POLUVODIČI

Specifična vodljivost: < od spec. vod. vodiča
> od spec. vod. izolatora } 10^{-6} S/cm $< \sigma < 10^{3}$ Scm

↳ ne dešava slučajno → mi namještamo = TEMELJNO SVOJSTVO

Struktura čvrstih tijela

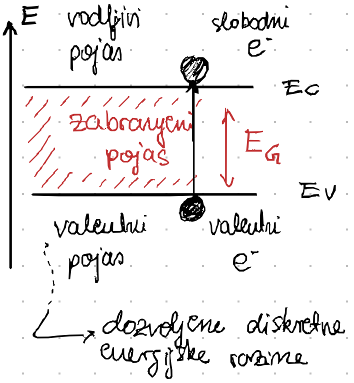
* mi najviše radimo sa silicijem

- pravilan raspored atoma = KRISTAL
- nepravilan raspored = AMORFNI materijal

· kristalni materijali < monokristali – pravilan raspored u cijelom volumenu; polikristali – pravilan raspored unutar zrna

naboj elektrona: $q = 1{,}602 \times 10^{-19}$ As

KRISTAL



} elektroni koji su slobodni za kretanje po kristalu ⟹ određuju vodljivost

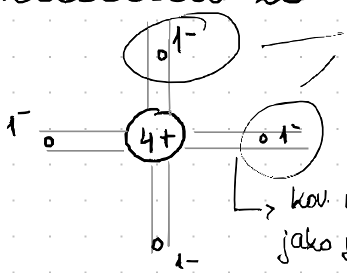
u njega ne dolaze e⁻ (preskaču s većom en u vodljivi pojas)

} elektroni vezani za matične atome

↳ (na T>0)
dio e⁻ se oslobađa od jezgre (valentni → vodljivi)

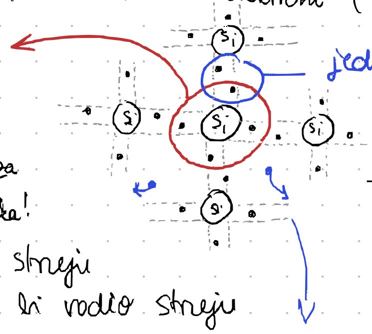
T=0K = −273°C = svi e⁻ vezani za jezgre
↳ nema struje

Struktura silicija



↳ kov. veza jako jaka!

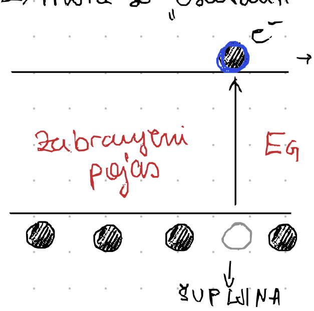
to su valentni elektroni (donji pojas)



jedna kov veza sadrži 2 e⁻ (taj i susjedov)

→ vanjska ljuska mora imati 8 e⁻ da bi se stvorila kristalna struktura

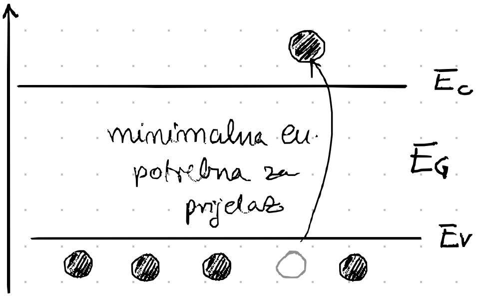
* valentni pojas ne vodi struju
↳ mora se „osloboditi" da bi vodio struju



→ preskočio je preko zabranjenog pojasa – iskočio iz čvrste veze
↳ energija koja je potrebna da preskoči = en. da se odlijepi iz val. pojasa

· kada se oslobodi, on landra okolo ali u nekom trenu će past u neku šupljinu

Zabranjeni pojas → Energy gap



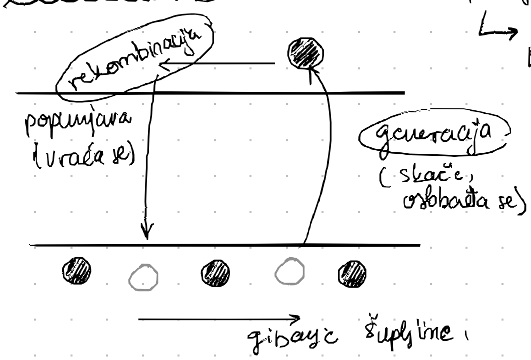
vodiči → nema zabranjeni pojas

poluvodiči → $E_G \sim$ 1eV

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

izolatori → $E_G > 5\,eV$

Čisti silicij



* prosječno vrijeme između generacije i rekombinacije
↳ vrijeme života τ

Koncentracija nosilaca:

$n = p = n_i$

n (e^-) neg. naboj

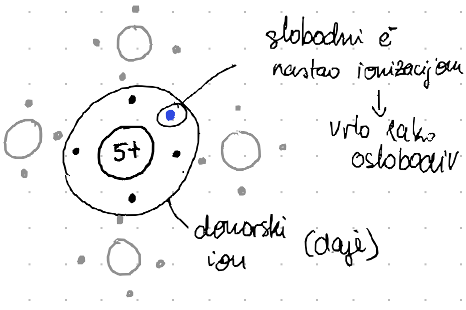
p (šupljine) poz. naboj

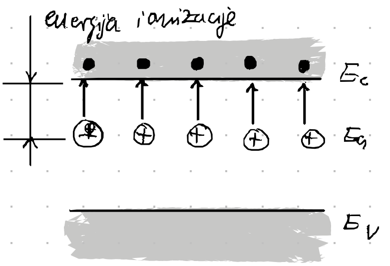
kada imamo čisti (intrinzični Si)

· za svaki nastali e^- dobiven preskakanjem nastaje nova šupljina

* intrinzični silicij nam nije baš od koristi
↳ tretiramo ga onečistiti kako bi dobili šupljine = šupljine vode struju!!

Dopirani silicij — n-tip





peti e^- je slabo vezan
↓
ako su donorski trebaju jako malo energije

– na sobnoj temp taj peti otpada (otpadaju na > 100K)

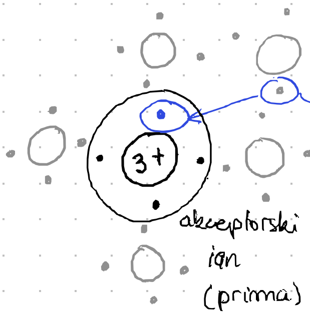
*donorski e^- ne stvaraju šupljine → za svaki e^- vezan je p^+

$n\,(e^-) \gg p$ (šupljina)

donor = peterovalentna primjesa

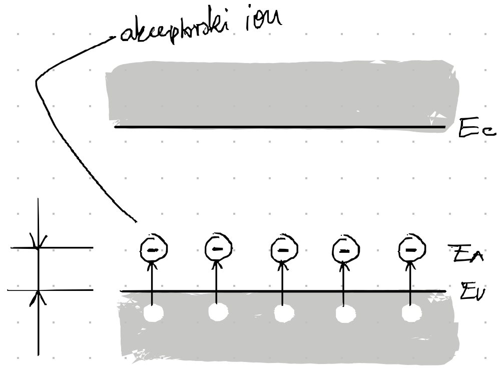
=> u silicij dodajemo atome materijala koji imaju $5e^-$ u vanjskoj ljusci
↳ peti e^- je predan i giba se → provodi struju

Dopirani silicij - p-tipa



šupljina nastala ionizacijom akceptora

- kristalna strukt. ima OGRANIČEN broj e^-
  - osjećaju privlačnu silu poz (+) naboja



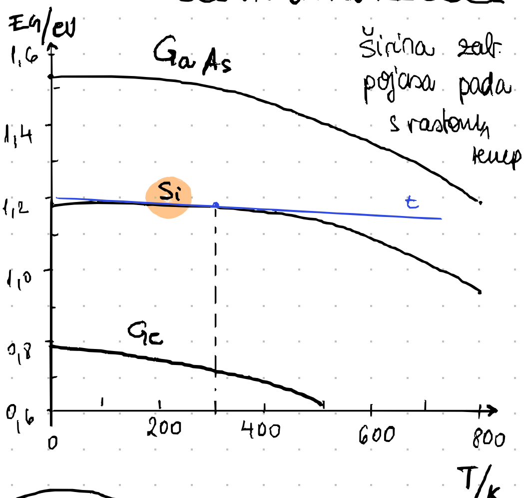
akceptor - trovalentna primjesa

$p >> n$ (šupljine su većinski nosioci)

E_A je jako blizu E_V
→ e^- bez problema skaču (≳50K)

Poluvodički materijali - Silicij (Si), Germanij (Ge)

Širina zabranjenog pojasa E_g



širina zab. pojasa pada s rastom temp

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

te vrijednosti možemo izračunati

→ koristimo aproksimaciju pravcem (derivacija)

(u podsjetniku) => $E_g(T) = E_{g0}' + aT$

Primjer: Si

$T_1 = 300K$

$T_2 = 360K$

$\Delta E_g = ?$

$\Delta E_g = E_{g_2} - E_{g_1}$

$E_g = aT + E_{g0}'$

$\Delta E_g = aT_2 + \cancel{E_{g0}'} - aT_1 - \cancel{E_{g0}'}$

$\Delta E_g = a(T_2 - T_1) = -15{,}3\,meV$

u podsjetniku

Ge

$\Delta E_g = a_g(T_2 - T_1) = -3{,}85 \times 10^{-4}\, eV/\cancel{K} \cdot 60\cancel{K} = -23{,}1\,meV$

Intrinzična koncentracija!

→ manja za vodič sa većim E_G

* Formule u službenom podsjetniku

intrinzična konc.

$$n_i = CT^{3/2} \exp\left[-\frac{E_G(T)}{2E_T}\right]$$

energ. ekvivalent temp.

$$E_T = k_B T = \frac{T}{11600}\ eV$$

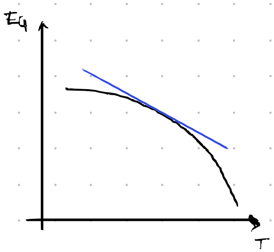
Boltzmanova konstanta:

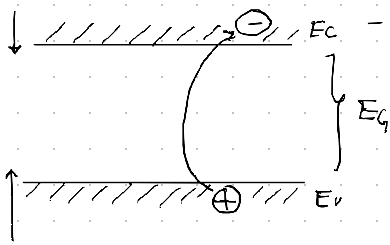
$k = 1{,}381 \times 10^{-23}\ J/K = \underbrace{8{,}620 \times 10^{-5}\ eV/K}_{\text{ovo koristimo}}$

E_G zamijenimo: $E_G(T) = aT + E'_{G0}$

$$\Rightarrow n_i = C_1 T^{3/2} \exp\left[-\frac{E'_{G0}}{2E_T}\right]$$

$\Rightarrow n_i = ?$ $T\uparrow$, $E_G = ?$





– povećanjem temperature smanjuje se E_G

↓

povećava se $n_i \uparrow$

Primjer 2.)

Δn_i?

$T_1 = 300K$

$T_2 = 360K$

$\Delta T = 60K$

* postotna promjena:

$$\frac{\Delta T}{T_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_1} = \frac{T_2}{T_1} - 1$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta T}{T_1} = 0{,}2 = +20\%$$

porasla je temp

$$\frac{n_{i2}}{n_{i1}} = \frac{\cancel{C_1} T_2^{3/2} \exp\left[-\frac{E'_{G0}}{2E_{T2}}\right]}{\cancel{C_1} T_1^{3/2} \exp\left[-\frac{E'_{G0}}{2E_{T1}}\right]}$$

$$= \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{E'_{G0}}{2E_{T2}} + \frac{E'_{G0}}{2E_{T1}}\right]$$

$$= \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{E_{G0}}{2k}\left(\frac{1}{E_{T2}} - \frac{1}{E_{T1}}\right)\right]$$

$$E_{T_1} = \frac{T_1}{11600}\ eV$$

$$E_{T_2} = \frac{T_2}{11600}\ eV$$

* $E'_{G0}(Si) = 1{,}196\ eV$

$$\frac{n_{i2}}{n_{i1}} = 62$$

postotna promjena:

$$\Rightarrow \frac{\Delta n}{n_{i1}} = \frac{n_{i2} - n_{i1}}{n_{i1}} = \frac{n_{i2}}{n_{i1}} - 1 = 61$$

$$\boxed{\frac{\Delta n}{n_{i1}} = 6100\%}$$

koncentracija je porasla 6100% (eksponencijalna funkcija)

Koncentracija nosilaca

▸ Zakon očuvanja termodinamičke ravnoteže

$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ (koncentracija (e^-) x konc. (šupljina) = n_i^2)

⟶ na zadanoj temperaturi je uvijek konstantan

▸ Zakon električne neutralnosti

suma poz(+) naboja = suma neg (−) naboja

$q\,(p + \quad) = q\,(n + \quad)$

↓ šupljine ↓ e^-

N_D − donori
N_A = akceptori
} nepokretni naboji, ne vode struju

$N_D \rightarrow \oplus$ (nakon ionizacije predaju)

$N_A \rightarrow \ominus$ (−||− primanjem e^-)

$\Rightarrow q\,(p + N_D^+) = q\,(n + N_A^-)$

▸ Čisti poluvodič

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

▸ poluvodič n-tipa

(u n-tipu $N_D > N_A$!)

n-tip Si

$n = ?$ $p = ?$

! ako je n-tip Si obavezno računamo n !

$np = n_i^2 \longrightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$

$p + N_D^+ = n + N_A^-$

$\frac{n_i^2}{n} + N_D^+ - N_A^- - n = 0 \;/ \cdot n$

$n_i^2 + n(N_D^+ - N_A^-) - n^2 = 0 \;/ (-1)$

$n^2 - n(N_D^+ - N_A^-) - n_i^2 = 0$

$n_{1,2} = \frac{(N_D^+ - N_A^-) \pm \sqrt{(N_D^+ - N_A^-) + 4n_i^2}}{2}$

samo jedno rješenje je točno

$n_i > 0$

$\Rightarrow n = \frac{(N_D^+ - N_A^-) + \sqrt{(N_D^+ - N_A^-) + 4n_i^2}}{2}$

Primjer:

$T = 300K$

$n_i = C_1 \cdot T^{3/2} \exp\left[-\frac{E_{g0}}{2E_T}\right] \ldots = 1{,}448 \times 10^{10}\,cm^{-3}$

$N_D = 10^{14}\,cm^{-3}$

$N_A = 0$

$\longrightarrow n = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} = \frac{10^{14} + \sqrt{10^{28} + \cancel{4 \cdot 2{,}1 \times 10^{20}}}}{2}$

možemo zanemariti jer je malo

≈ 0

$n = 10^{14}\,cm^{-3} = N_D \longrightarrow \boxed{n = N_D}$

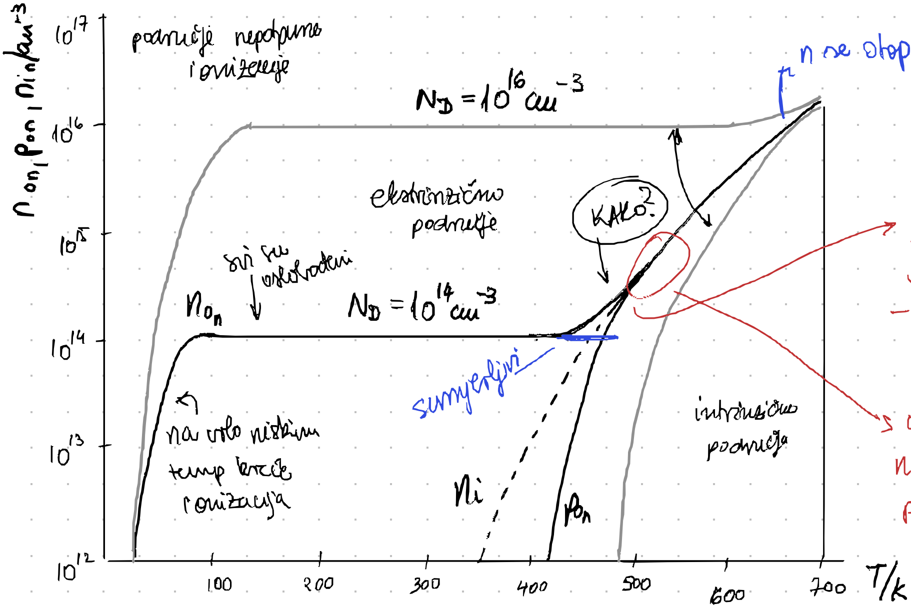
$N_D \gg n_i$ (npr 10x veći)

$\hookrightarrow n \doteq N_D$

▸ Ekstrinzično temp. područje $(N_D - N_A) \gg n_i$

$n \approx N_D - N_A$

Temperaturna ovisnost



donore ubacimo jednom i ne mijenjaju više
– samo se n_i mijenja porastom temp
→ u jednom trenu n_i postaje sumjerljiv pa „prešiša" N_D

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

⇒ Koncentracija nosilaca

▶ poluvodič p-tipa $N_A > N_D$

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

* izvod kao za n-tip

$n \cdot p = n_i^2 \qquad q(n + N_A^-) = q(p + N_D^+)$ ekstrinzično temp područje: $p \approx N_A - N_D$

▶ Kompenzirani poluvodič $N_A = N_D \rightarrow n = p = n_i$

Primjer: Odrediti tip poluvodiča i konc. slobodnih nosilaca u silicju na $T=300K$ za:

a) $N_D = N_A = 0$

$\hookrightarrow$ intrinzični silicij $\Rightarrow n = p = n_i = C_1 T^{3/2} \exp\left[-\frac{E_{G0}}{2E_T}\right]$

$T=300K$

$E_T = \frac{T}{11600} = 25{,}9\ meV$

$n_i = 1.45 \times 10^{10}\ cm^{-3}$

b) $N_D = N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$

- djeluje kao intrinzični $\rightarrow n = p = n_i \rightarrow n_i = 1{,}45 \times 10^{10}\ cm^{-3}$

$\Rightarrow$ ali u ovom materijalu postoje neke nečistoće samo su izjednačene (utječe na protok struje, ali ne na koncentraciju)

c) $N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$ $\quad N_A = 1{,}5 \times 10^{16}\ cm^{-3}$

$N_A > N_D \rightarrow \boxed{p\text{-tip}}$ poluvodiča

1. računamo p, a za to nam treba $N_{A\,neto}$

$N_{A\,neto} = N_A - N_D = 5 \times 10^{15}\ cm^{-3}$

$N_{A\,neto} >> n_i$? $\quad 5 \times 10^{15}\ cm^{-3} >> 1.45 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ ✓, prema tome $p = N_{A\,neto}$

$p = 5 \times 10^{15}\ cm^{-3}$

2. $n = ?$ $\quad n \cdot p = n_i^2 \rightarrow n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{2{,}1 \cdot 10^{20}}{5 \times 10^{15}}$

$n = 4{,}21 \times 10^{4}\ cm^{-3}$

d) $N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$ $\quad N_A = 10^{15}\ cm^{-3}$ $\quad N_D > N_A \rightarrow \boxed{n\text{-tip}}$

I) $N_{D\,neto} = N_D - N_A = 9 \times 10^{15}\ cm^{-3}$

II) $N_{D\,neto} >> n_i$? $\rightarrow n_i = 1{,}45 \times 10^{10}\ cm^{-3} << 10^{15}\ cm^{-3}$ ✓

$n = N_{D\,neto} = 9 \times 10^{15}\ cm^{-3}$

III) $p = \frac{n_i^2}{\ } \rightarrow p = 2{,}34 \times 10^{4}\ cm^{-3}$

Primjer 2.4:

$N_D = 1{,}5\times10^{16}\,cm^{-3}$ $\quad N_A = 1{,}55\times10^{16}\,cm^{-3}$, $\quad n, p = ?$

$N_A > N_D \rightarrow \boxed{p-tip}$

a) $T = 0°C = 273K$

b) $T = 100°C = 373K$

$N_{A\,neto} = 5\times10^{14}\,cm^{-3}$ $\quad N_{A\,neto} >> n_i$?

↳ trebamo izračunati n_i

a) $T = 273K$

$$n_i(T=273K) = C_1 \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{G0}'}{2E_T}\right) = 1{,}28\times10^{9}\,cm^{-3}$$

$N_{A\,neto} >> n_i(T=273K)$ ✓ $\longrightarrow p = N_{A\,neto} = 5\times10^{14}\,cm^{-3}$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = 3{,}28\times10^{3}\,cm^{-3} = n$$ raste

b) $T = 373K$

$$n_i(T=373K) = C_1 T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{G0}'}{2E_T}\right) = 3{,}07\times10^{16}\cdot(373k)^{3/2}\exp\left(-\frac{1{,}196}{2\cdot\frac{373}{11600}}\right)$$

$n_i = 1{,}85\times10^{12}\,cm^{-3}$

$N_{A\,neto} >> n_i \Longrightarrow p = N_{A\,neto} = 5\times10^{14}\,cm^{-3}$

– na višoj temperaturi je stalna većinska koncentracija

$$n = \frac{n_i^2}{p} = 6{,}87\times10^{9}\,cm^{-3} = n$$ raste

c) $T = 473K$

$$n_i(T=473K) = 3{,}07\times10^{16}\cdot(473)^{3/2}\exp\left(-\frac{1{,}196\cdot11600}{2\cdot373}\right) = 1{,}35\times10^{14}\,cm^{-3}$$

$N_{A\,neto} \not\gg n_i$ $\longrightarrow$ $N_{A\,neto}$ je sumjerljivo sa n_i $\Rightarrow$ p računati preko kvadratne

$$p = \frac{(N_D-N_A)+\sqrt{(N_D-N_A)^2+4n_i}}{2} = 5{,}34\times10^{14}\,cm^{-3}$$

$\hookrightarrow n = \frac{n_i^2}{p} \longrightarrow n = 3{,}41\times10^{13}\,cm^{-3}$

MANJINSKI NOSIOCI NEPRESTANO RASTU, A VEĆINSKI TEK KAD POSTANU SUMJERLJIVI