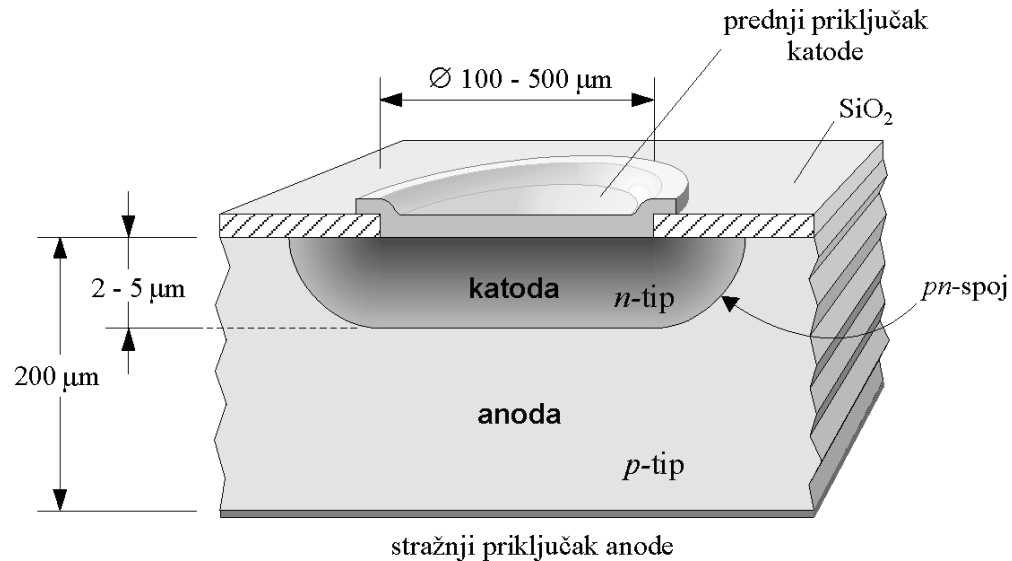


Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

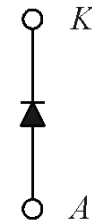
Elektronika 1

3. Poluvodičke diode

Struktura *pn*-diode

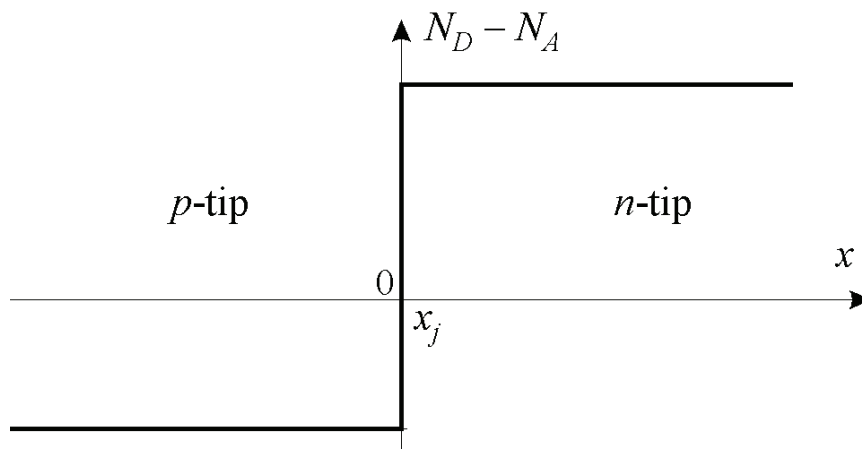


tehnološki presjek



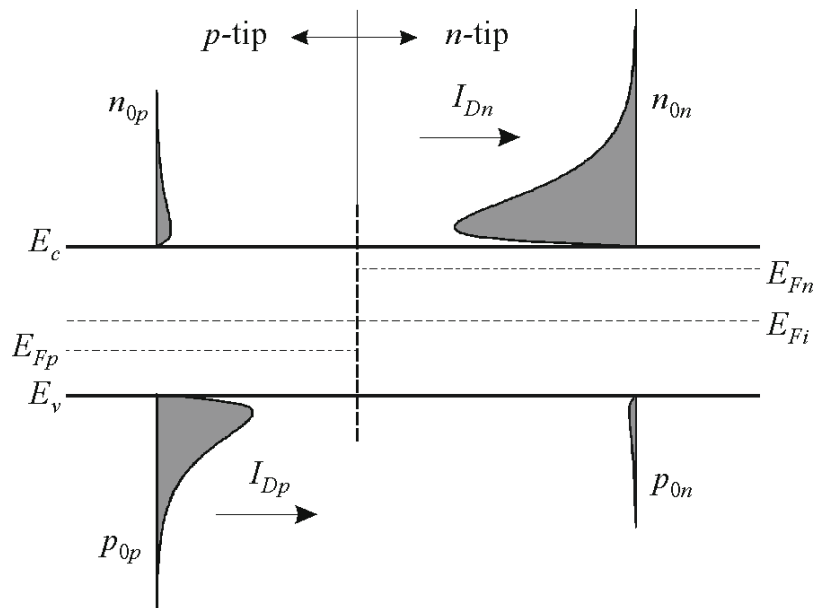
električki simbol

Skokovita raspodjela primjesa



Jednodimenzionalna raspodjela primjesa duž osi x postavljene okomito na pločicu silicija

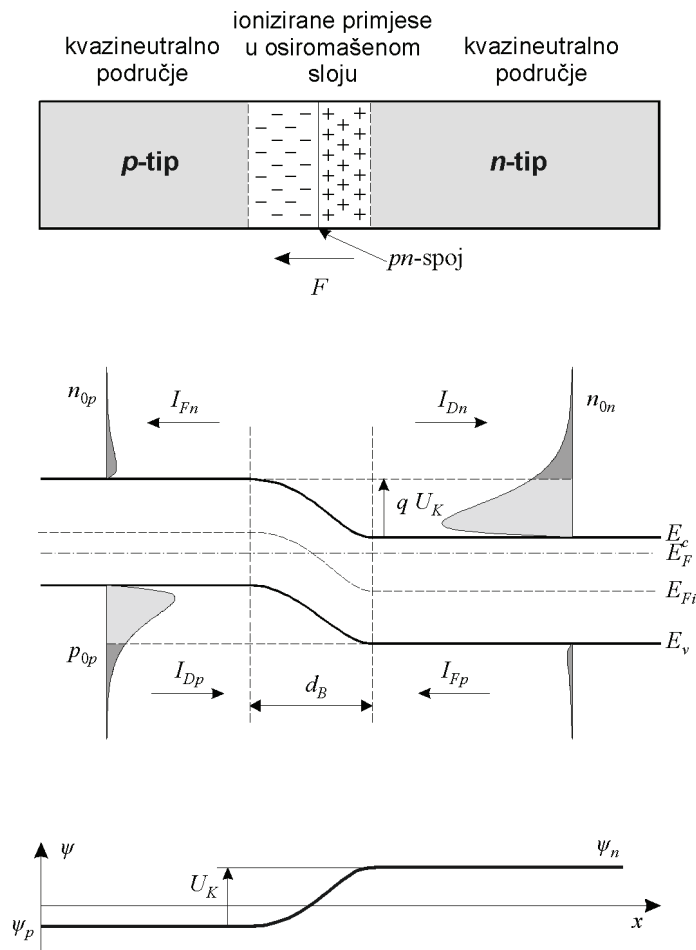
Energetski dijagram prije uspostavljanja kontakta



Nakon uspostave kontakta:

- ❑ Velika razlika koncentracija nosilaca → difuzija većinskih nosilaca (struje I_{Dn} i I_{Dp})
- ❑ Na drugoj strani rekombinacija s manjinskim nosiocima → **osiromašeni sloj**

pn-spoj u ravnoteži



- ❑ U osiromašenom sloju – prostorni naboj ioniziranih primjesa → električno polje F
- ❑ Električno polje $F \rightarrow$ drift manjinskih nosilaca (struje I_{Fn} i I_{Fp})
- ❑ U ravnoteži:

$$I_n = I_{Dn} - I_{Fn} = 0$$

$$I_p = I_{Dp} - I_{Fp} = 0$$

$$I = I_n + I_{Fp} = 0$$

Fermijeva energija E_F konstantna

Kontaktни potencijal (1)

Prostorni naboj uzrokuje razliku potencijala – **kontaktни potencijal** U_K

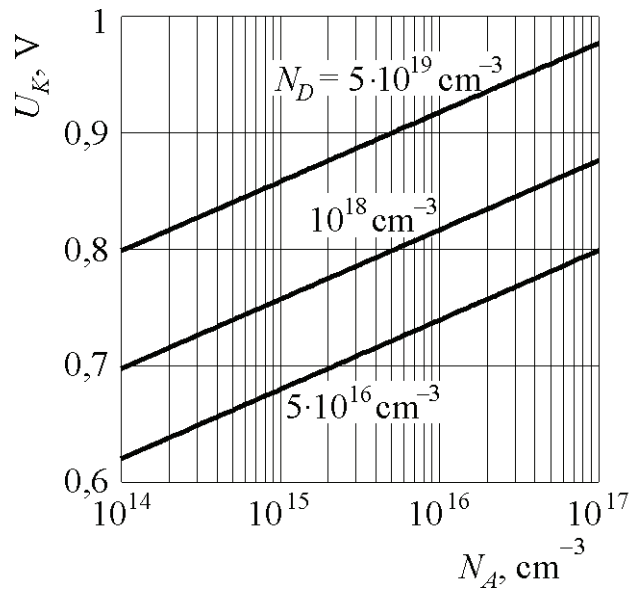
$$E_{Fn} - E_{Fp} = E_T \ln\left(\frac{n_{0n}}{n_i}\right) + E_T \ln\left(\frac{p_{0p}}{n_i}\right)$$

$$U_K = \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q} = U_T \ln\left(\frac{n_{0n} p_{0p}}{n_i^2}\right)$$

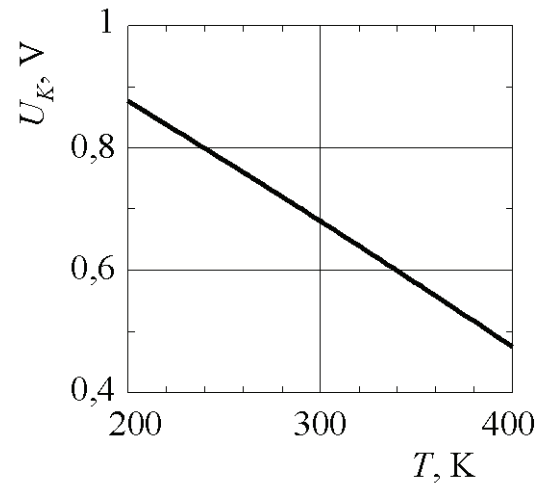
U ekstrinzičnom temperaturnom području

$$U_K = U_T \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

Kontaktni potencijal (2)



$T = 300 \text{ K}$



$N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Primjer 3.1

Koncentracije primjesa silicijskog pn -spoja sa skokovitom raspodjelom primjesa na pn -spoju su $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ na p -strani i $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ na n -strani. Izračunati kontaktni potencijal na temperaturama $T_1 = 300 \text{ K}$ i $T_2 = 350 \text{ K}$.

Rješenje:

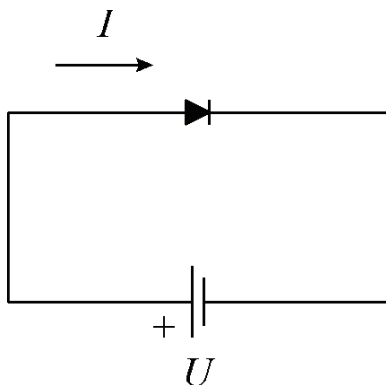
$$\text{za } T_1 = 300 \text{ K} \rightarrow n_{i1} = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad \text{za } T_2 = 350 \text{ K} \rightarrow n_{i2} = 4,96 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{Za obje temperature vrijedi } N_A, N_D \gg n_i \rightarrow U_K = U_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

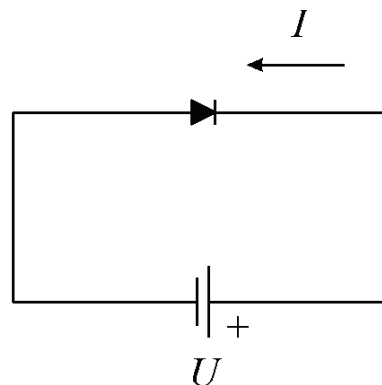
$$\text{za } T_1 = 300 \text{ K} \quad U_{K1} = U_{T1} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_{i1}^2} \right) U_K = \frac{300}{11600} \cdot \ln \left(\frac{10^{17} \cdot 10^{15}}{1,45^2 \cdot 10^{20}} \right) = 0,695 \text{ V}$$

$$\text{za } T_2 = 350 \text{ K} \quad U_{K2} = U_{T2} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_{i2}^2} \right) U_K = \frac{350}{11600} \cdot \ln \left(\frac{10^{17} \cdot 10^{15}}{4,96^2 \cdot 10^{22}} \right) = 0,598 \text{ V}$$

Polarizacija *pn*-spoja – priključak vanjskog napona



$$U_{AK} > 0$$

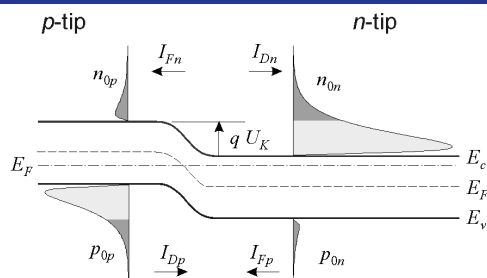


$$U_{AK} < 0$$

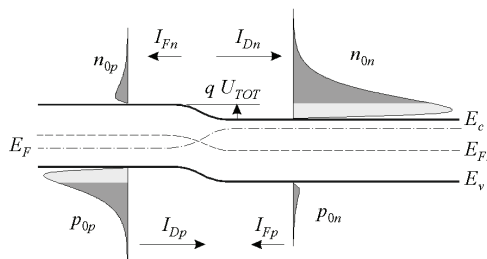
Ukupni napon u osiromašenom sloju: $U_{TOT} = U_K - U_{AK}$

Polarizacija *pn*-spoja – energetski dijagrami

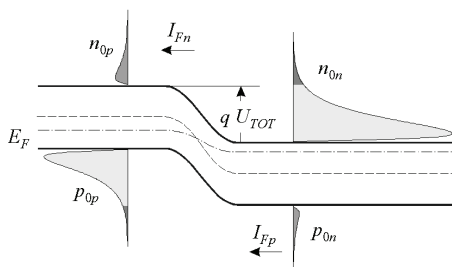
$$U_{AK} = 0$$



$$U_{AK} > 0$$



$$U_{AK} < 0$$



Polarizacija pn-spoja – vrste polarizacija

$U_{AK} > 0$ – sniženje barijere – povećana difuzija većinskih nosilaca

$$I_n = I_{Dn} - I_{Fn} \approx I_{Dn}$$

$$I_p = I_{Dp} - I_{Fp} \approx I_{Dp}$$

$$I = I_n + I_{Fp} \approx I_{Dn} + I_{Dp}$$

povećanjem U_{AK} struja raste – **propusna polarizacija**

$U_{AK} < 0$ – povećanje barijere – samo drift manjinskih nosilaca

$$I_n = I_{Dn} - I_{Fn} \approx -I_{Fn}$$

$$I_p = I_{Dp} - I_{Fp} \approx -I_{Fp}$$

$$I = I_n + I_{Fp} \approx -I_{Fn} - I_{Fp}$$

promjenom U_{AK} struja je mala i ne mijenja se – **zaporna polarizacija**

Osiromašeni sloj

Raspodjela električnog polja $F(x)$ i potencijala $\psi(x)$ – rješavanjem **Poissonove** **jednadžbe**

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{dF}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon'_r \quad \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad \varepsilon'_{Si} = 11,7$$

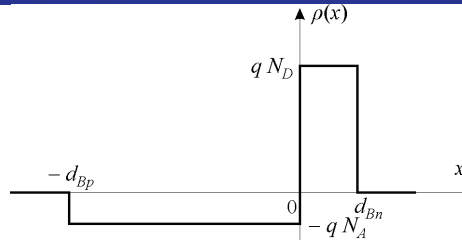
Prostorni naboj

$$\rho(x) = \begin{cases} -q N_A & \text{za } -d_{Bp} \leq x < 0 \\ q N_D & \text{za } 0 < x \leq d_{Bn} \end{cases}$$

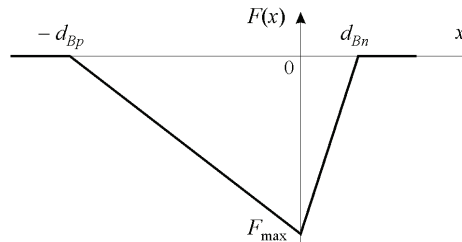
$-d_{Bp}$ i d_{Bn} – granice osiromašenog sloja na p - i n -strani

Osiromašeni sloj – raspodjele

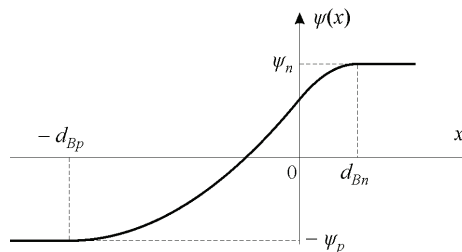
prostorni naboj



električno polje



potencijal



Osiromašeni sloj – raspodjela električnog polja

1. integracija Poissonove jednadžbe uz rubne uvjete $F(-d_{Bp}) = F(d_{Bn}) = 0$

$$F(x) = \begin{cases} -\frac{q N_A}{\varepsilon} (x + d_{Bp}) & \text{za } -d_{Bp} \leq x \leq 0 \\ \frac{q N_D}{\varepsilon} (x - d_{Bn}) & \text{za } 0 \leq x \leq d_{Bn} \end{cases}$$

za $x = 0$ – maksimalni iznos električnog polja

$$F(0_-) = -\frac{q N_A}{\varepsilon} d_{Bp} = F(0_+) = -\frac{q N_D}{\varepsilon} d_{Bn} = F_{\max}$$

Osiromašeni sloj – širine pojedinih strana

Neutralnost prostornog naboja

$$q N_A d_{Bp} = q N_D d_{Bn}$$

Ukupna širina osiromašenog sloja

$$d_B = d_{Bp} + d_{Bn}$$

Širine na p - i n -strani

$$d_{Bp} = d_B \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

$$d_{Bn} = d_B \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

Osiromašeni sloj – raspodjela potencijala

2. integracija Poissonove jednačbe uz rubne uvjete $\psi(-d_{Bp}) = \psi_p$, $\psi(d_{Bn}) = \psi_n$

$$\psi(x) = \begin{cases} \psi_p + \frac{q N_A}{2 \varepsilon} (x + d_{Bp})^2 & \text{za } -d_{Bp} \leq x \leq 0 \\ \psi_n - \frac{q N_D}{2 \varepsilon} (x - d_{Bn})^2 & \text{za } 0 \leq x \leq d_{Bn} \end{cases}$$

za $x = 0$ – potencijal mora biti kontinuirana funkcija

$$\psi(0_-) = \psi_p + \frac{q N_A}{2 \varepsilon} d_{Bp}^2 = \psi(0_+) = \psi_n - \frac{q N_D}{2 \varepsilon} d_{Bn}^2 = \psi_0$$

Širina osiromašenog sloja

Širina osiromašenog sloja

$$d_B = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} U_{TOT}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) U_{TOT}}$$

$$U_{TOT} = \psi_n - \psi_p = U_K - U_{AK}$$

Maksimalno električno polje

$$F_{\max} = - \frac{2U_{TOT}}{d_B}$$

Primjer 3.2 (1)

Koncentracije primjesa silicijskog pn -spoja sa skokovitom raspodjelom primjesa su $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ na p -strani i $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ na n -strani. Izračunati ukupnu širinu osiromašenog sloja, širine osiromašenog sloja na pojedinim stranama pn -spoja, te maksimalno električno polje u osiromašenom sloju za napone spojene između anode i katode $U_1 = 0$, $U_2 = 0,5 \text{ V}$ i $U_3 = -5 \text{ V}$. Temperatura je sobna, $T = 300 \text{ K}$.

Rješenje:

$$d_B = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) U_{TOT}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{10^{15}} + \frac{1}{10^{17}} \right) U_{TOT}}$$

$$d_{Bp} = d_B \frac{N_D}{N_A + N_D} = d_B \cdot \frac{10^{17}}{10^{15} + 10^{17}}$$

$$d_{Bn} = d_B \frac{N_A}{N_A + N_D} = d_B \cdot \frac{10^{15}}{10^{15} + 10^{17}}$$

Primjer 3.2 (1)

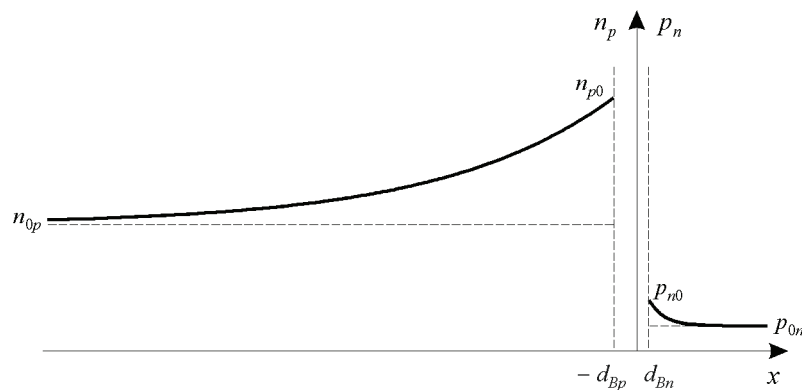
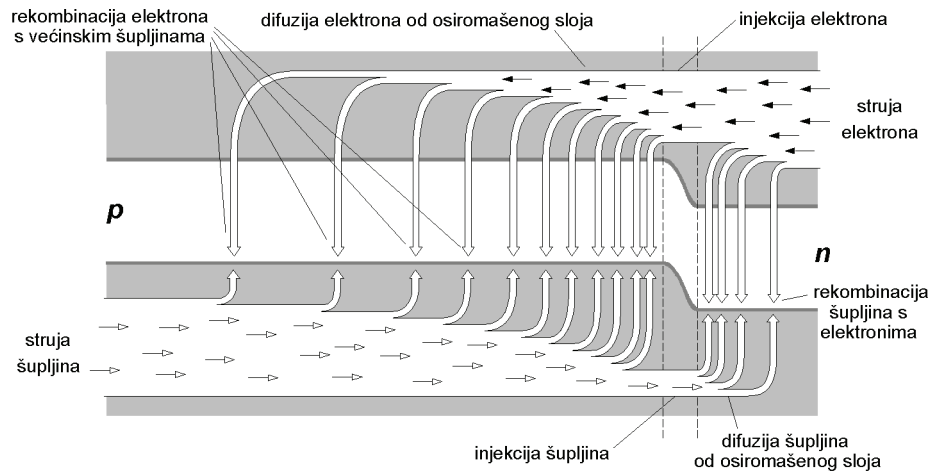
$$F_{\max} = -\frac{2U_{TOT}}{d_B}$$

$$U_{TOT} = U_K - U_{AK} = U_K - U$$

Iz primjera 3.1 – $U_K = 0,695 \text{ V}$

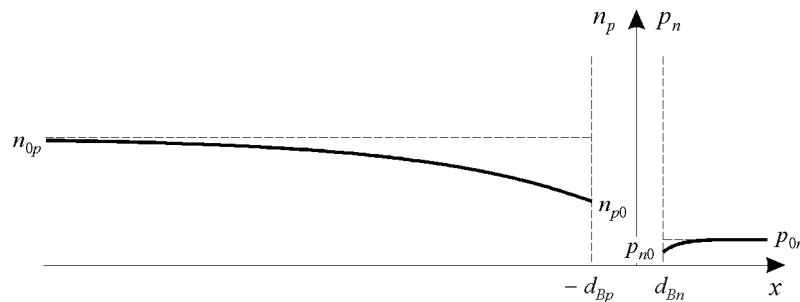
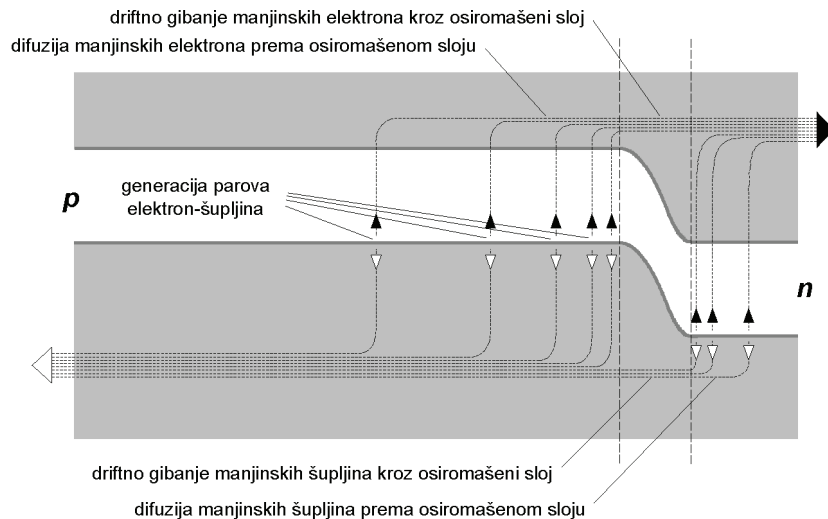
$U, \text{ V}$	$U_{TOT}, \text{ V}$	$d_B, \mu\text{m}$	$d_{Bp}, \mu\text{m}$	$d_{Bn}, \mu\text{m}$	$F_{\max}, \text{ kV/cm}$
0	0,695	0,953	0,944	$9,44 \cdot 10^{-3}$	– 14,6
0,5	0,195	0,505	0,500	$5,00 \cdot 10^{-3}$	– 7,73
– 5	5,695	2,73	2,70	$2,70 \cdot 10^{-2}$	– 41,8

Propusno polarizirani pn-spoj



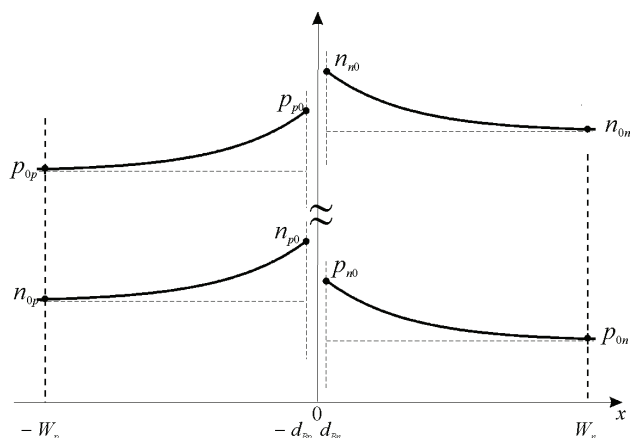
- ❑ Propusna polarizacija – snižava se barijera – **injekcija nosilaca**
- ❑ Porast koncentracija manjinskih nosilaca uz rub osiromašenog sloja – n_{p0} i p_{n0}
- ❑ Narušena ravnoteža – pojačana rekombinacija nosilaca – koncentracije manjinskih nosilaca padaju prema dubini kvazineutralnih područja

Zaporno polarizirani *pn*-spoj



- ❑ Zaporna polarizacija – povećava se barijera – *pn*-spoj prolaze samo manjinski nosioci
- ❑ Smanjenje koncentracija manjinskih nosilaca uz rub osiromašenog sloja – n_{p0} i p_{n0}
- ❑ Narušena ravnoteža – pojačana generacija nosilaca

Rubne koncentracije manjinskih i većinskih nosilaca



U kvazineutralnim područjima – električka
neutralnost – koncentracije nosilaca uz
rubove osiromašenog sloja

za n -stranu

$$p_{n0} - p_{0n} = n_{n0} - n_{0n} \rightarrow$$

$$n_{n0} = n_{0n} + p_{n0} - p_{0n} \approx n_{0n} + p_{n0}$$

za $p_{n0} \ll n_{0n}$ – **niska injekcija**

ako je p_{n0} sumjerljiva s n_{0n} – **visoka injekcija**

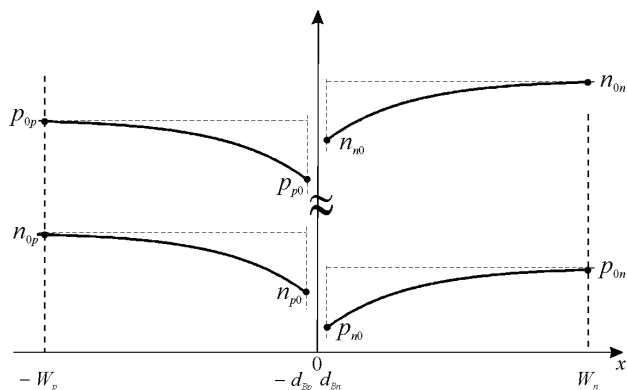
za p -stranu

$$n_{p0} - n_{0p} = p_{p0} - p_{0p} \rightarrow$$

$$p_{p0} = p_{0p} + n_{p0} - n_{0p} \approx p_{0p} + n_{p0}$$

za $n_{p0} \ll p_{0p}$ – **niska injekcija**

ako je n_{p0} sumjerljiva s p_{0p} – **visoka injekcija**



Rubni uvjeti – Boltzmannove jednačbe

Uz rub osiromašenog sloja

$$n_{p0} = n_{0p} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) \quad p_{n0} = p_{0n} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

Na drugim krajevima kvazineutralnih područja – na metalnim priključcima

$$\text{na } p\text{-strani} \quad p_p(-W_p) = p_{0p} \quad n_p(-W_p) = n_{0p}$$

$$\text{na } p\text{-strani} \quad n_n(W_n) = n_{0n} \quad p_n(W_n) = p_{0n}$$

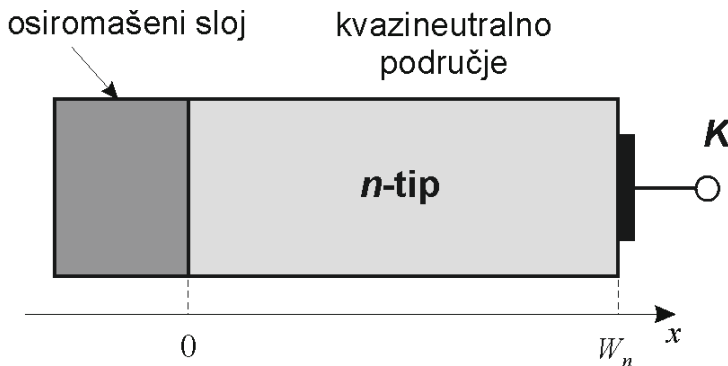
Raspodjela šupljina na n -strani (1)

Jednadžba kontinuiteta manjinskih šupljina na n -strani

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x}$$

U stacionarnom stanju ($\partial p_n / \partial t = 0$), a u niskoj injekciji struja J_p je difuzijska struja $J_p = J_{Dp} = -q D_p dp_n / dx$

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{0n}}{D_p \tau_p} = 0$$



rubni uvjeti:

$$p_n(0) = p_{n0}$$

$$p_n(W_n) = p_{0n}$$

Raspodjela šupljina na n -strani (2)

Raspodjela manjinskih šupljina na n -strani ($0 \leq x \leq W_n$)

$$p_n(x) = p_{0n} + (p_{n0} - p_{0n}) \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{W_n - x}{L_p}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{W_n}{L_p}\right)} \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} - \text{difuzijska duljina}$$

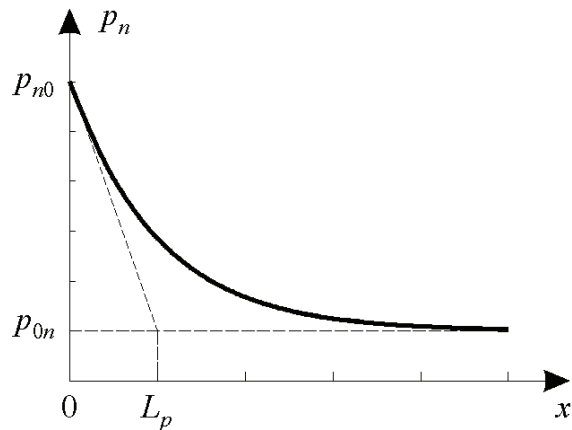
Za široku n -stranu - $W_n \gg L_p$

$$p_n(x) = p_{0n} + (p_{n0} - p_{0n}) \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

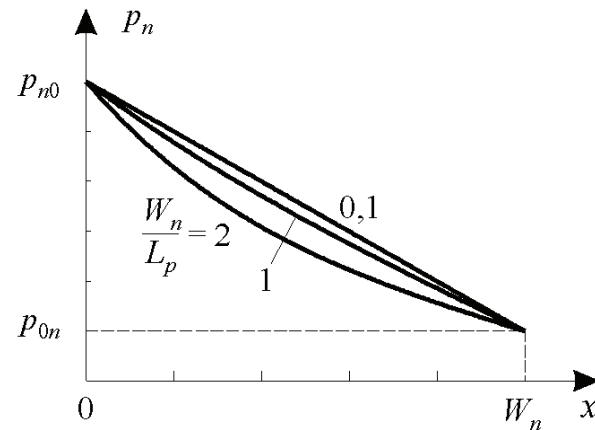
Za usku n -stranu - $W_n \ll L_p$

$$p_n(x) = p_{0n} + (p_{n0} - p_{0n}) \frac{W_n - x}{W_n}$$

Raspodjela šupljina na n -strani (3)



široka n -strana



uska n -strana

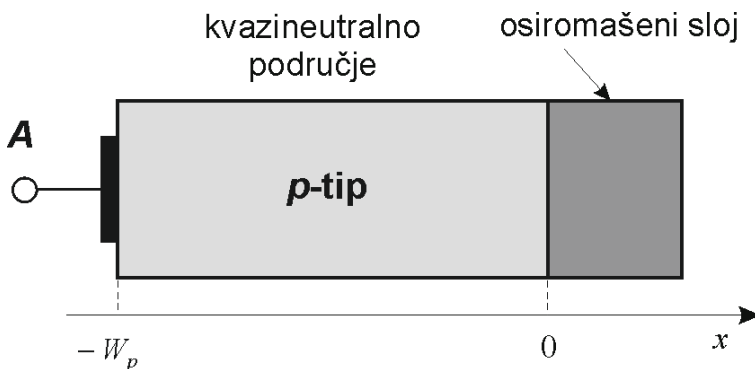
Raspodjela elektrona na *p*-strani (1)

Jednadžba kontinuiteta manjinskih elektrona na *p*-strani

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\frac{n_p - n_{0p}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x}$$

U stacionarnom stanju ($\partial n_p / \partial t = 0$), a u niskoj injekciji struja J_n je difuzijska struja $J_n = J_{Dn} = q D_n dn_p / dx$

$$\frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{0p}}{D_n \tau_n} = 0$$



rubni uvjeti:

$$n_p(0) = n_{p0}$$

$$n_p(-W_p) = n_{0p}$$

Raspodjela elektrona na *p*-strani (2)

Raspodjela manjinskih elektrona na *p*-strani ($-W_p \leq x \leq 0$)

$$n_p(x) = n_{0p} + (n_{p0} - n_{0p}) \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{W_p + x}{L_n}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{W_p}{L_n}\right)} \quad L_n = \sqrt{D_n \tau_n} - \text{difuzijska duljina}$$

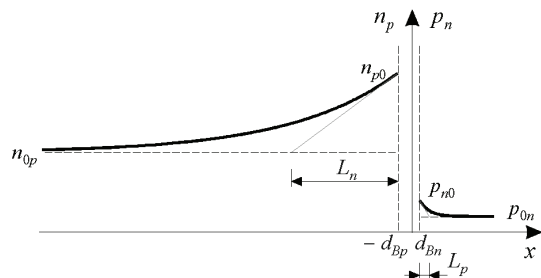
Za široku *p*-stranu - $W_p \gg L_n$

$$n_p(x) = n_{0p} + (n_{p0} - n_{0p}) \exp\left(\frac{x}{L_n}\right)$$

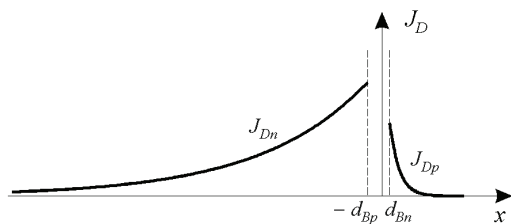
Za usku *p*-stranu - $W_p \ll L_n$

$$n_p(x) = n_{0p} + (n_{p0} - n_{0p}) \frac{W_p + x}{W_p}$$

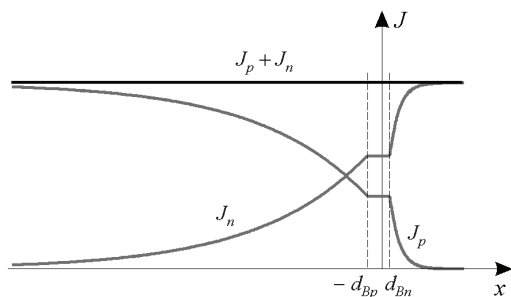
Propusno polarizirani *pn*-spoj – široke strane



manjinski nosioci



difuzijske struje manjinskih nosilaca



ukupne struje – pretpostavka: zanemaruju se rekombinacija i generacija u osiromašenom sloju → **konstantne struje u osiromašenom sloju**

Shockleyeva jednađba – široke strane

Difuzijske struje manjinskih nosilaca uz rubove osiromašenog sloja

$$J_{Dn}(-d_{Bp}) = q D_n \left. \frac{dn_p(x)}{dx} \right|_{-d_{Bp}} = q D_n \frac{n_{p0} - n_{0p}}{L_n}$$

$$J_{Dp}(d_{Bn}) = -q D_p \left. \frac{dp_n(x)}{dx} \right|_{d_{Bn}} = q D_p \frac{p_{n0} - p_{0n}}{L_p}$$

Ukupna struja

$$J = J_{Dn}(-d_{Bp}) + J_{Dp}(d_{Bn}) = q \left(D_n \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \frac{p_{0n}}{L_p} \right) \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$

Shockleyeva jednađba

$$J = J_S \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right] \quad J_S = q \left(D_n \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \frac{p_{0n}}{L_p} \right)$$

Shockleyeva jednađba – uske strane

Difuzijske struje manjinskih nosilaca uz rubove osiromašenog sloja

$$J_{Dn}(-d_{Bp}) = q D_n \left. \frac{dn_p(x)}{dx} \right|_{-d_{Bp}} = q D_n \frac{n_{p0} - n_{0p}}{W_p}$$
$$J_{Dp}(d_{Bn}) = -q D_p \left. \frac{dp_n(x)}{dx} \right|_{d_{Bn}} = q D_p \frac{p_{n0} - p_{0n}}{W_n}$$

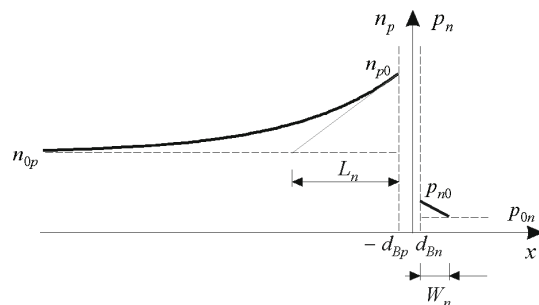
Ukupna struja

$$J = J_{Dn}(-d_{Bp}) + J_{Dp}(d_{Bn}) = q \left(D_n \frac{n_{0p}}{W_p} + D_p \frac{p_{0n}}{W_n} \right) \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$

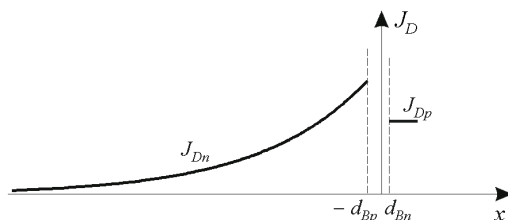
Shockleyeva jednađba

$$J = J_S \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right] \qquad J_S = q \left(D_n \frac{n_{0p}}{W_p} + D_p \frac{p_{0n}}{W_n} \right)$$

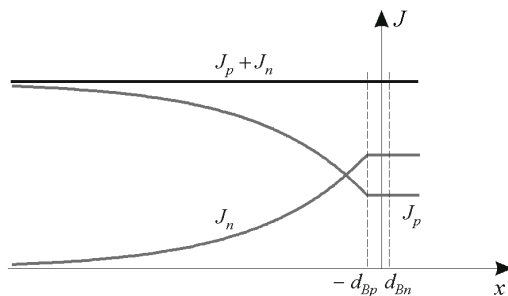
Propusno polarizirani *pn*-spoj – široka *p*-strana i uska *n*-strana



manjinski nosioci



difuzijske struje manjinskih nosilaca



ukupne struje –
$$J_S = q \left(D_n \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \frac{p_{0n}}{W_n} \right)$$

Strujno-naponska karakteristika idealne *pn*-diode

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_S = S J_S$$

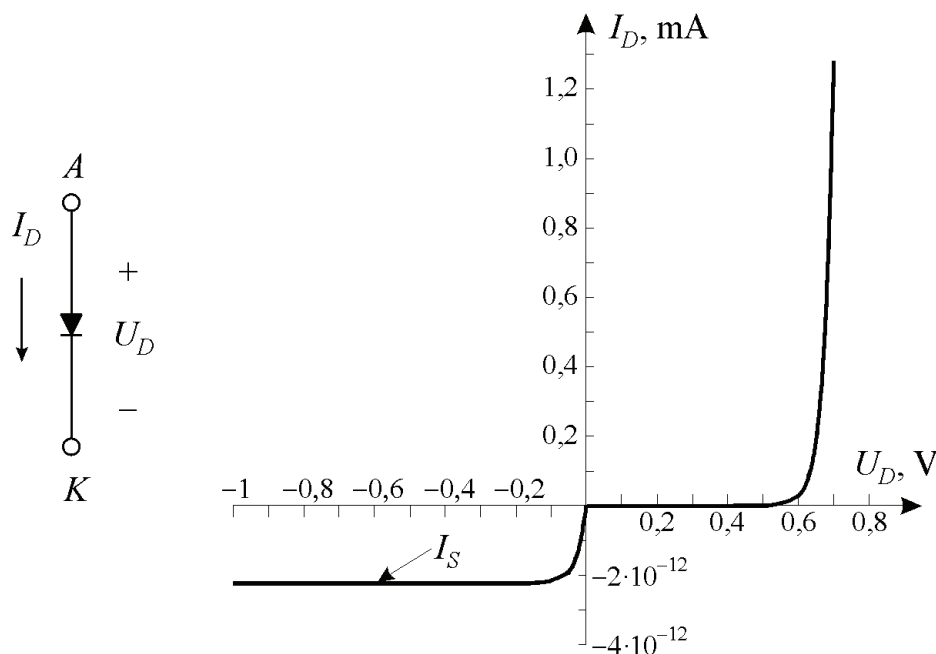
propusna polarizacija

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right)$$

zaporna polarizacija

$$I_D = -I_S$$

I_S – struja zasićenja

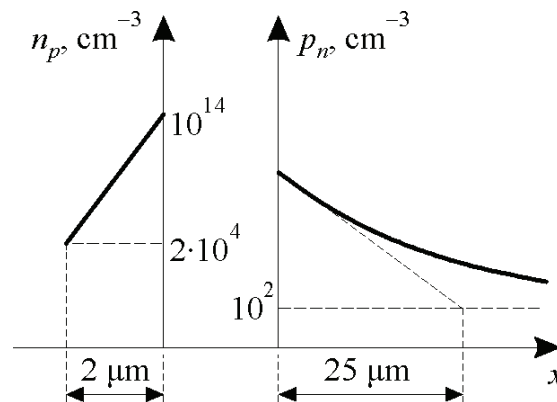


Primjer 3.3 (1)

Na slici su prikazane raspodjele manjinskih nosilaca na p - i n -strani silicijske pn -diode.

Pokretljivosti nosilaca su $\mu_n = 1300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, površina pn -diode je $S = 0,25 \text{ mm}^2$, a temperatura je $T = 300 \text{ K}$. Odrediti:

- napon U_D priključen na pn -diodu,
- struju šupljina koje s p -strane prelaze na n -stranu,
- struju elektrona koji s n -strane prelaze na p -stranu,
- struju zasićenja.



Primjer 3.3 (2)

Rješenje:

$$p_{0n} = 10^2 \text{ cm}^{-3}, \quad n_{0p} = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}, \quad n_{p0} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

Uska p -strana, $W_p = 2 \text{ } \mu\text{m} \ll L_n$ i široku n -strana, $W_n \gg L_p = 25 \text{ } \mu\text{m}$.

a) napon U_D

$$U_D = U_T \ln \frac{n_{p0}}{n_{0p}} = \frac{300}{11600} \ln \frac{10^{14}}{2 \cdot 10^4} = 0,578 \text{ V}$$

b) struja šupljina – difuzijska struja uz rub osiromašenog sloja

$$I_{Dp}(d_{Bn}) = -S q D_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{d_{Bn}} = S q D_p \frac{p_{n0} - p_{0n}}{L_p}$$

$$p_{n0} = p_{0n} \exp \frac{U_D}{U_T} = p_{0n} \frac{n_{p0}}{n_{0p}} = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3} \quad D_p = U_T \mu_p = 3,88 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$I_{Dp}(d_{Bn}) = 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,88 \cdot \frac{5 \cdot 10^{11} - 10^2}{25 \cdot 10^{-4}} = 0,310 \text{ } \mu\text{A}$$

Primjer 3.3 (3)

c) struja elektrona – difuzijska struja uz rub osiromašenog sloja

$$I_{Dn}(-d_{Bp}) = S q D_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{d_{Bn}} = S q D_n \frac{n_{p0} - n_{0p}}{W_p}$$

$$D_n = U_T \mu_n = 33,6 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$I_{Dn}(-d_{Bn}) = 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 33,6 \cdot \frac{10^{14} - 2 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-4}} = 6,72 \text{ mA}$$

d) struja zasićenja

$$\begin{aligned} I_S &= I_{Sn} + I_{Sp} = S \cdot q \cdot \left(\frac{n_{0p} \cdot D_n}{W_p} + \frac{p_{0n} \cdot D_p}{L_p} \right) = \\ &= 1,34 \cdot 10^{-12} + 6,21 \cdot 10^{-17} = 1,34 \text{ pA}. \end{aligned}$$

Primjer 3.4 (1)

Za *pn*-diodu iz zadatka 3.3 izračunati:

- a) struju diode za napone $U_D = -5 \text{ V}, -1 \text{ V}, 0,2 \text{ V}, 0,4 \text{ V}$ i $0,6 \text{ V}$.
- b) napon U_D pri kojemu struja u zapornom smjeru dosegne 90% vrijednosti struje zasićenja I_S .

Korištenjem rezultata iz a) dijela zadatka nacrtati strujno-naponsku karakteristiku diode.

Rješenje:

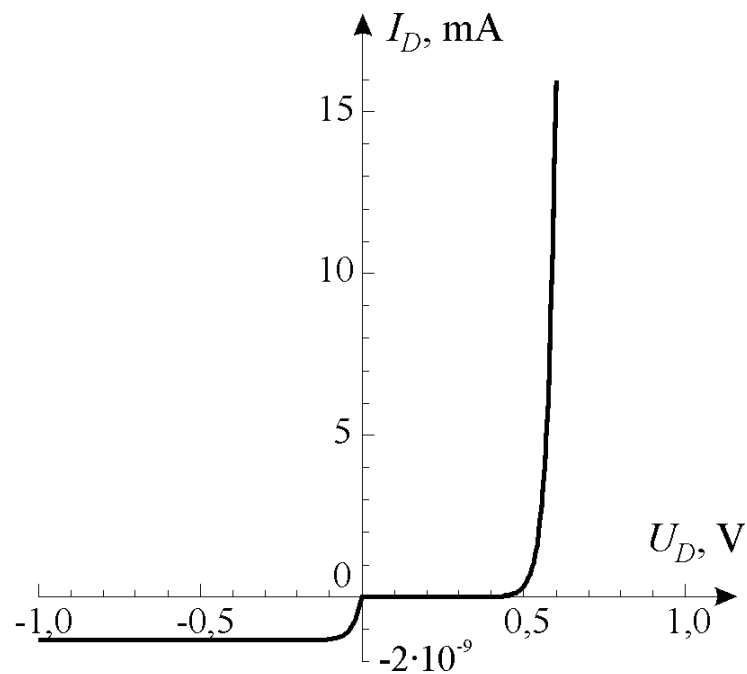
a)
$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right] \quad I_S = 1,34 \text{ pA}.$$

$U_D, \text{ V}$	-5	-1	$0,2$	$0,4$	$0,6$
$I_D, \text{ A}$	$-1,34 \cdot 10^{-12}$	$-1,34 \cdot 10^{-12}$	$3,06 \cdot 10^{-9}$	$6,99 \cdot 10^{-6}$	$15,9 \cdot 10^{-3}$

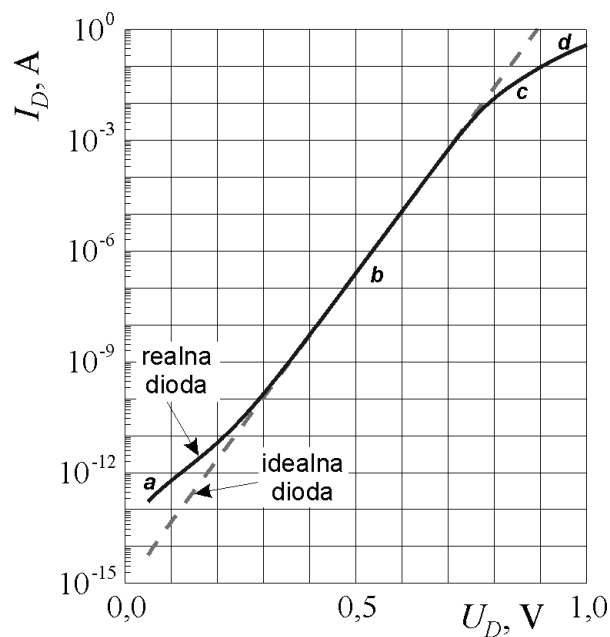
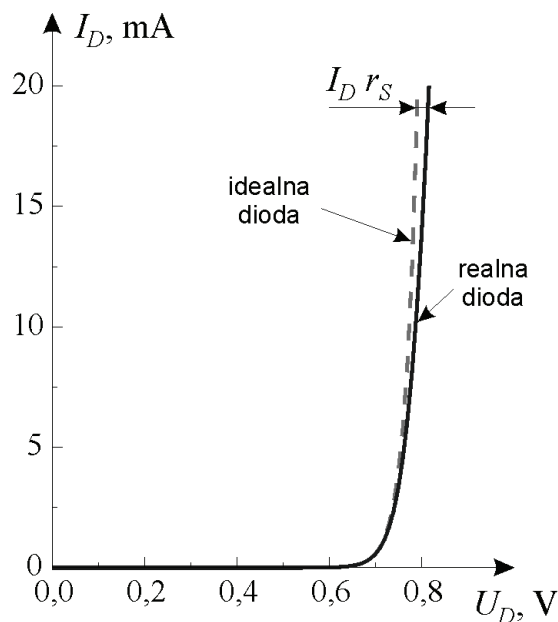
Primjer 3.4 (2)

b)

$$U_D = U_T \ln \left(1 + \frac{I_D}{I_S} \right) = \frac{300}{11600} \cdot \ln \left(1 + \frac{-0,9 \cdot I_S}{I_S} \right) = -59,6 \text{ mV}$$



Realna pn-dioda – propusna karakteristika



b – idealna dioda

c – visoka injekcija

$$I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{U_D}{m U_T} \right) - 1 \right]$$

d – serijski otpor $I_D r_S$

a – niska injekcija –
rekombinacijska
struja
 $I_D \sim \exp (U_D/2U_T)$

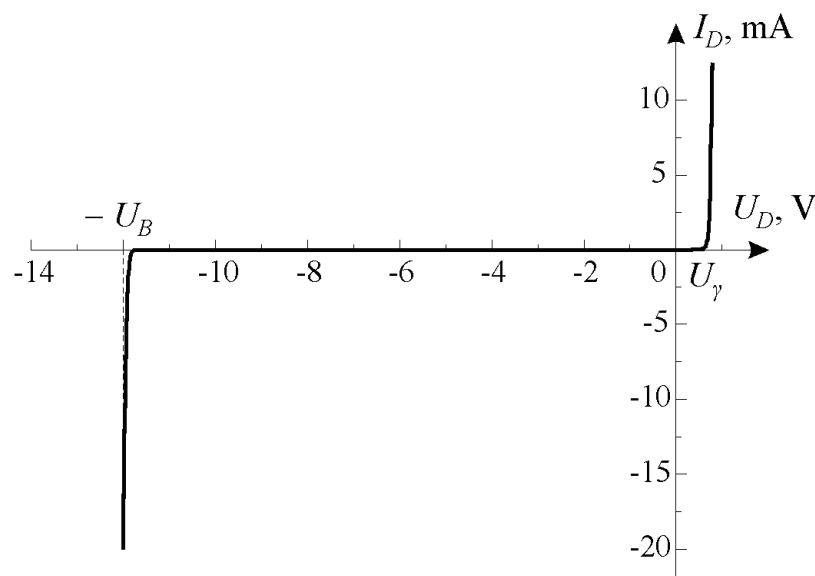
$$\log(I_D) = \log(I_S) + \log(e) \frac{U_D}{U_T}$$

Realna *pn*-dioda – zaporna karakteristika

Zaporna struja: $I_S + I_G$

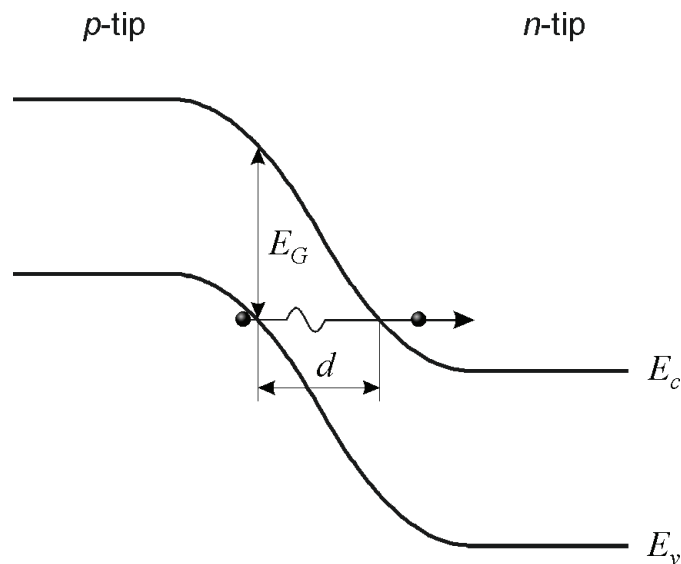
- ❑ struja zasićenja I_S
- ❑ generacijska struja I_G – za silicijske diode $I_G > I_S$

Za više napone zaporne polarizacije – proboj pri probojnom naponu U_B



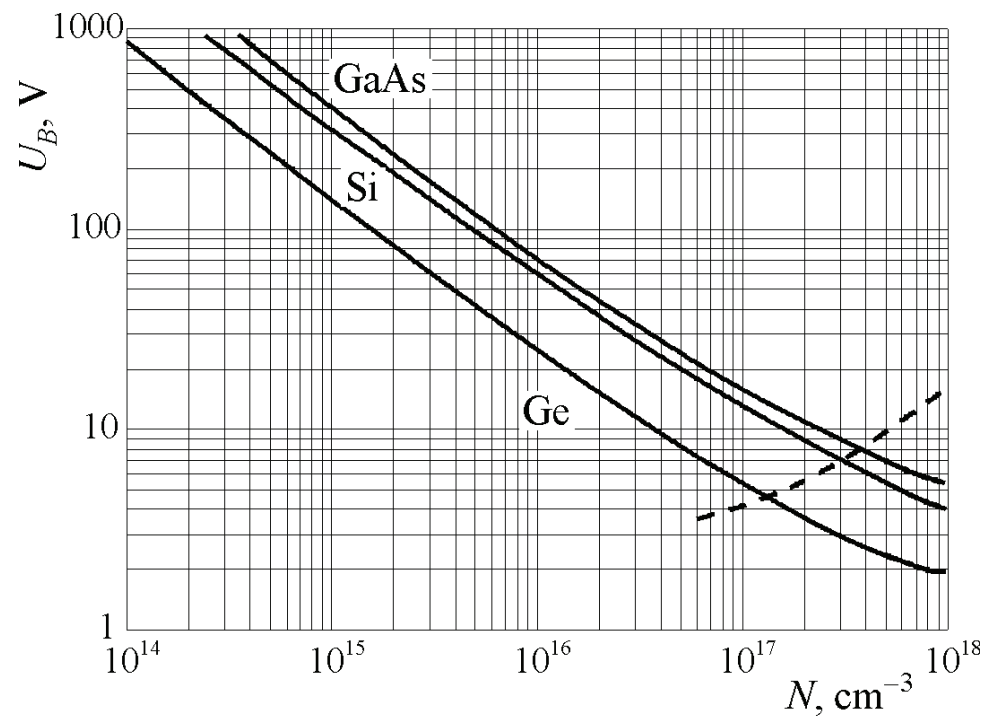
Proboj (1)

- ❑ Lavinski proboj – ionizacija atoma poluvodiča u osiromašenom sloju - za probojne napone $U_B > 8 \text{ V}$
- ❑ Zenerov (tunelski) proboj – u diodama s jako dopiranim stranama – tuneliranje elektrona kroz barijeru – za probojne napone $U_B < 5 \text{ V}$



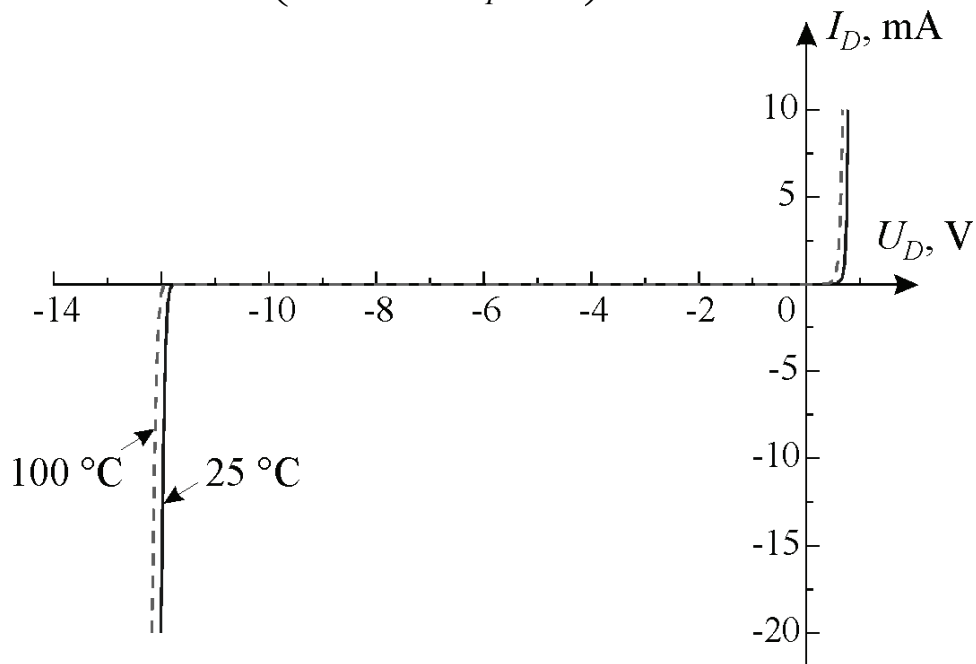
Proboj (2)

U_B – ovisi o koncentraciji primjesa slabije dopirane strane pn -spoja



Temperaturna ovisnost

$$I_S = q n_i^2 S \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$



- propusna polarizacija -
 $\Delta U_D / \Delta T = -1,5 \text{ do } -2,5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$
- zaporna polarizacija –
eksponencijalni rast struje I_S s temperaturom
- proboj –
 - lavinski proboj
 $\Delta U_B / \Delta T > 0$
 - Zenerov proboj
 $\Delta U_B / \Delta T < 0$

Primjer 3.5 (1)

Silicijska *pn*-dioda radi na temperaturi $T = 25^\circ\text{C}$ i pri naponu $U_{D1} = 0,7\text{ V}$ vodi struju $I_{D1} = 2\text{ mA}$. Pri toj struji koeficijent injekcije $m = 1,2$. Koliko će se promijeniti napon diode U_D pri istoj struji diode I_{D1} ako se temperatura poveća za 5°C ? Koliko se pri tome promjeni struja zasićenja diode I_S ?

Rješenje:

$$I_D \gg I_S \rightarrow I_D = I_S \exp\left(\frac{U_D}{mU_T}\right)$$

$$T_1 = 25 + 273 = 298\text{ K} \rightarrow I_{S1} = I_{D1} \exp\left(-\frac{U_{D1}}{mU_{T1}}\right) = 0,28\text{ pA}$$

$$T_2 = T_1 + 5 = 303\text{ K}$$

$$n_i(T) = C_1 T^{3/2} \exp\left(-\frac{E'_{G0}}{2kT}\right) \quad I_S(T) \sim n_i^2(T)$$

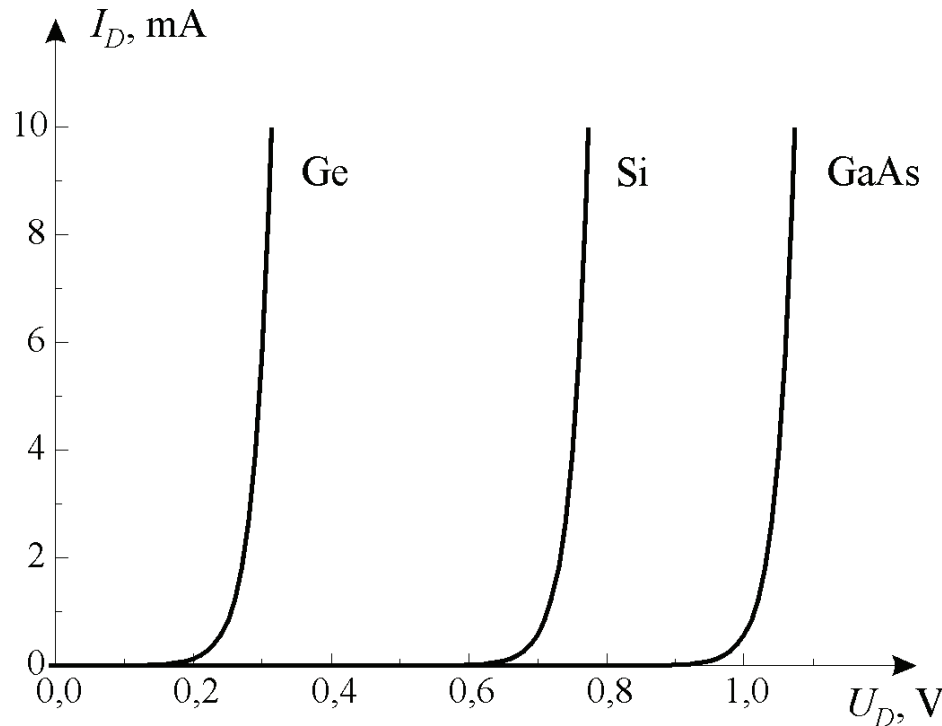
Primjer 3.5 (2)

$$\begin{aligned}\frac{I_{S2}}{I_{S1}} &= \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^3 \exp\left[\frac{E'_{G0}}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = \\ &= \left(\frac{303}{298}\right)^{3/2} \exp\left[\frac{1,196}{8,620 \cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{303}\right)\right] = 2,27.\end{aligned}$$

$$I_{S2} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_{S1} = 2,27 \cdot 0,28 = 0,64 \text{ pA}$$

$$U_{D2} = m U_T \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_{S2}}\right) = 1,2 \cdot \frac{303}{11600} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,64 \cdot 10^{-12}}\right) = 0,685 \text{ V}$$

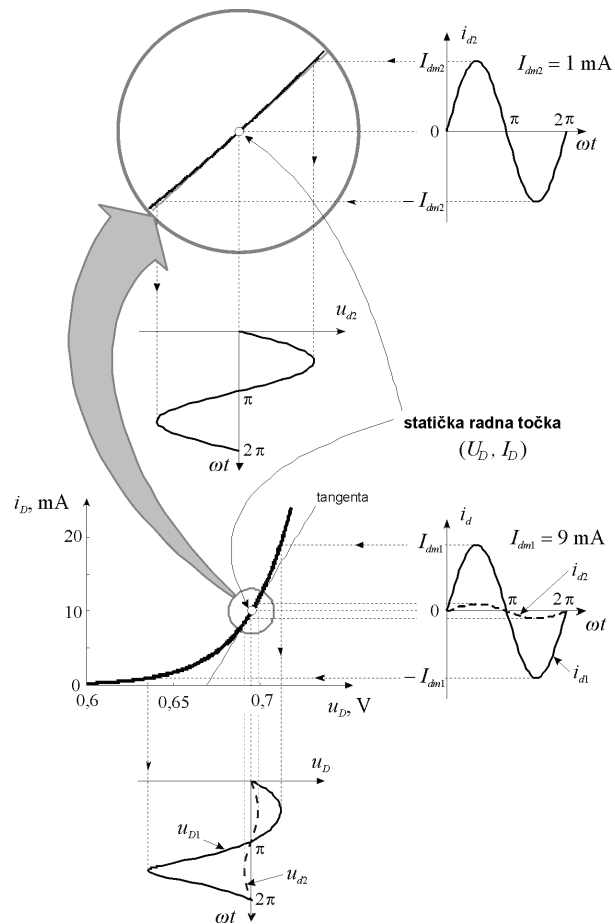
pn-diode različitih poluvodiča



propusna polarizacija - napon koljena veći je kod poluvodiča sa širim zabranjenim pojasom

zaporna polarizacija – struje zasićenja I_S manje su kod poluvodiča s manjom intrinzičnom koncentracijom
 $I_S(\text{GaAs}) < I_S(\text{Si}) < I_S(\text{Ge})$

Dinamička svojstva *pn*-diode



struja $i_D(t) = I_D + i_d(t)$

$$i_d(t) = I_{dm} \sin \omega t$$

statička radna točka – $I_D = 10$ mA

□ $I_{dm1} = 9$ mA – režim velikog signala

□ $I_{dm2} = 1$ mA – režim malog signala

dinamički parametri – u režimu malog signala

Dinamički otpor

grafički postupak

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$$

analitički postupak

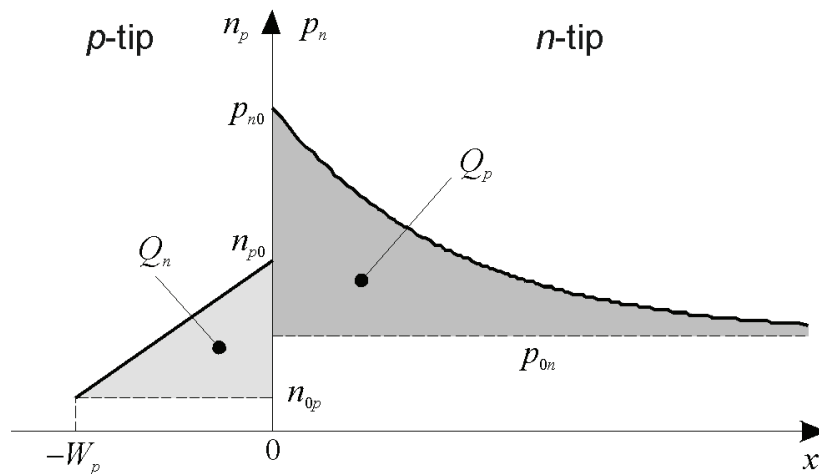
$$r_d = \frac{du_D}{di_D}$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \frac{di_D}{du_D} = \frac{I_S \exp(U_D / U_T)}{U_T} = \frac{I_D + I_S}{U_T}$$

g_d – dinamička vodljivost

$$r_d = \frac{U_T}{I_D + I_S}$$

Nakrcani naboj manjinskih nosilaca



$$Q_p = q S \int_0^{\infty} [p_n(x) - p_{0n}] dx = q S (p_{n0} - p_{0n}) L_p$$

$$Q_n = q S \int_{-W_p}^0 [n_p(x) - n_{0p}] dx = q S \frac{(n_{p0} - n_{0p}) W_p}{2}$$

$$I_p = Q_p \frac{D_p}{L_p^2} = \frac{Q_p}{\tau_p}$$

$$I_n = Q_n \frac{2 D_n}{W_p^2} = \frac{Q_p}{t_n}$$

t_n – vrijeme proleta

Primjer 3.6

Za pn -diodu iz zadatka 3.3 izračunati nakrcani naboj manjinskih nosilaca na p - i n -strani spoja.

Rješenje:

$$Q_n = q S \frac{(n_{p0} - n_{0p}) W_p}{2} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(10^{14} - 2 \cdot 10^4) \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2} = 4 \text{ pAS}$$

$$t_n = \frac{W_p^2}{2 D_n} = \frac{(2 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 33,6} = 0,60 \text{ ns}$$

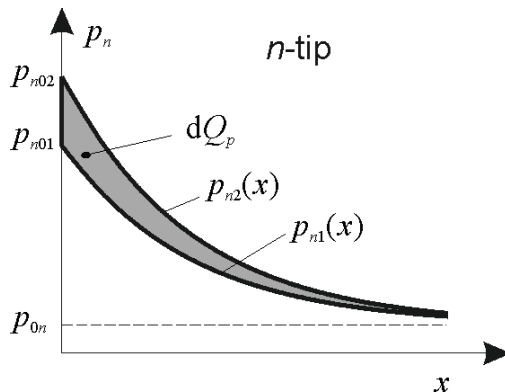
$$Q_p = q S (p_{n0} - p_{0n}) L_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot (5 \cdot 10^{11} - 10^2) \cdot 25 \cdot 10^{-4} = 0,5 \text{ pAS}$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} = \frac{(25 \cdot 10^{-4})^2}{3,88} = 1,6 \text{ } \mu\text{s}$$

Difuzijski kapacitet

Određuje ga promjena nakrcanog naboja manjinskih nosilaca s naponom

$$C_d = \frac{dQ}{dU_D} = \frac{dQ}{dI_D} \frac{dI_D}{dU_D}$$



Za $Q_n \ll Q_p \approx Q$ i $I_n \ll I_p \approx I_D$

$$C_d = \frac{dQ_p}{dU_D} = \frac{dQ_p}{dI_p} \frac{dI_D}{dU_D} = \tau_p g_d$$

Točan izraz – iz vremenski promjenjive jednadžbe kontinuiteta

$$C_d = g_d \frac{\tau}{2}$$

τ – vrijeme života manjinskih nosilaca
slabije dopirane strane

Primjer 3.7

Silicijska pn -dioda ima n -stranu mnogo veće specifične vodljivosti od p -strane. Vrijeme života elektrona na p -strani iznosi $\tau = 2 \mu\text{s}$. Izračunati dinamički otpor i difuzijski kapacitet ako je istosmjerna struja diode $I_D = 1 \text{ mA}$. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25 \text{ mV}$. Pretpostaviti da je p -strana nekoliko puta šira od difuzijske duljine elektrona.

Rješenje:

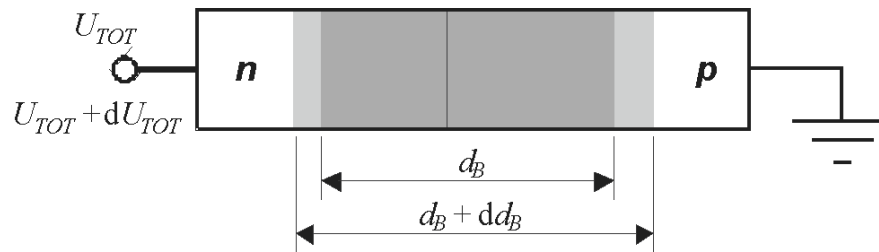
$$I_D \gg I_S \rightarrow r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{25}{1} = 25 \Omega$$

Difuzijski kapacitet određuje vrijeme života manjinskih elektrona slabije dopirane p -strane

$$C_d = g_d \frac{\tau_n}{2} = \frac{\tau_n}{2r_d} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 25} = 40 \text{ nF}$$

Kapacitet osiromašenog sloja

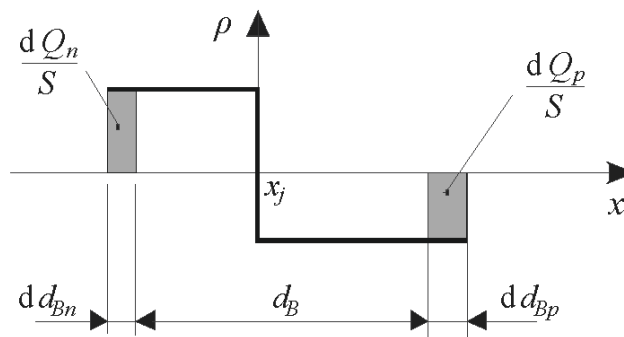
Određuje ga promjena naboja ioniziranih atoma primjesa u osiromašenom sloju s naponom



$$\text{Uz } U_{TOT} + dU_{TOT} \rightarrow d_B + dd_B$$

$$dQ = dQ_n = dQ_p$$

$$C_B = \frac{dQ}{dU_D} = \frac{dQ}{dU_{TOT}}$$



Primjenom formule za pločasti kondenzator

$$C_B = \epsilon \frac{S}{d_B}$$

$$C_B = \frac{C_{B0}}{\sqrt{1 - U_D / U_K}}$$

Primjer 3.8

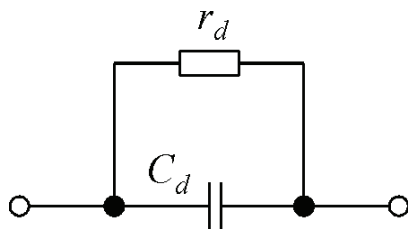
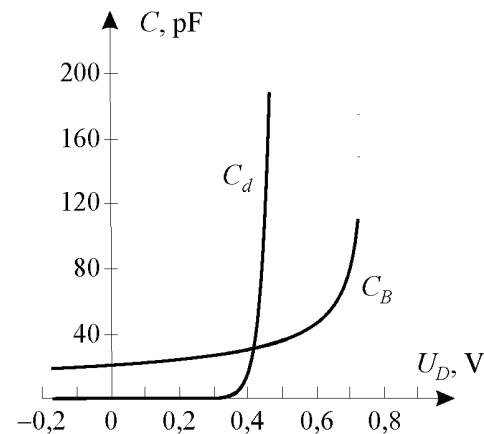
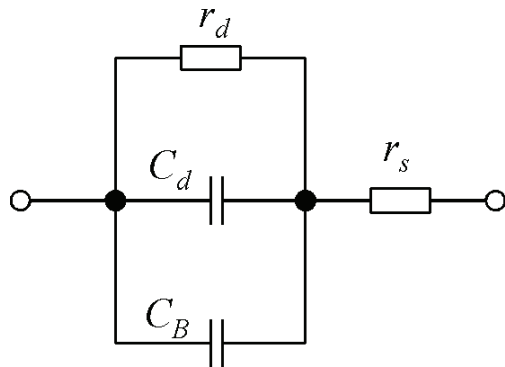
Za pn -spoj iz zadatka 3.2 izračunati kapacitet osiromašenog sloja za zadane napone, ako je površina spoja $S = 0,25 \text{ mm}^2$.

Rješenje:

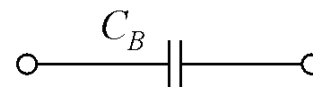
$$C_B = \varepsilon \frac{S}{d_B} = 8,854 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7 \cdot \frac{0,25 \cdot 10^{-2}}{d_B} \text{ F} \quad \text{uz } d_B \text{ u cm.}$$

$U, \text{ V}$	$d_B, \mu\text{m}$	$C_B, \text{ pF}$
0	0,953	27,2
0,5	0,505	51,3
- 5	2,73	9,5

Model diode za mali signal



model za propusnu
polarizaciju



model za zapornu
polarizaciju

Primjer 3.9 (1)

U *pn*-diodi koncentracija donora na *n*-strani znatno je veća od koncentracije akceptora na *p*-strani, pri čemu je *p*-strana znatno šira od difuzijske duljine manjinskih nosilaca. Kontaktni potencijal diode $U_K = 0,7$ V, površina presjeka $S = 0,25$ mm². Dinamički parametri diode pri istosmjernom naponu $U_D = 0$ su: $r_{d0} = 1,5 \cdot 10^{11}$ Ω, $C_{d0} = 6,5 \cdot 10^{-18}$ F i $C_{B0} = 20$ pF. Izračunati struju I_D , dinamički otpor r_d , difuzijski kapacitet C_d i kapacitet osiromašenog sloja C_B za napone diode $U_D = -5$ V, -1 V, $0,2$ V, $0,4$ V i $0,6$ V. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25$ mV.

Rješenje:

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right] \quad r_d = \frac{U_T}{I_D + I_S} = \frac{U_T}{I_S \exp\frac{U_D}{U_T}} = r_{d0} \exp\left(-\frac{U_D}{U_T}\right)$$

$$C_d = g_d \frac{\tau_n}{2} = \frac{\tau_n}{2r_d} = C_{d0} \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) \quad C_B = \varepsilon \frac{S}{d_B} = \frac{C_{B0}}{\sqrt{1 - U_D/U_K}}$$

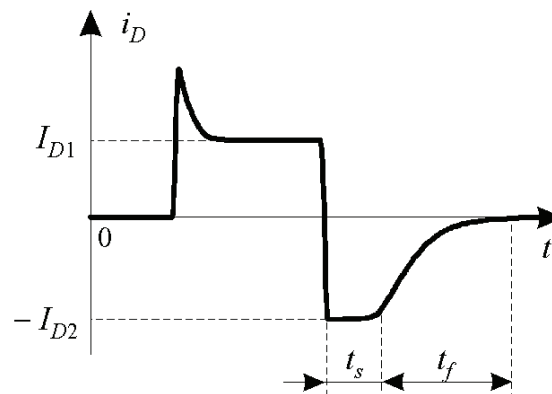
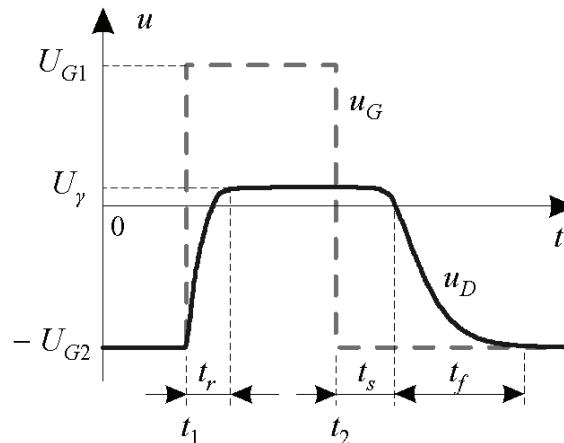
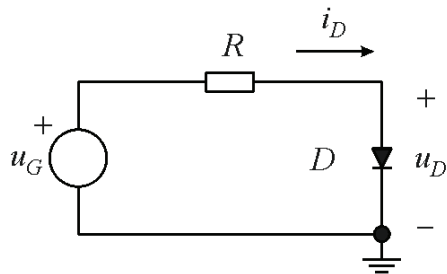
r_{d0} , C_{d0} i C_{B0} - parametri r_d , C_d i C_B uz napon $U_D = 0$

Primjer 3.9 (2)

$$I_S = \frac{U_T}{r_{d0}} = \frac{0,025}{1,5 \cdot 10^{11}} = 0,167 \text{ pA}$$

U_D, V	I_D, A	r_d, Ω	C_d, F	C_B, F
-5	$-0,17 \cdot 10^{-12}$	$> 10^{12}$	$< 10^{-18}$	$7 \cdot 10^{-12}$
-1	$-0,17 \cdot 10^{-12}$	$> 10^{12}$	$< 10^{-18}$	$13 \cdot 10^{-12}$
0,2	$0,50 \cdot 10^{-9}$	$50 \cdot 10^6$	$19 \cdot 10^{-15}$	$24 \cdot 10^{-12}$
0,4	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^3$	$58 \cdot 10^{-12}$	$31 \cdot 10^{-12}$
0,6	$4,4 \cdot 10^{-3}$	5,7	$0,17 \cdot 10^{-6}$	$53 \cdot 10^{-12}$

Impulsni rad *pn*-diode (1)



$$u_G(t) = i_D(t)R + u_D(t)$$

$$t < t_1 - u_G = -U_{G2} \\ i_D = -I_S \text{ i } u_D = -U_{G2}$$

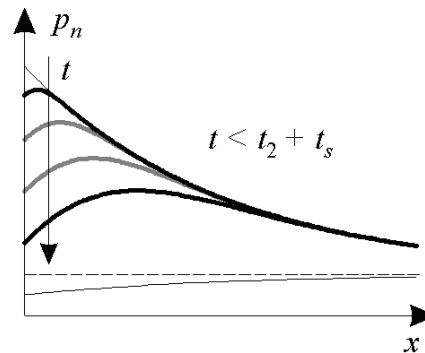
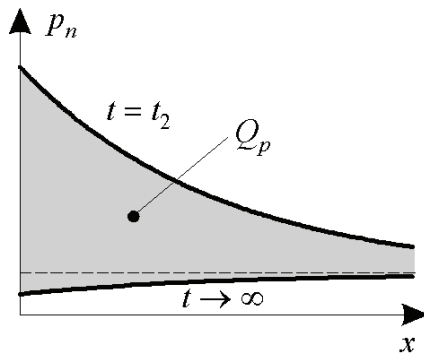
$$t = t_1 - u_G = U_{G1}$$

$t > t_1$ – smanjenje naboja
osiromašenog sloja i
povećanje nakrcanog
naboja manjinskih
nosilaca

$$t > t_1 + t_r - \\ i_D = I_{D1} = \frac{U_{G1} - U_{\gamma}}{R}$$

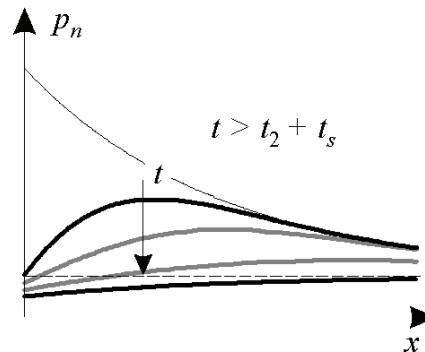
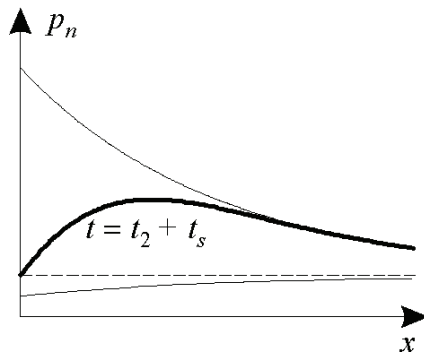
t_r – vrijeme porasta

Impulсни rad *pn*-diode (2)



$t = t_2 - u_G = -U_{G2}$ - promjena predznaka gradijenta nosilaca uz rub osiromašenog sloja – konstantna struja

$$i_D = -I_{D2} = \frac{-U_{G2} - U_\gamma}{R}$$

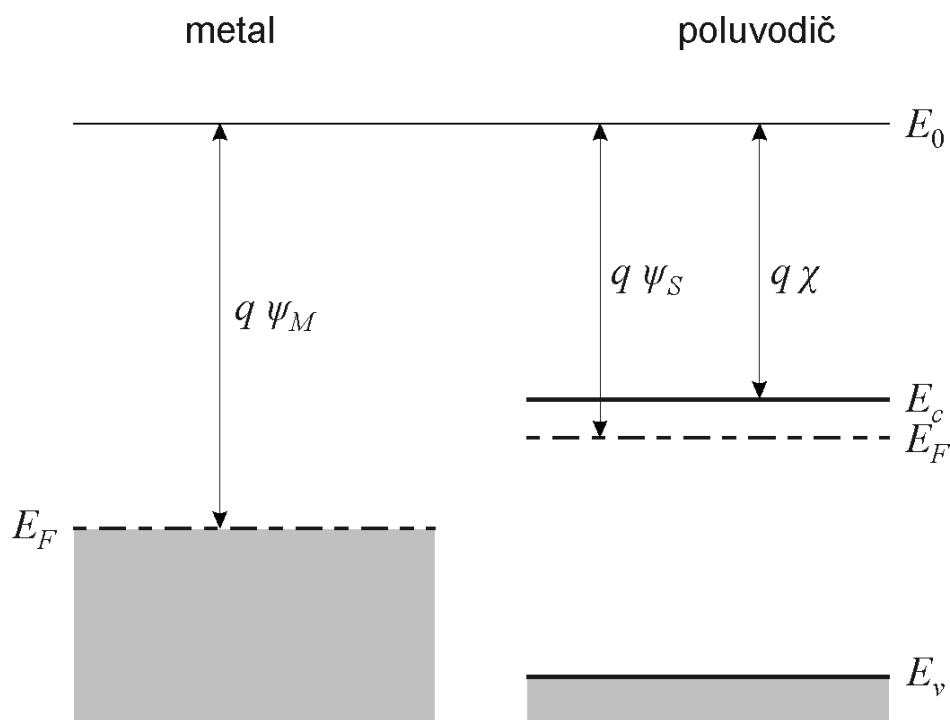


$t = t_2 + t_s$ – dioda postaje zaporno polarizirana, gradijent nosilaca se smanjuje – struja se smanjuje prema $i_D = -I_S$

t_s – vrijeme zadržavanja

t_f – vrijeme pada

Spoj metal-poluvodič – energetski dijagrami



metal – nema zabranjenog pojasa –
velika koncentracija elektrona

$q\psi_M$, $q\psi_S$ – radovi izlaza – minimalna
energija elektrona za izlaz iz
materijala

$$q\psi_M = E_0 - E_F$$

E_0 – energija slobodnog elektrona

χ – elektronski afinitet

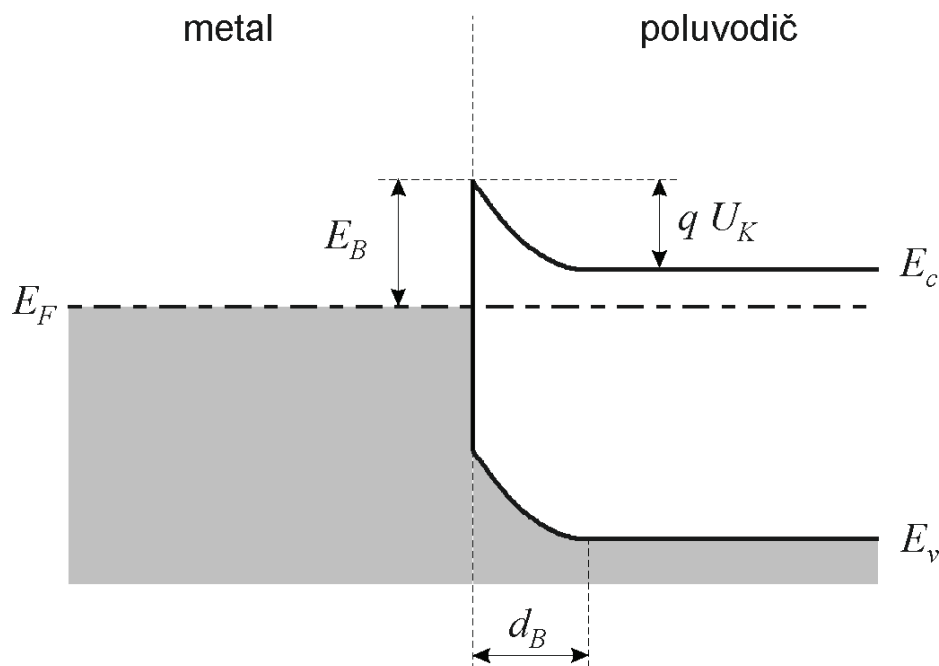
$$q\chi = E_0 - E_c$$

$\chi = 4,05$ V za Si,

$\chi = 4$ V za Ge,

$\chi = 4,07$ V za GaAs

Ispravljački spoj metal-poluvodič u ravnoteži



$\psi_S < \psi_M$ - pri spajanju elektroni
prelaze iz poluvodiča u metal

u poluvodiču – osiromašeni sloj –
električno polje – uspostavlja
ravnotežu

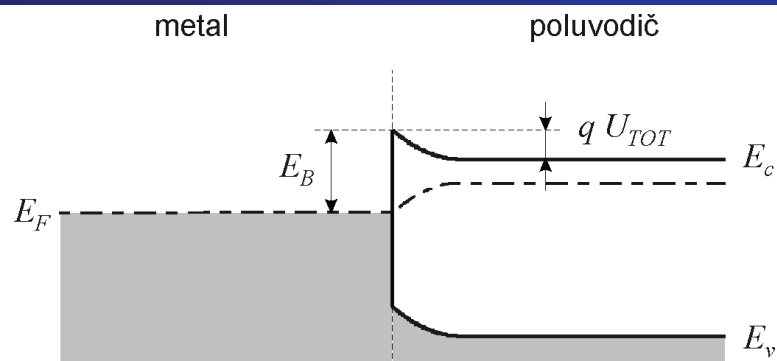
za prijelaz elektrona iz metala u
poluvodič – **Schottkyjeva
barijera**

$$E_B = q (\psi_M - \chi)$$

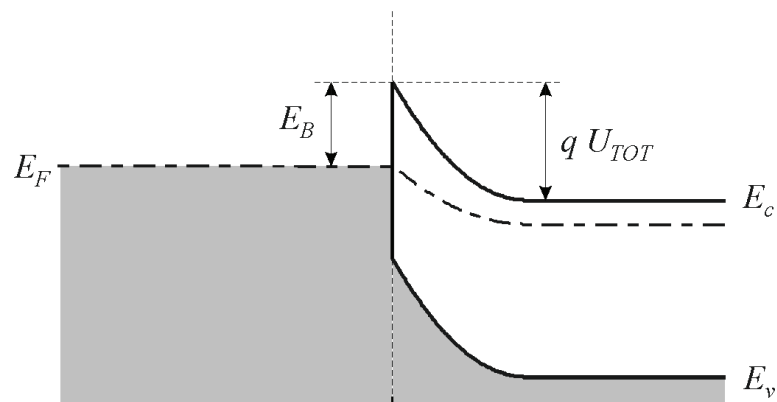
za prijelaz elektrona iz poluvodiča u
metal – barijera

$$q U_K = q (\psi_M - \psi_S)$$

Polarizirani ispravljački spoj metal-poluvodič



propusna polarizacija



zaporna polarizacija

$$qU_{TOT} = q(U_K - U_{MS}) - \text{ukupni napon}$$

$U_{MS} > 0$ - smanjuje se barijera za elektrone iz poluvodiča – povećava se prijelaz elektrona u metal – struja iz metala u poluvodič –
propusna polarizacija

$U_{MS} > 0$ - povećava se barijera za elektrone iz poluvodiča – spoj prelazi mala koncentracija elektrona iz metala – mala i praktički konstantna struja iz poluvodiča u metal -
zaporna polarizacija

Omski spoj metal-poluvodič

omski spoj

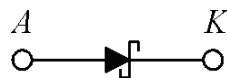
- ❑ jednako dobro vodi struju u oba smjera
- ❑ nužan za realizaciju vanjskih priključaka poluvodičkih elemenata

realizacija omskog spoja

- ❑ kombinacijom metala i poluvodiča na čijoj se površini stvara višak većinskih nosilaca – nema energetske barijere – primjer: spoj aluminija i p-tipa silicija
- ❑ visokim dopiranjem poluvodiča – elektroni prolaze barijeru tuneliranjem – primjer: spoj aluminija i n -tipa silicija s $N_A > 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Schottkyjeva dioda

Temelji se na ispravljačkom spoju metal-poluvodič



električni simbol

Usporedba s *pn*-diodom:

- ❑ manji napon koljena U_γ – od 0,3 do 0,5 V
- ❑ veća zaporna struja koja malo raste sa zapornim naponom – uzrok: smanjenje Schottkyjeve barijere sa zapornim naponom – Schottkyjev efekt
- ❑ struju Schottkyjeve diode vode većinski nosioci
- ❑ izostanak nakrcanog naboja manjinskih nosilaca – brža sklopka od *pn*-diode