

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

Elektronika 1

Ž. Butković, J. Divković Pukšec, A. Barić

2. Električka svojstva poluvodiča

Poluvodiči

Specifična vodljivost – manja od specifične vodljivosti vodiča i veća od specifične vodljivosti izolatora

$$10^{-6} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$$

Temeljno električko svojstvo – mogućnost podešavanja specifične vodljivosti u širokom granicama

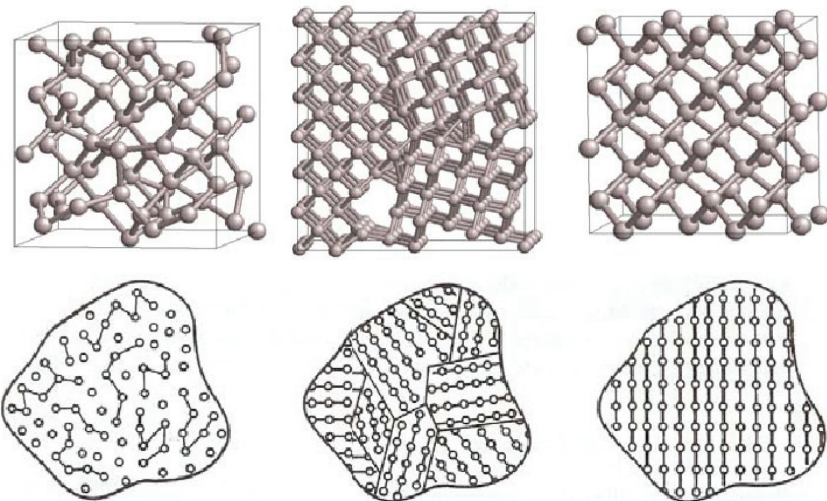
Struktura čvrstih tijela

Definirana je rasporedom atoma ili grupa atoma

- ❑ pravilan raspored atoma - **kristal**
- ❑ nepravilan raspored atoma – **amorfni** materijal

Kristalni materijali:

- ❑ pravilan raspored u cijelom volumenu – **monokristal**
- ❑ pravilan raspored unutar zrna - **polikristal**



Amorfni

Polikristal

Monokristal

Atom

Atomi se sastoje od:

- ☐ jezgre
- ☐ elektrona

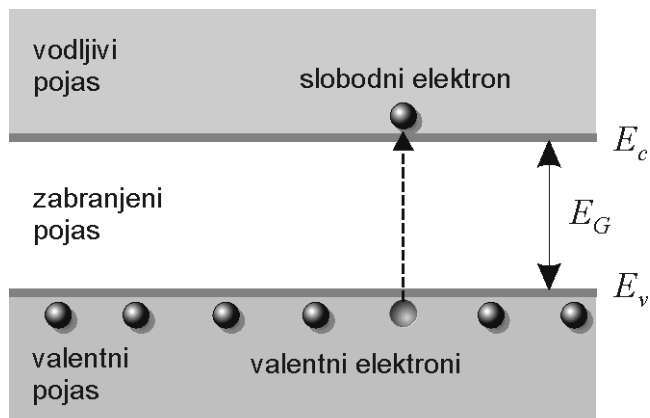
Naboj elektrona: $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

Neionoizirani atom: negativni naboj elektrona = pozitivni naboj jezgre

Elektroni atoma poprimaju diskretne energije

Kristal

Diskretna energetska stanja atoma stapaju se u energetske pojaseve



Vodljivost određuju elektroni najslabije vezani za jezgru - **valentni elektroni** iz **valentnog pojasa**

Na $T = 0 \text{ K} = -273^\circ \text{ C}$ - svi elektroni vezani uz jezgre – nema vođenja struje

Na $T > 0 \text{ K}$ – dio elektrona oslobađa se od jezgre atoma – **slobodni elektroni** iz **vodljivog pojasa**

Zabranjeni pojas

Energija zabranjenog pojasa E_G – minimalna energija za oslobađanje elektrona

$$E_G = E_c - E_v$$

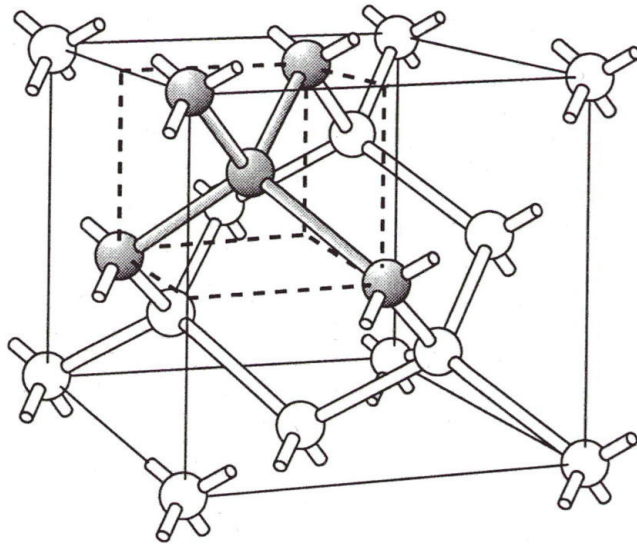
E_c - najniža energija vodljivog pojasa

E_v - najviša energija valentnog pojasa

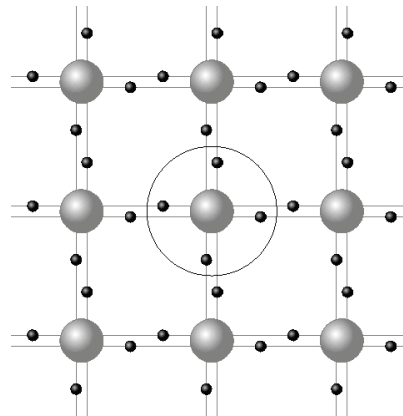
- ☐ vodiči – nema zabranjenog pojasa
- ☐ poluvodiči – E_G reda veličine 1 eV
- ☐ izolatori – $E_G > 5$ eV

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

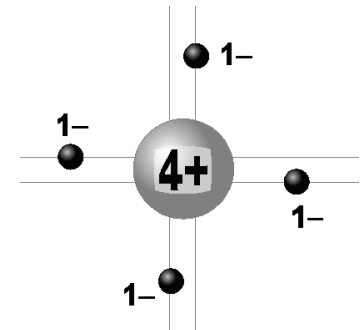
Struktura silicija



Dijamantna struktura



Dvodimenzionalni prikaz

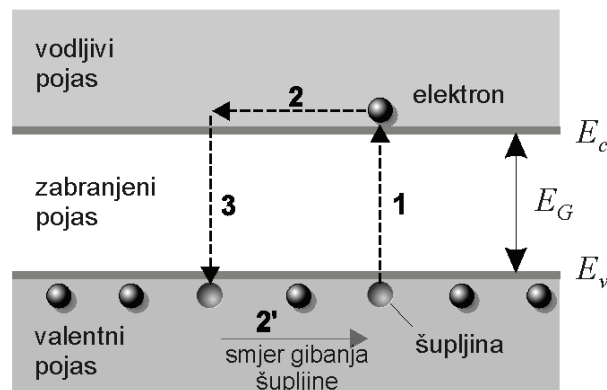
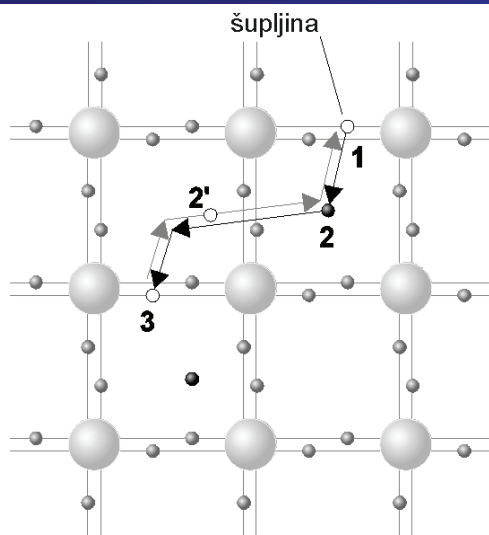


Četverovalenetni element – četiri valentna elektrona

Atomi se vežu u **kovalentnu vezu**

Koncentracija atoma - $5 \cdot 10^{22}$ atoma/cm⁻³

Čisti silicij



1 – oslobađanje elektrona –
generacija nosilaca

3 – vraćanje elektrona u kovalentnu vezu –
rekombinacija nosilaca

prosječno vrijeme između generacije i rekombinacije – vrijeme života τ

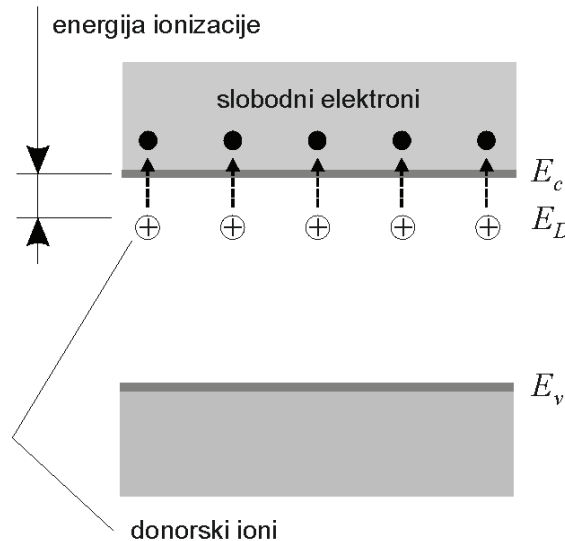
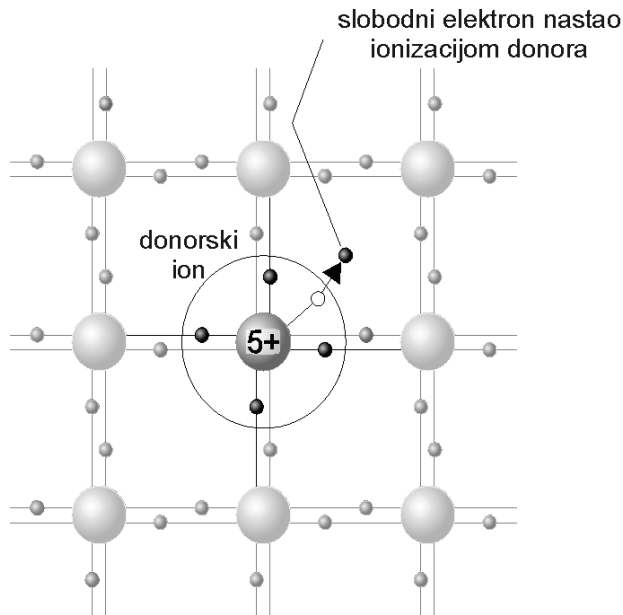
manjak elektrona u valentnom pojasu - šupljina

koncentracije nosilaca: $n = p = n_i$

n – koncentracija elektrona, p – koncentracija šupljina,

n_i – intrinzična koncentracija

Dopirani silicij – *n*-tip



donor - peterovalentna
primjesa

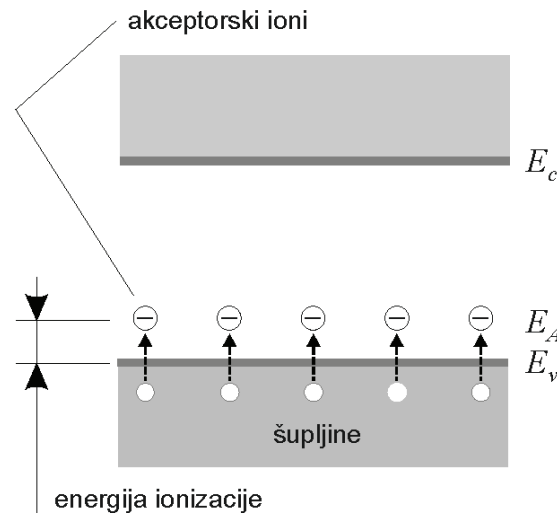
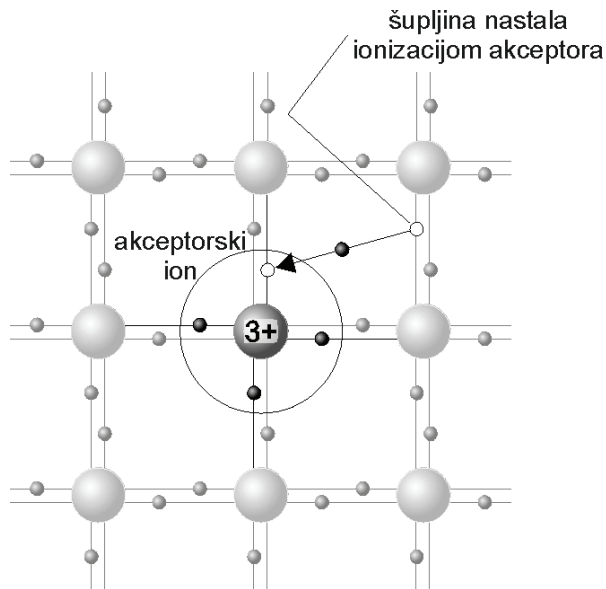
peti elektron slabo
vezan za atom –
prelazi u vodljivi
pojas i postaje
slobodni elektron

koncentracije nosilaca: $n \gg p$

n – većinski nosioci, p – manjinski nosioci

silicij *n*-tipa

Dopirani silicij – *p*-tip



akceptor - trovalentna primjesa

nepopunjenu kovalentnu vezu popunjava valentni elektron - nastaje šupljina

koncentracije nosilaca: $p \gg n$

p – većinski nosioci, n – manjinski nosioci

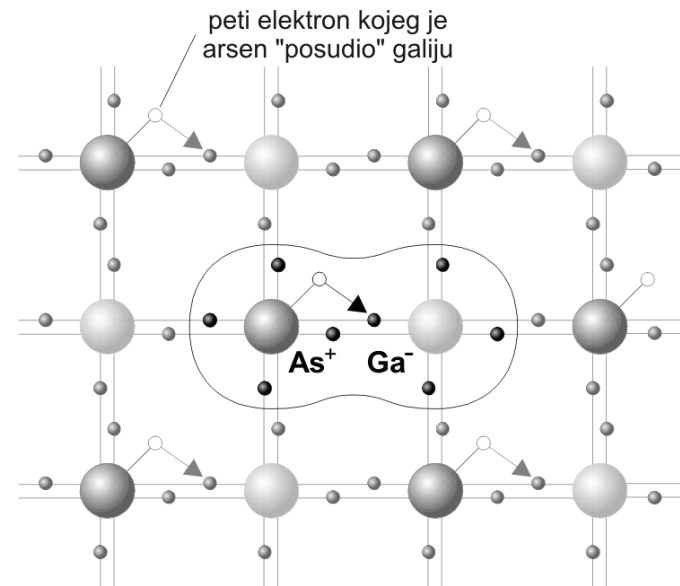
silicij *p*-tipa

Poluvodički materijali

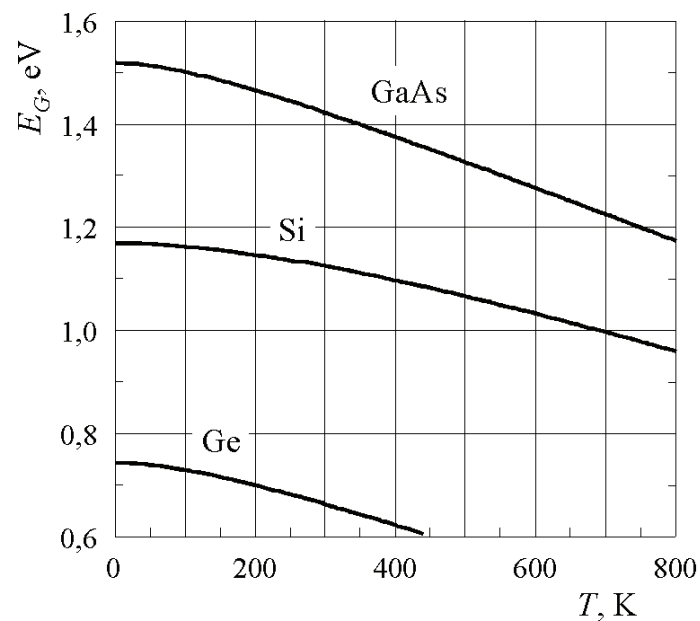
Elementarani poluvodički materijali – silicij (Si), germanij (Ge)

Složeni poluvodički materijali

- ❑ III-V poluvodiči – galij-arsenid (GaAs), indij-fosfid (InP), galij-fosfid (GaP), indij-antimonid (InSb)
- ❑ II-VI poluvodiči – kadmij-sulfid (CdS), cink-sulfid (ZnS)
- ❑ IV-IV poluvodiči – silicij-karbid (SiC), silicij-germanij (SiGe)



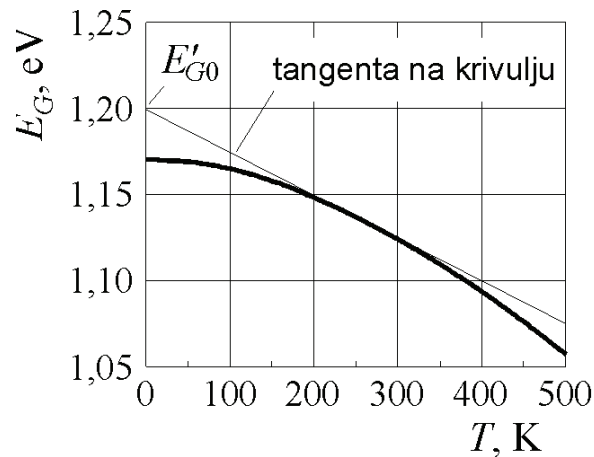
Širina zabranjenog pojasa



Poluvodič	E_G (0 K), eV	E_G (300 K), eV
Si	1,17	1,12
Ge	0,74	0,66
GaAs	1,52	1,42

Širina zabranjenog pojasa – linearna aproksimacija temperature promjene

$$E_G(T) = E'_{G0} + a T$$



poluvodič	E'_{G0} , eV	a , eV/K
Si	1,196	$-2,55 \cdot 10^{-4}$
Ge	0,776	$-3,85 \cdot 10^{-4}$
GaAs	1,556	$-4,52 \cdot 10^{-4}$

Primjer 2.1

Izračunati promjenu širina zabranjenog pojasa silicija, germanija i galij-arsenida ako se temperatura poveća s $T_1 = 300$ K na $T_2 = 360$ K.

Intrinzična koncentracija (1)

- ❑ Manja je za poluvodič s većim E_G
- ❑ Raste s porastom temperature

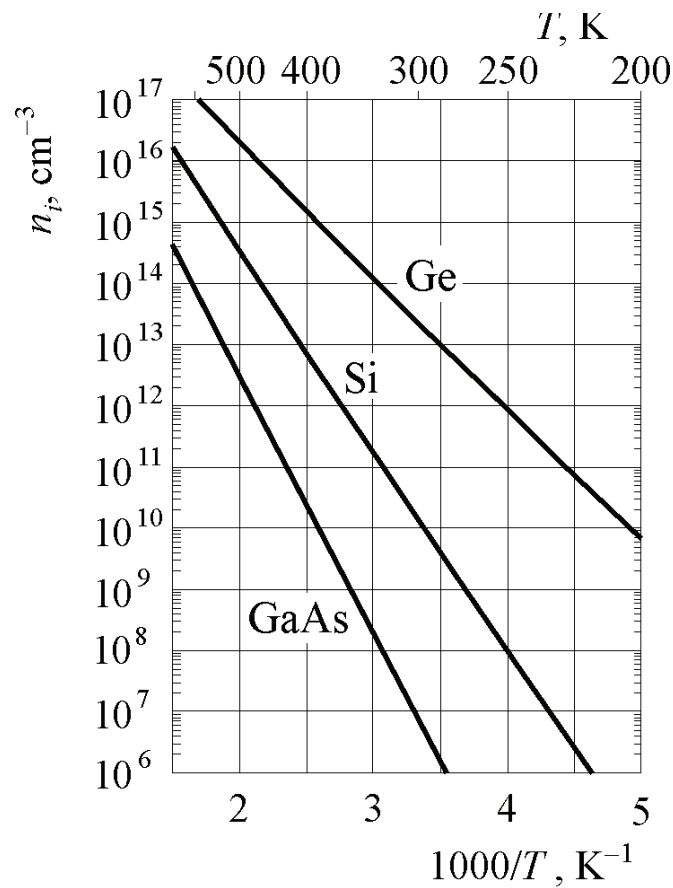
$$n_i = C T^{3/2} \exp\left[-\frac{E_G(T)}{2 E_T}\right] \quad E_T = k T = \frac{T}{11600}, \text{ eV} \quad \text{Za } T = 300 \text{ K} \rightarrow E_T = 25,9 \text{ meV}$$

Boltzmannova konstanta - $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8,620 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

$$\text{za } E_G(T) = E'_{G0} + a T \quad n_i = C_1 T^{3/2} \exp\left(-\frac{E'_{G0}}{2 E_T}\right)$$

poluvodič	$C, \text{ K}^{-3/2} \text{ cm}^{-3}$	$C_1, \text{ K}^{-3/2} \text{ cm}^{-3}$	$n_i (300 \text{ K}), \text{ cm}^{-3}$
Si	$7,07 \cdot 10^{15}$	$3,07 \cdot 10^{16}$	$1,45 \cdot 10^{10}$
Ge	$1,61 \cdot 10^{15}$	$1,51 \cdot 10^{16}$	$2,40 \cdot 10^{13}$
GaAs	$2,88 \cdot 10^{14}$	$4,00 \cdot 10^{15}$	$1,79 \cdot 10^6$

Intrinzična koncentracija (2)



Primjer 2.2

Izračunati promjenu intrinzičnih koncentracija u siliciju, germaniju i galij-arsenidu ako se temperatura promijeni s $T_1 = 300$ K na $T_2 = 360$ K.

Koncentracije nosilaca (1)

□ Zakon termodinamičke ravnoteže

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

n_0, p_0 - ravnotežne koncentracije nosilaca

□ Zakon električke neutralnosti

$$q(p_0 + N_D^+) = q(n_0 + N_A^-)$$

N_D^+, N_A^- - koncentracije ioniziranih primjesa

□ Čisti poluvodič

$$N_D = N_A = 0 \rightarrow n_0 = p_0 = n_i$$

Koncentracije nosilaca (2)

□ Poluvodič *n*-tipa

n-tip za: $N_D > N_A$

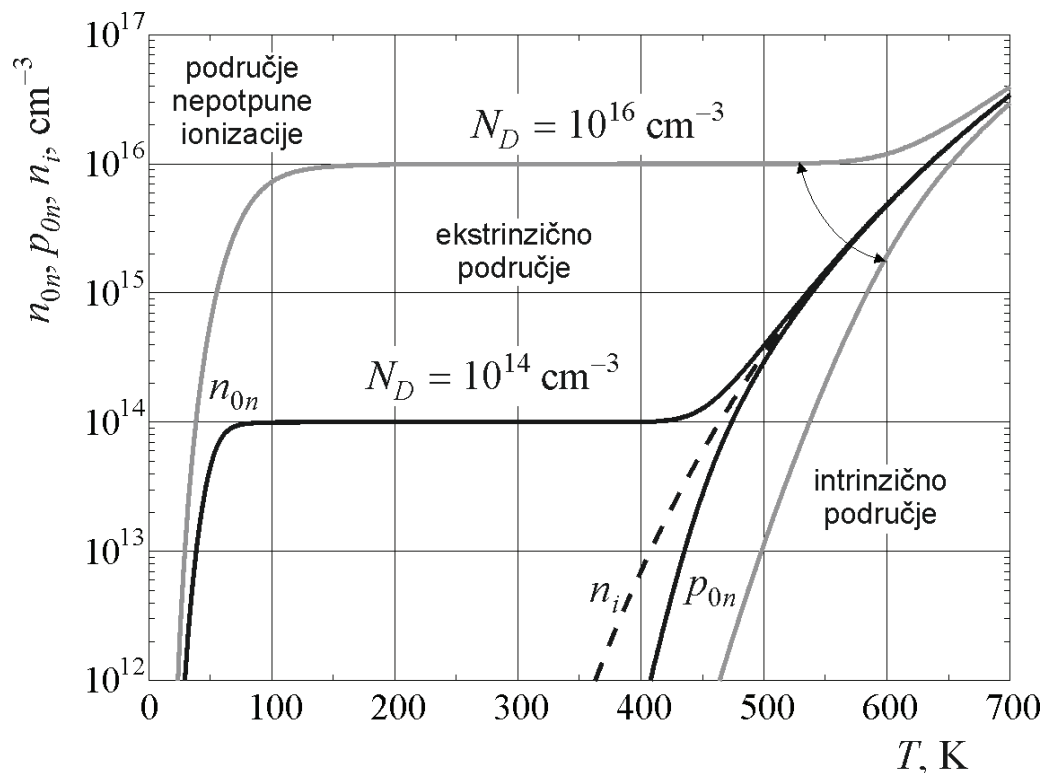
$$n_{0n} \cdot p_{0n} = n_i^2 \quad \text{i} \quad q(p_{0n} + N_D) = q(n_{0n} + N_A) \rightarrow$$

$$n_{0n} = \frac{N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4 n_i^2}}{2} \qquad p_{0n} = \frac{n_i^2}{n_{0n}}$$

Ekstrinzično temperaturno područje: $(N_D - N_A) \gg n_i$

$$n_{0n} \approx N_D - N_A \qquad p_{0n} = \frac{n_i^2}{n_{0n}}$$

Koncentracije nosilaca - temperaturna ovisnost



Intrinzična temperatura T_i
za koju vrijedi
 $(N_D - N_A) = n_i$

Koncentracije nosilaca (3)

❑ Poluvodič *p*-tipa

p-tip za: $N_A > N_D$

$$n_{0p} \cdot p_{0p} = n_i^2 \text{ i } q(p_{0p} + N_D) = q(n_{0p} + N_A) \rightarrow$$

$$p_{0p} = \frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4 n_i^2}}{2} \quad n_{0p} = \frac{n_i^2}{p_{0p}}$$

Ekstrinzično temperaturno područje: $(N_A - N_D) \gg n_i$

$$p_{0p} \approx N_A - N_D \quad n_{0p} = \frac{n_i^2}{p_{0p}}$$

❑ Kompenzirani poluvodič

$$N_A = N_D \rightarrow n_0 = p_0 = n_i$$

Primjer 2.3

Odrediti tip poluvodiča i koncentracije slobodnih nosilaca u siliciju na temperaturi $T = 300 \text{ K}$ za:

- a) $N_D = 0$ i $N_A = 0$,
- b) $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
- c) $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
- d) $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Primjer 2.4

Siliciju su dodane koncentracije donorskih i akceptorskih primjesa

$N_D = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A = 1,55 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Odrediti koncentracije slobodnih nosilaca na temperaturama:

- a) $T = 0^\circ \text{ C}$,
- b) $T = 100^\circ \text{ C}$,
- c) $T = 200^\circ \text{ C}$.

Raspodjela energija elektrona u vodljivom pojasu (1)

Broj elektrona $dn(E)$ u vodljivom pojasu $E > E_c$ u jediničnom volumenu u intervalu energija dE

$$dn(E) = S_n(E) f_n(E) dE$$

Gustoća dozvoljenih kvantnih stanja u vodljivom pojasu

$$S_n(E) = \frac{8 \sqrt{2} \pi (m_c^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c}$$

Planckova konstanta - $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js

m_c^* - efektivna masa elektrona

Efektivnom masom opisuje se kretanje elektrona u kristalnoj strukturi poluvodiča

Raspodjela energija elektrona u vodljivom pojasu (2)

Fermi-Diracova funkcija vjerojatnosti

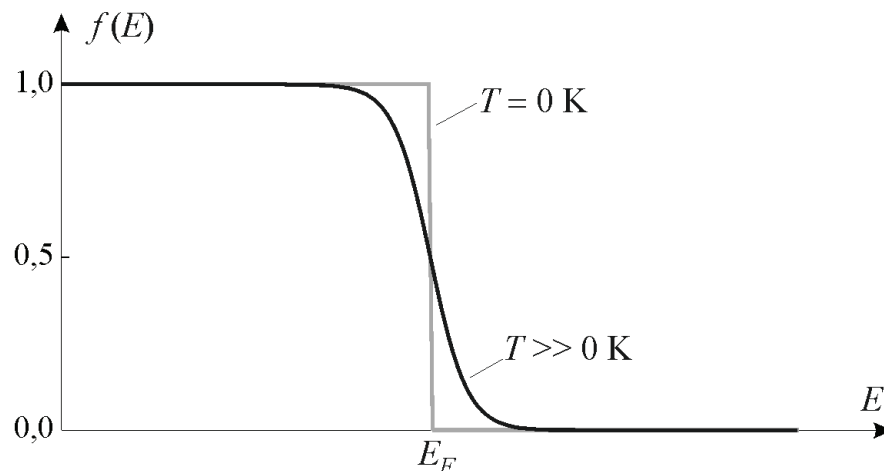
$$f_n(E) = f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{E_T}\right)}$$

E_F – Fermijeva energija –
vjerojatnost popunjenja = 0,5

za $E_c - E_F > 3kT$ -

Maxwell-Boltzmannova
funkcija vjerojatnosti

$$f_n(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{E_T}\right)$$



Koncentracija elektrona u vodljivom pojasu

Koncentracija elektrona

$$n = \int_{E_c}^{\infty} S_n(E) f_n(E) dE$$

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{E_T}\right)$$

Efektivna gustoća kvantnih stanja u vodljivom pojasu

$$N_c = 2 \left(\frac{2 \pi m_c^* k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

Raspodjela energija šupljina u valentnom pojasu

Broj šupljina $dp(E)$ u vodljivom pojasu $E < E_v$ u jediničnom volumenu u intervalu energija dE

$$dp(E) = S_p(E) f_p(E) dE$$

Gustoća dozvoljenih kvantnih stanja u valentnom pojasu

$$S_p(E) = \frac{8 \sqrt{2} \pi (m_v^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E_v - E} \quad m_v^* - \text{efektivna masa šupljina}$$

Funkcija vjerojatnosti

za $E_F - E_v > 3kT$

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

$$f_p(E) \approx \exp\left(-\frac{E_F - E}{E_T}\right)$$

Koncentracija šupljina u valentnom pojasu

Koncentracija šupljina

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} S_p(E) f_p(E) dE$$

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{E_T}\right)$$

Efektivna gustoća kvantnih stanja u valentnom pojasu

$$N_v = 2 \left(\frac{2 \pi m_v^* k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

Umnožak koncentracija nosilaca

U ravnoteži - Fermijeva je energija konstantna

$$n_0 \cdot p_0 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{E_T}\right)$$

Usporedba s empirijskom relacijom

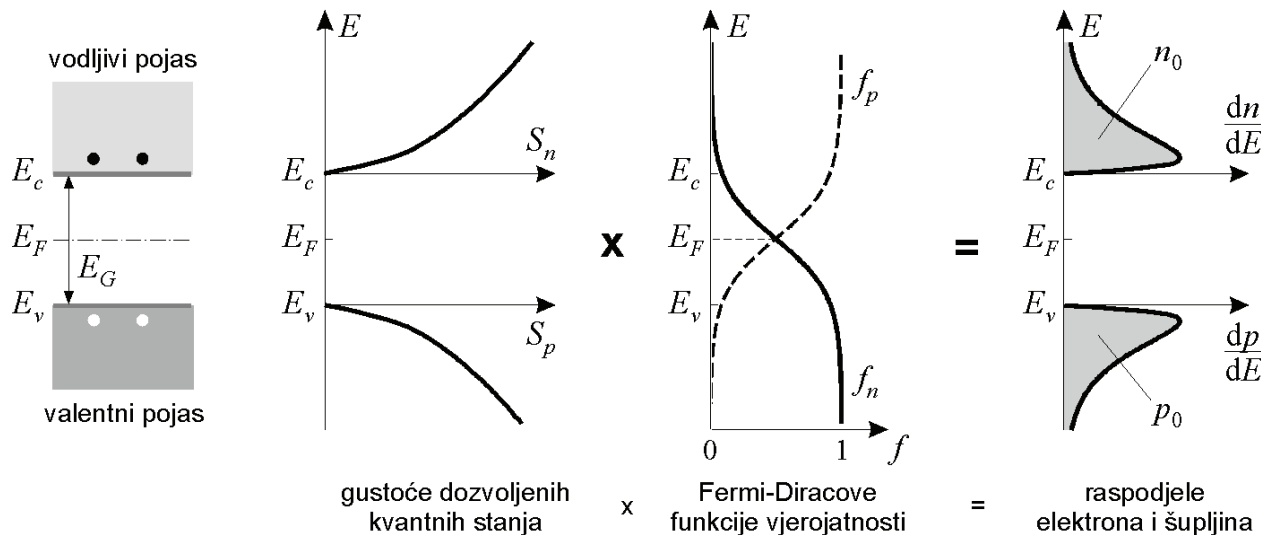
$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 = C^2 T^3 \exp\left(-\frac{E_G}{E_T}\right) \rightarrow N_c N_v = C^2 T^3$$

$$\text{uz } m_c^* \approx m_v^* \rightarrow N_c \approx N_v$$

Fermijeva energija – intrinzični poluvodič

$$n_0 = p_0 \rightarrow N_c \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_c}{E_T}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_{Fi}}{E_T}\right)$$

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



Ravnotežne koncentracije nosilaca

Omjer koncentracija nosilaca

$$\frac{n_0}{p_0} = \exp\left(2 \frac{E_F - E_{Fi}}{E_T}\right)$$

Ravnotežne koncentracije nosilaca

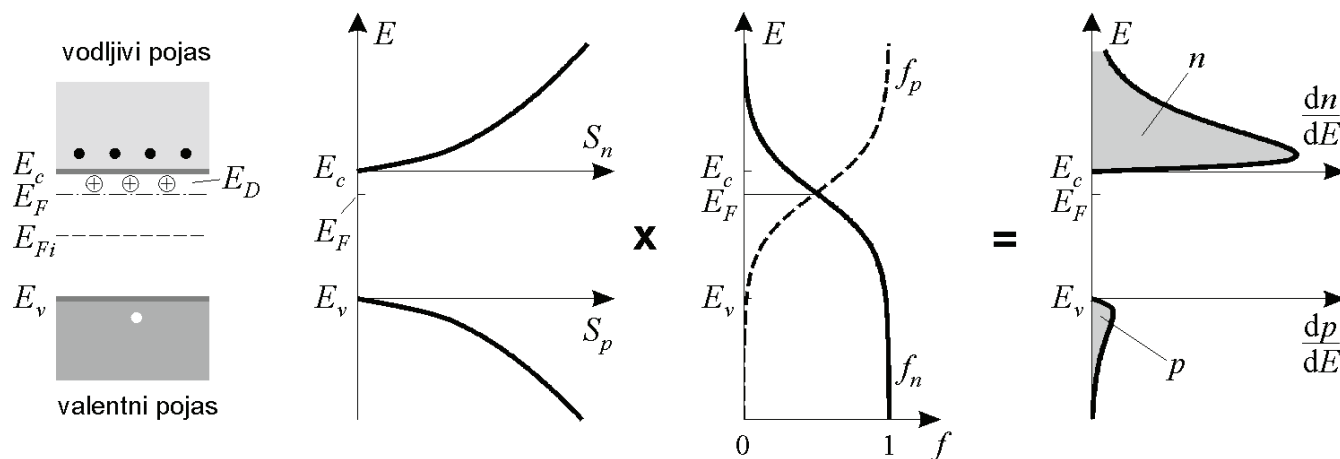
$$n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{E_T}\right)$$

$$p_0 = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{E_T}\right)$$

Fermijeva energija – poluvodič *n*-tipa

$$n_{0n} = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{E_T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{E_T}\right)$$

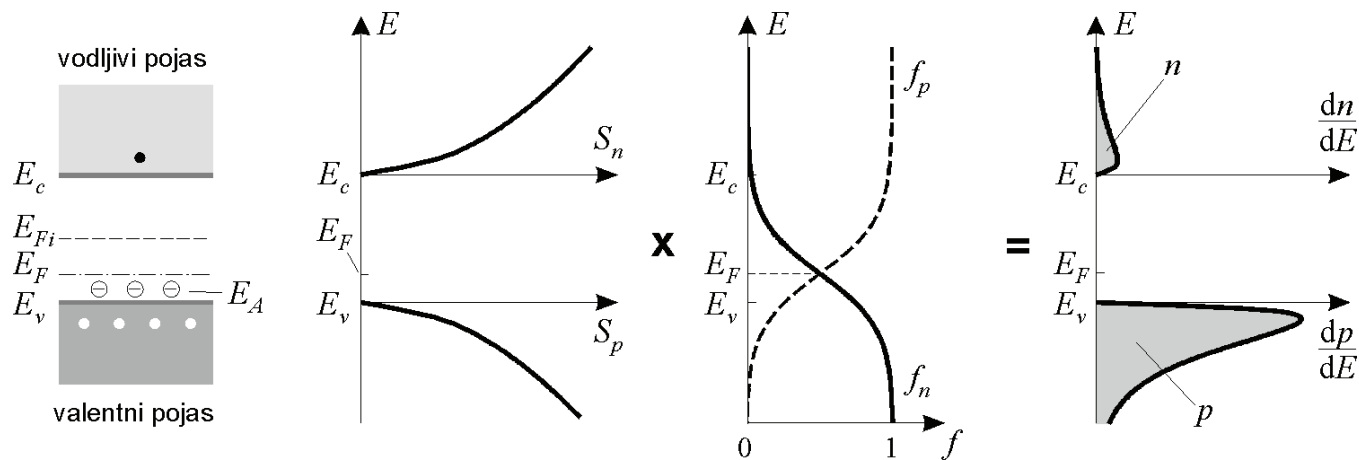
$$E_F = E_c - E_T \ln\left(\frac{N_c}{n_{0n}}\right) = E_{Fi} + E_T \ln\left(\frac{n_{0n}}{n_i}\right)$$



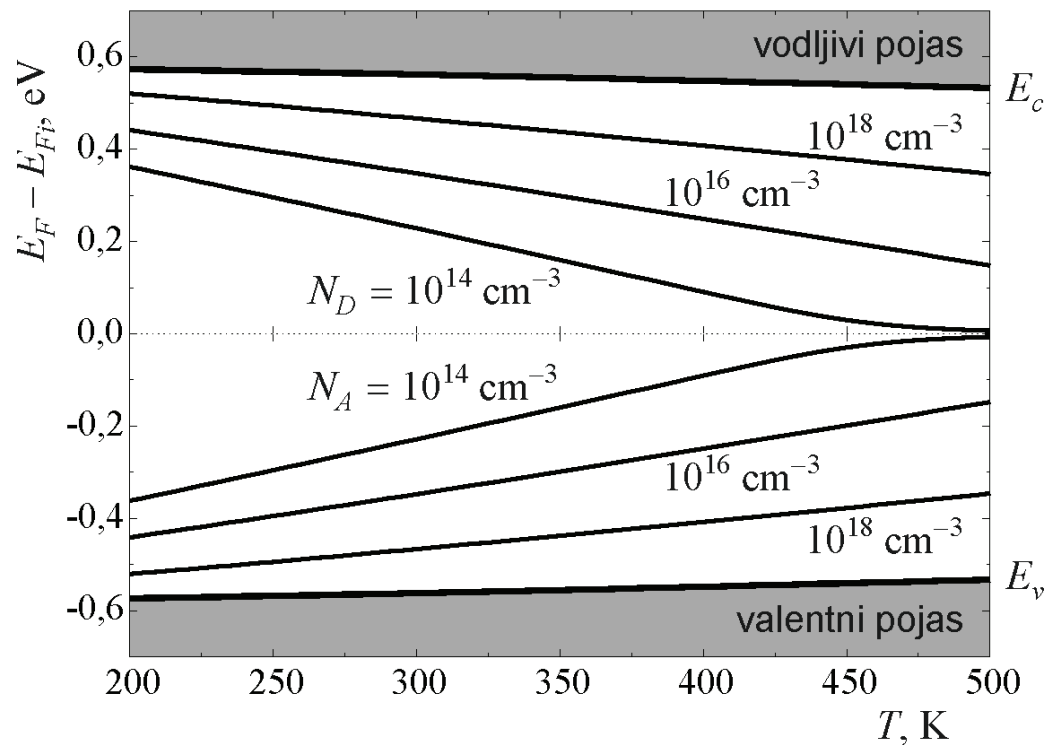
Fermijeva energija – poluvodič *p*-tipa

$$p_{0p} = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{E_T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{E_T}\right)$$

$$E_F = E_v + E_T \ln\left(\frac{N_v}{p_{0p}}\right) = E_{Fi} - E_T \ln\left(\frac{p_{0p}}{n_i}\right)$$



Fermijeva energija – temperaturna ovisnost



Primjer 2.5

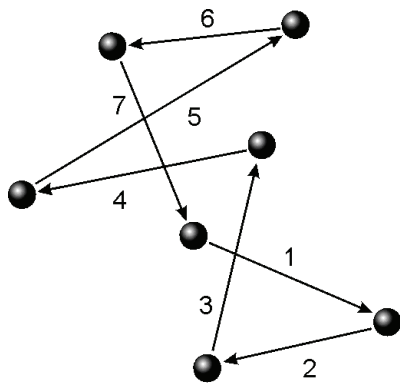
Za temperature $T_1 = 300$ K i $T_2 = 420$ K izračunati položaj Fermijeve energije silicija koji je:

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

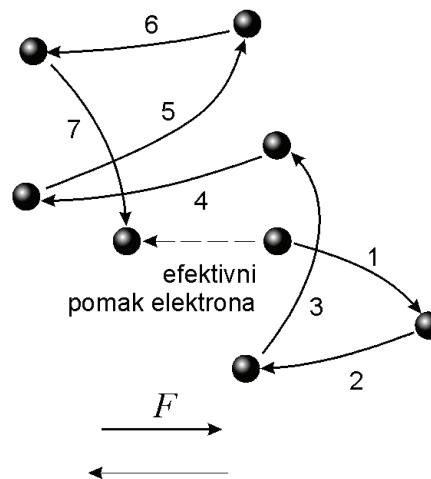
Pretpostaviti da su efektivne gustoće $N_c \approx N_v$.

Driftna brzina

Slobodno gibanje uslijed termičke energije – **termička brzina**



kaotično gibanje



smjer gibanja elektrona

Usmjereno gibanje pod utjecajem električkog polja – **drift**

$$\vec{v}_{dn} = -\mu_n \vec{F}$$

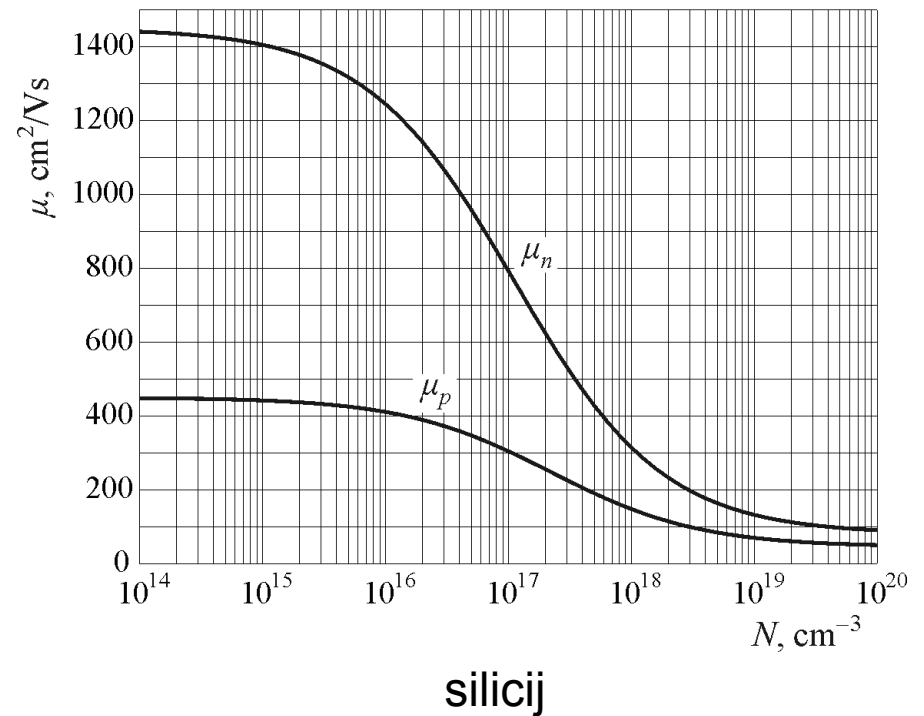
$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{F}$$

v_d – **driftna brzina**

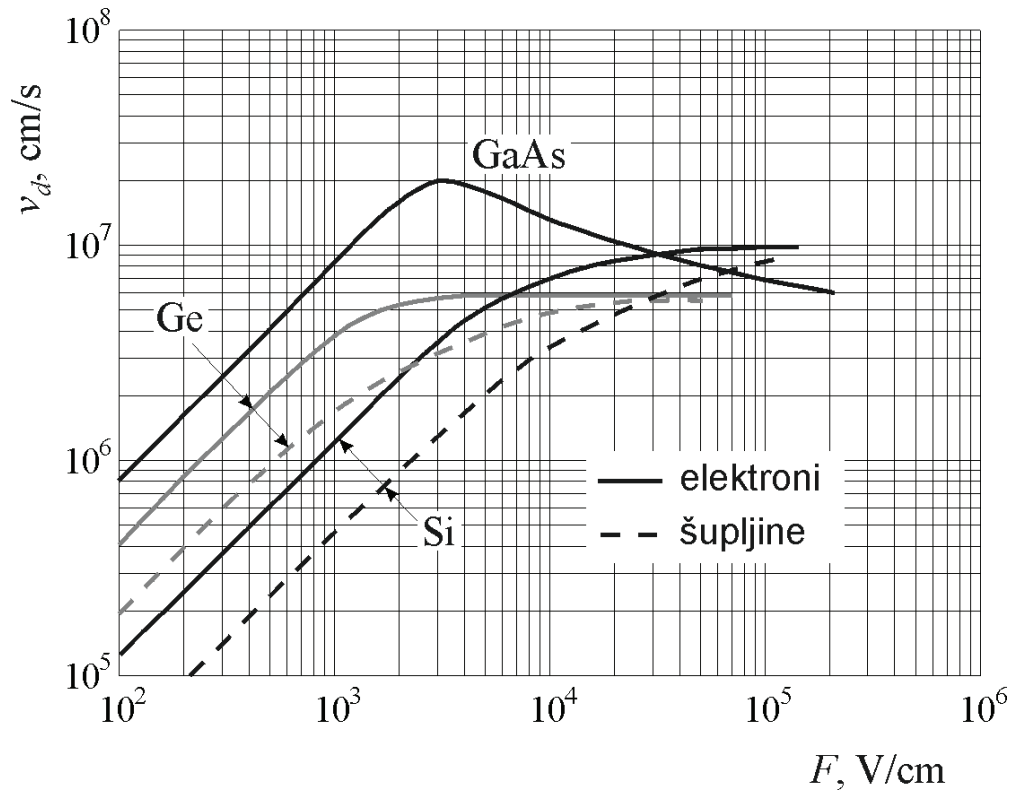
μ – **pokretljivost**

Pokretljivost

Poluvodič	$\mu_n, \text{cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_p, \text{cm}^2/\text{Vs}$
Si	1450	450
Ge	3900	1900
GaAs	8500	400



Zasićenje driftne brzine



Driftna struja

Gustoća struje – količina naboja koja u jedinici vremena prođe kroz jedinični presjek

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

Driftne struje nosilaca

$$\vec{J}_{Fn} = q n \mu_n \vec{F} \qquad \vec{J}_{Fp} = q p \mu_p \vec{F}$$

Ukupna driftna struja

$$\vec{J}_F = \vec{J}_{Fn} + \vec{J}_{Fp} = q (n \mu_n + p \mu_p) \vec{F}$$

Specifična vodljivost

Gustoća driftne struje

$$\vec{J}_F = \sigma \vec{F}$$

Specifična vodljivost

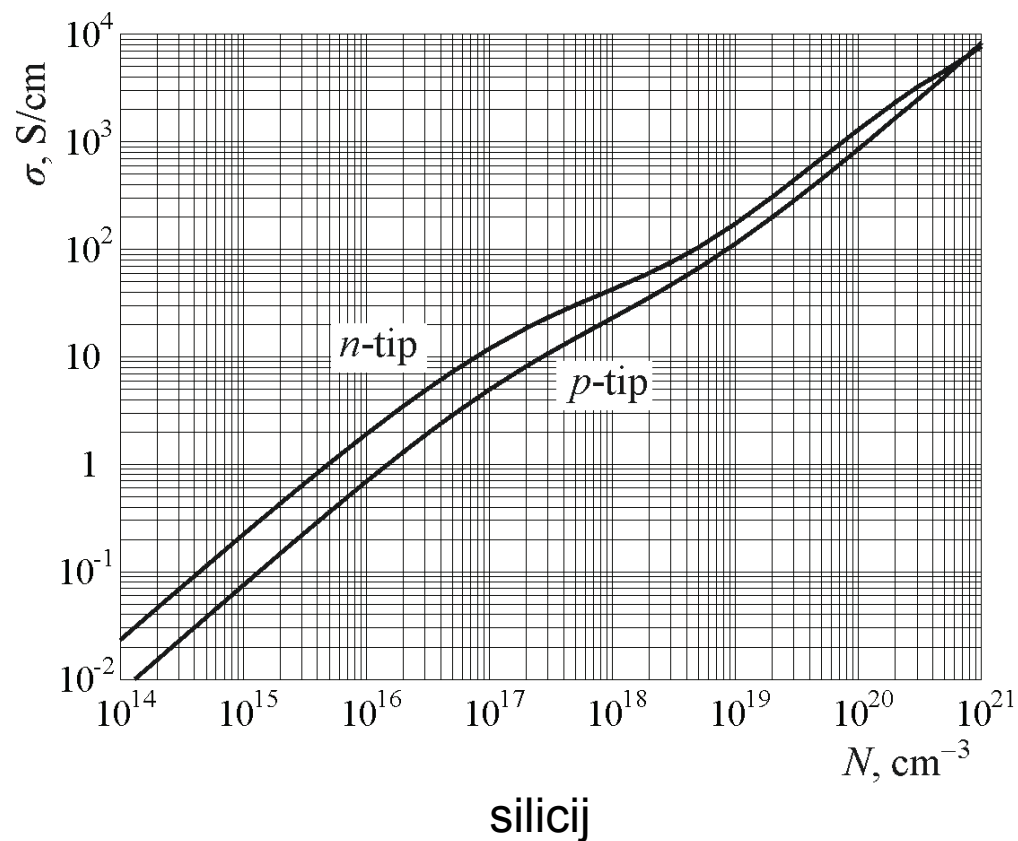
$$\sigma = q (n \mu_n + p \mu_p)$$

Specifični otpor

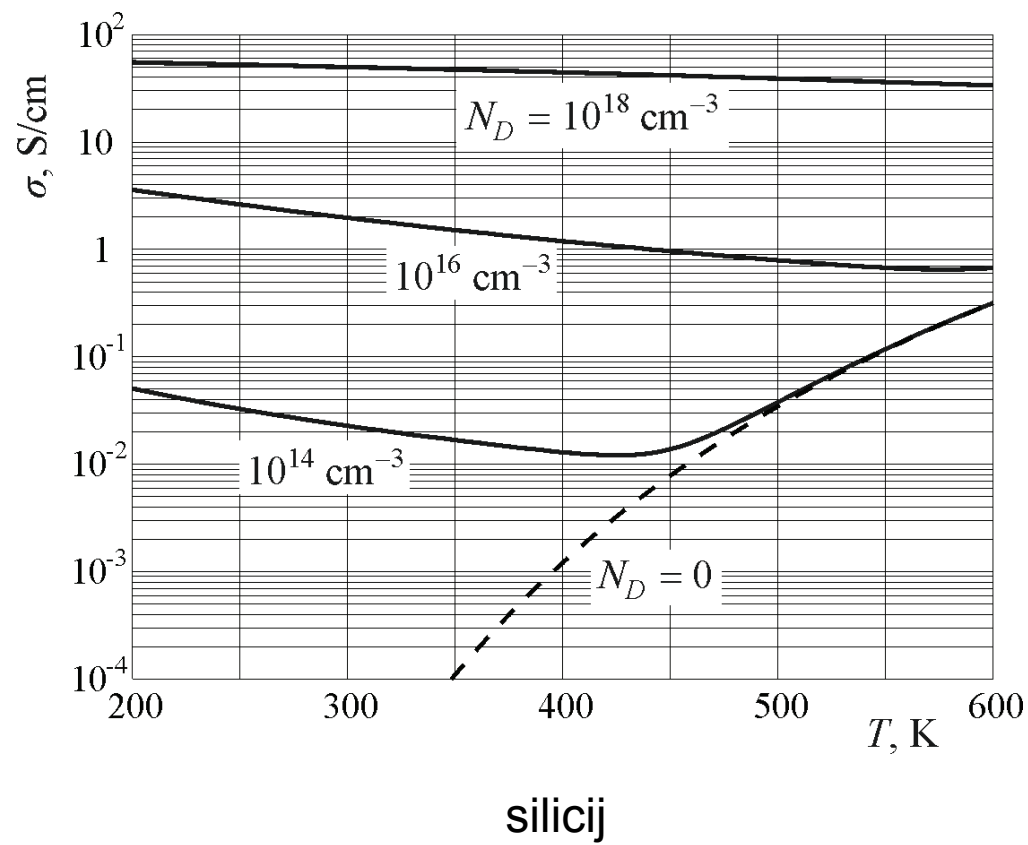
$$\rho = 1 / \sigma$$

- ❑ Intrinzični poluvodič – $\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p)$
- ❑ Poluvodič n -tipa – $\sigma_n = q n \mu_n = q (N_D - N_A) \mu_n$
- ❑ Poluvodič p -tipa – $\sigma_p = q p \mu_p = q (N_A - N_D) \mu_p$

Specifična vodljivost – ovisnost o koncentracijama primjesa



Specifična vodljivost – ovisnost o temperaturi



Primjer 2.6

Izračunati specifičnu vodljivost silicija na temperaturama $T_1 = 300$ K i $T_2 = 450$ K ako je:

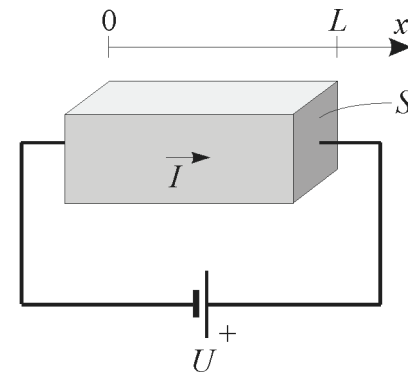
- a) dopiran s $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,
- b) dopiran s $N_A = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,
- c) dopiran s $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Na temperaturi $T_1 = 300$ K pokretljivosti nosilaca su $1360 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $447 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,
a na temperaturi $T_2 = 450$ K pokretljivosti su $625 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $190 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Primjer 2.7

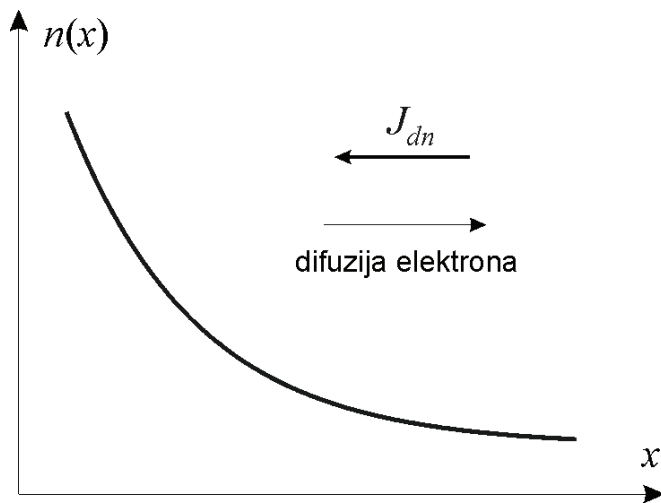
Na silicijski otpornik p -tipa oblika kvadra, dopiranog s $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ priključen je napon $U = 5 \text{ V}$ prema slici. Pokretljivosti elektrona i šupljina su $\mu_n = 1228 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $\mu_p = 420 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Duljina kvadra $L = 50 \text{ }\mu\text{m}$, a površina njegovog presjeka $S = 10 \text{ }\mu\text{m}^2$. Temperatura $T = 300 \text{ K}$. Izračunati:

- a) struju koja teče kroz otpornik ,
- b) specifični otpor silicija i otpor kvadra.



Difuzijska struja (1)

Uzrok – nejednolika raspodjela nosilaca



Elektroni se gibaju od više
prema nižoj koncentraciji
Struja elektrona suprotna je
smjeru gibanja elektrona

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

D_n – difuzijska konstanta

Difuzijska struja (2)

Jednodimenzionalna raspodjela

$$J_{Dn} = q D_n \frac{dn(x)}{dx} \quad J_{Dp} = - q D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Općenita trodimenzionalna raspodjela

$$\vec{J}_{Dn} = q D_n \text{grad } n \quad \vec{J}_{Dp} = - q D_p \text{grad } p$$

Einsteinove jednačbe

$$D_n = U_T \mu_n \quad D_p = U_T \mu_p$$

Naponski ekvivalent temperature

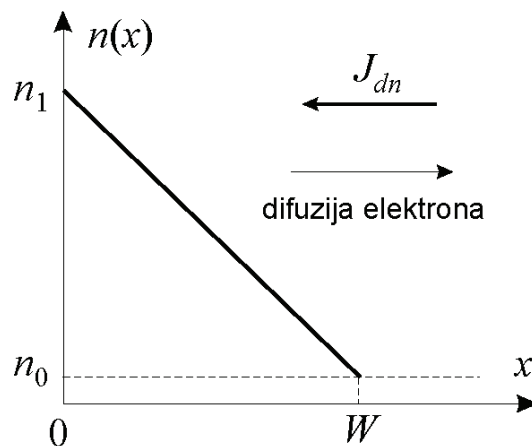
$$U_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600}, \text{ V} \quad \text{uz } T \text{ u Kelvinima} \quad \text{Za } T = 300 \text{ K} - U_T = 25,9 \text{ mV}$$

Primjer 2.8

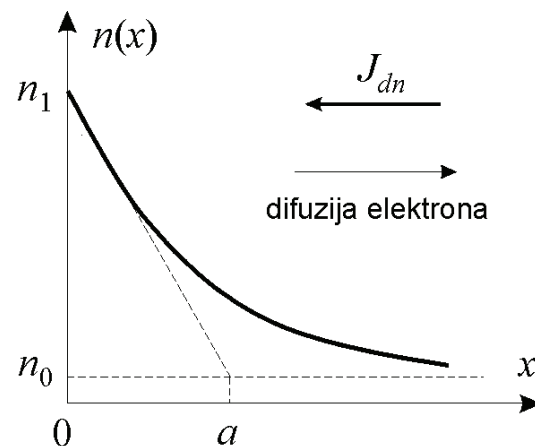
Izračunati gustoću difuzijske struje elektrona, na mjestima $x_0 = 0$, $x_1 = 5 \mu\text{m}$ i $x_2 = 10 \mu\text{m}$, ako se raspodjela elektrona mijenja:

- a) linearno prema slici a
- b) eksponencijalno prema slici b

Zadano je: $n_1 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $W = 10 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$, $\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $T = 300 \text{ K}$.



a)



b)

Ukupna struja poluvodiča

Struja dva tipa nosilaca

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$$

Za svaki tip driftna i difuzijska struja

$$\vec{J}_n = \vec{J}_{Fn} + \vec{J}_{Dn} = q n \mu_n \vec{F} + q D_n \text{grad} n$$

$$\vec{J}_p = \vec{J}_{Fp} + \vec{J}_{Dp} = q p \mu_p \vec{F} - q D_p \text{grad} p$$