

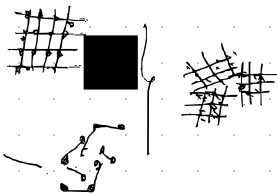
2. ELEKTRIČKA SVOJSTVA POLUVODIČA

Specifična vodljivost σ S.V. vodiča $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-6} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm} \\ > \text{S.V. izolatora} \end{array} \right.$

L temeljno el. svojstvo: mogućnost podešavanja

Struktura:

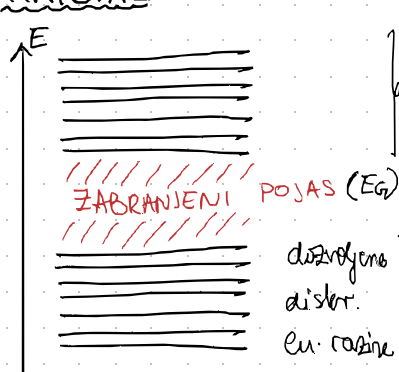
- pravilno: kristal
- nepravilno: amorfni materijal



KRISTALNI

- \angle monokristalan (pravilno u cijelom volumenu)
- \angle polikristalan (pravilno unutar zrna) * (poli-silicij)

KRISTAL:



vodljivi
POJAS

atome Napat
elektroni koji su slobodni za kretanje po kristalu

dizvoljeno
dist.
en. razine

valentni
POJAS

\rightarrow vezani za matične atome

* izolatori = imaju puno veći zabranjeni pojas

metali (vodiči) = nemaju zabranjeni pojas

- nije potrebna ekst. en. da se oslobodi e^-

* na 0°K je nemoguće osloboditi e^-

E_g - min. en. za oslobađanje e^-

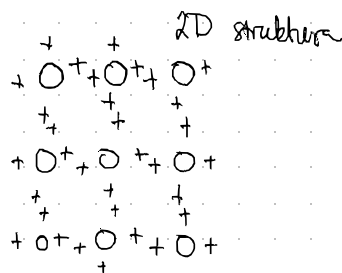
Struktura silicija - čisti silicij

n_i - intrinzična konc.

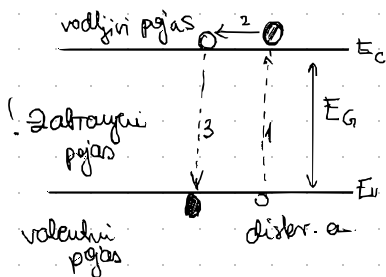
N - konc. elektrona

p - konc. šupljina

$n = p = n_i$



Čisti silicij



- oslobađanje e^- iz kon. vez = GENERACIJA NOSILACA

↳ iz svakeg izvora neizmirena kon. vez

↳ slob. čestica, ŠUPLJINA

↳ kad ju se popravi = REKOMBINACIJA NOSILACA

Koncentracije nosilaca

Koncentracija nosilaca - temp. ovisnosti

SRAT!

ako je dopiran → od domaćih atoma silicija (intrinzični konc.)

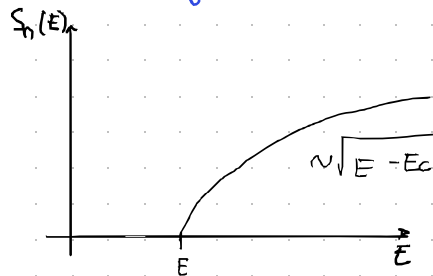
↳ ekstrinzični konc

↳ temp. je niska

* za atom silicija treba zabrayeni pas

* vrlo je lako ionizirati 1 atom fosfor, stoga je teže, zato ide silicij

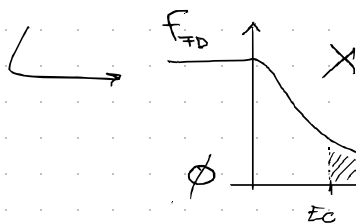
Raspodjel en. elektrona u vodljivom području



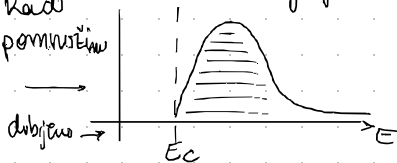
Fermi - Diracova f. udjeljivosti

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{E_T}\right)}$$

Fermijeva energija udjeljivosti $= 0.5$



hard pomniti



Fermijeva en.-temp. ovisnost

- bliže vodljivom \rightarrow silicijev tip
- možemo izračunati doprinos

MOGLA BIH SE KOKNUT Ü

Primer 2.5)

$T_1 = 300K$
 $T_2 = 420K$

izračunati položaj Fermijeve crte
 silicija koji se

pretpostaviti da su ef. gustoće $N_c = N_v$

- a.) intrinzičan
- b.) dopiran s $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- c.) dopiran s $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

$T_1 = 300K$

$n_{i1} = C_1 \cdot T_1^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2E_T1}\right) = 3,07 \times 10^{16} \cdot 300^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{1,196 \cdot 11600}{2 \cdot 300}\right)$

$n_{i1} = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$N_{c1} = N_{v1} = C T_1^{3/2} = 7,09 \times 10^{15} \cdot 300^{3/2} = 3,67 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

+ možemo dopirati:
do $\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

budući da kažemo položaj ne medinu ili $N_c N_v \dots$

$E_{g1} = E_{g0} + \alpha T_1 = 1,196 - 2,55 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 1,12 \text{ eV}$

temp raste $\rightarrow n_i$ raste

$T_2 = 420K \quad n_{i2} = \dots = 1,77 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

$N_c N_v$ će malo rasti

$N_{c2} = N_{v2} = \dots = 6,09 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

zabranjeni pojas će malo rasti

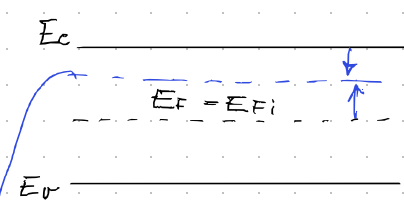
$E_{g2} = \dots = 1,09 \text{ eV}$

a) ako je intrinzičan - si \Rightarrow ne sredini zabranjenog pojasa

$E_{Fi} = E_v + \frac{E_g}{2} = E_c - \frac{E_g}{2}$

$T_1: E_{Fi} = E_v + 0,56 = E_c - 0,56 \text{ [eV]}$

$T_2: E_{Fi} = E_v + 0,54 = E_c - 0,54 \text{ [eV]}$



b) za silicij n-tipa $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

$T_1, T_2: N_D \gg n_{i1}, n_{i2} \rightarrow$ u ekv. temp. području $n \approx N_D$

znajmo da smo u int području pa kao de možemo zaigrati s konc donora

$E_F = E_c - E_T \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) = E_{Fi} + E_T \cdot \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

$T_1: E_F = E_c - \frac{300}{11600} \ln\left(\frac{3,67 \cdot 10^{19}}{5 \cdot 10^{15}}\right) = E_c - 0,23 \text{ [eV]}$

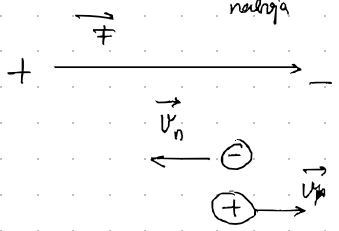
$T_2: E_F = E_c - \frac{420}{11600} \ln\left(\frac{6,09 \cdot 10^{19}}{5 \cdot 10^{15}}\right) = E_c - 0,34 \text{ [eV]}$

- raste temp \rightarrow postaje intrinzični, smanjuje se temp zabranjenog područja

-sao računamo struju, možda joj mi snage zašto to radimo

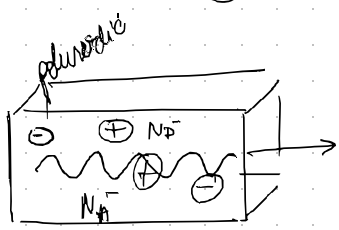
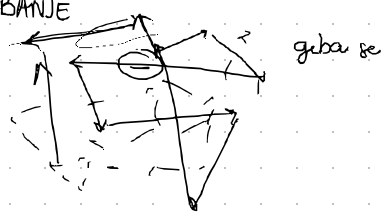
STRUJA $I(A) \sim Q \cdot v$
 količina naboja / brzina gibanja naboja

$\oplus =$ "šupljina"



$\vec{v}_n \sim -\vec{F}$
 $\vec{v}_p \sim \vec{F}$

STOHAŠTIČKO TERMICKO GIBANJE \sim od toplote $\sim kT$



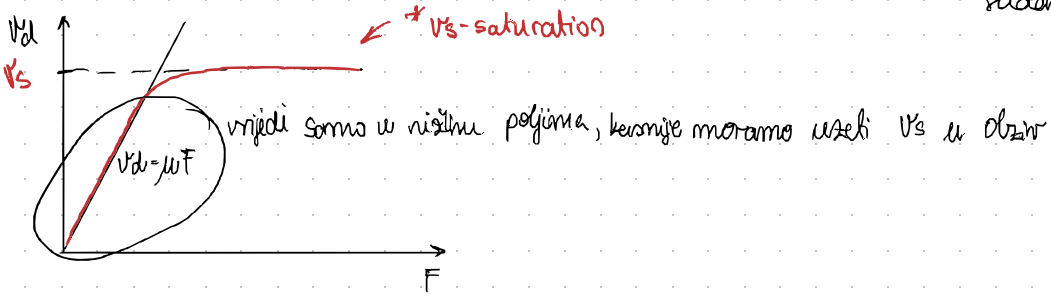
$\mu \equiv$ Pokretljivost

$\frac{cm^2}{Vs}$

$\vec{v}_{dn} = -\mu \vec{F}$
 $\vec{v}_{dp} = \mu \vec{F}$

Pokretljivost $\mu = \frac{cm^2}{Vs}$

-porastom temp pada pokretljivost
 \hookrightarrow atomi vibriraju, e^- koji putuje prolazi kroz "drtavost" rešetke; usporava sudaranjem



DRIFTNA STRUJA

Gustoća struje = kol naboja koja u jedinici vremena prođe kroz jedinični presek

$\vec{J}_E = -q n \vec{v}_{dn}$

DRIFTNE STRUJE NOSILACA $\vec{J}_{En} = -q n \mu_n \vec{F}$ $\vec{J}_{Ep} = q p \mu_p \vec{F}$

Ukupna driftna struja: $\vec{J}_F = \vec{J}_{En} + \vec{J}_{Ep} = q (n \mu_n + p \mu_p) \vec{F}$

$J = \sigma \cdot F$ specifična vodljivost (sigma)

Specifična vodljivost : $\sigma = q (n \mu_n + p \mu_p)$ Specifični otpor :

različ izmjeri n i p tip (graf) \rightarrow pokretljivost!

N_D raste sa F veličina - pokretljivost raste?? nek mi neko strati muke

Primer) Izračunati specifičnu vodljivost silicija na temperaturama $T_1 = 300\text{K}$
 $T_2 = 450\text{K}$ ako je

$T_1 = 300\text{K} \rightarrow$ ne moramo računati, dani u tabeli $n_{i1} = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$$\mu_{n1} = 1360 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_{p1} = 447 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$T_2 = 450\text{K}$ $n_{i2} = \dots$ račun $= 5,92 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

$$\mu_{n2} = 625 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad , \quad \mu_{p2} = 190 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

a) n-Si, $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \gg n_{i1}, n_{i2} \rightarrow$ elektr. temp p $\rightarrow n \doteq N_D$

$$\sigma_n = q N_D \mu_n$$

$$\sigma_n(300\text{K}) = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{15} \cdot 1360 = 435 \text{ m S/cm}$$

$$\boxed{T \uparrow \quad \sigma_n \downarrow}$$

b) $\sigma_n(450\text{K}) = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{15} \cdot 625 = 200 \text{ m S/cm}$

c) $N_D = N_A$ - izrekombinirali smo, poništili su se \rightarrow intrinzična kanc. određuje vodljivost

$$\underbrace{N_D = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}}_{\text{Si}} \rightarrow \text{kompensirani} \rightarrow n = p = n_i$$

$$\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma_i(300\text{K}) = 4,2 \text{ m S/cm}$$

$$\sigma_i(450\text{K}) = 7,7 \text{ m S/cm}$$

Primer: silicijski otpornik p-tipa oblika kvadra

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

- na naponu $U = 5 \text{ V}$

- pokretljivost μ : šuplina $\Rightarrow \mu_n = 1228 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
 $\mu_p = 420 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

- dužina kvadra $L = 50 \mu\text{m}$

- površina: $S = 10 \mu\text{m}^2$

- temp $T = 300 \text{ K}$

a) $I = ?$ b) $\sigma_p = ?$ $R = ?$

a) p-si $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \gg n_i(300\text{K}) = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

\rightarrow ekstr. temp p $\rightarrow p = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$\sigma = \sigma_p = q p \mu_p$$

$$I_F = I_{Fp} = S J_{Fp} = S q p \mu_p F$$

$$F = -\frac{U}{L} = \frac{-5}{50 \times 10^{-4}} \rightarrow \underline{F = -1 \text{ kV/cm}}$$

$$I_{Fp} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6 \times 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 420 \cdot (-10^3)$$

$$J_F = \frac{I_F}{S} = -\frac{67,2 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-8}}$$

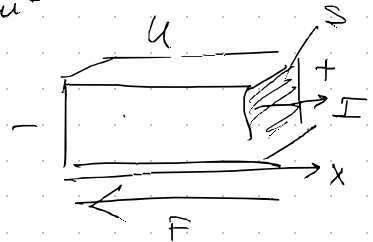
$$\boxed{I_{Fp} = -67,2 \mu\text{A}}$$

$$\boxed{J_F = -672 \text{ A/cm}^2}$$

b) $\sigma_p = q p \mu_p = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 420 = 672 \text{ m S/cm}$

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} = 1,5 \Omega\text{cm} \rightarrow R = \rho \frac{L}{S} = 1,5 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-8}}$$

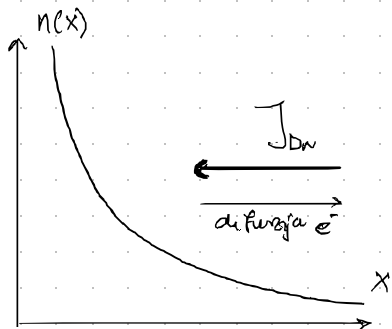
$$\boxed{R = 75 \text{ k}\Omega}$$



Difuzijska struja

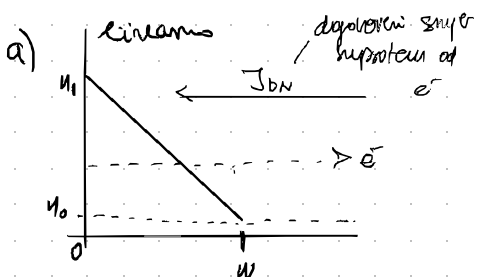
--- teorija

--- formule

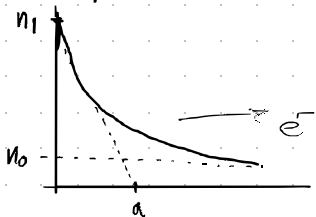


Primer: 2.8)

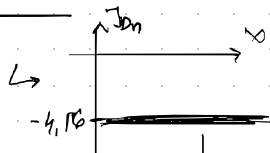
$I_{DE} = ?$ $x_0 = 0$ $x_1 = 5 \mu m$ $x_2 = 10 \mu m$ ako se raspodjela njezga:



b) eksponencijalna



difuzijska konstanta $D_n = \frac{U_T}{\mu_n} = \frac{300}{11600} \cdot 1200 = 31 \text{ cm}^2/\text{s}$



a) LINEARNA RASPODJELE

$$J_{Dn} = q D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$\frac{dn(x)}{dx} = -\frac{n_1 - n_0}{w} = -\frac{n_1}{w}$$

konstantno

$$J_{Dn}(x=0, 5, 10 \mu m) = q D_n \cdot \left(-\frac{n_1}{w}\right)$$

$$J_{Dn}(x=0, 5, 10 \mu m) = -4,96 \text{ mA/cm}^2$$

i to je konstanta \rightarrow linearna raspodjela

b) EKSPONENCIJALNA

$$n(x) = n_0 + (n_1 - n_0) \exp\left(\frac{-x}{a}\right) = n_1 \cdot \exp\left(\frac{-x}{a}\right)$$

$$\frac{dn(x)}{dx} = -\frac{n_1}{a} \exp\left(\frac{-x}{a}\right)$$

$$J_{Dn}(x) = q D_n \cdot \left(-\frac{n_1}{a}\right) \exp\left(\frac{-x}{a}\right)$$

$$-9,92 \text{ mA/cm}^2$$

$$J_{Dn}(x=0) = -9,92 \text{ mA/cm}^2$$

$$J_{Dn}(x=5) = -9,92 \exp\left(-\frac{5}{5}\right) = -3,64 \text{ mA/cm}^2$$

$$J_{Dn}(x=10) = \dots = -1,34 \text{ mA/cm}^2$$

