MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU
Računske vežbe

7. POLUPROVODNI MATERIJALI

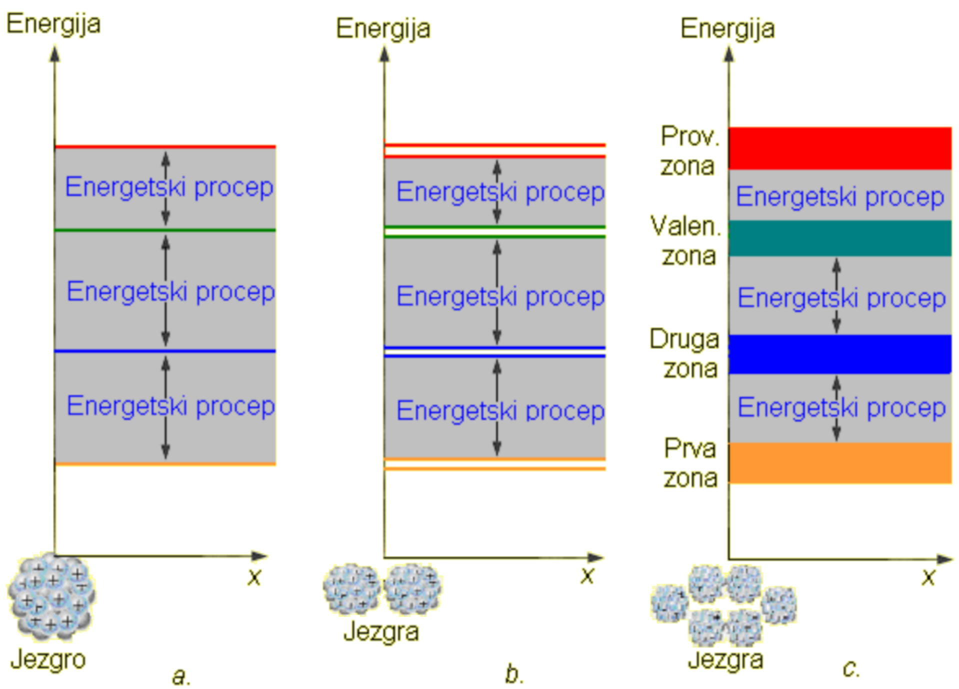
TEORIJSKI PREGLED

Poluprovodni materijali (**poluprovodnici**) su materijali čija električna svojstva zavise od koncentracije primesa i širine energetskog procepa (širine zabranjene zone). **Sopstveni** poluprovodnici su oni kod kojih svojstva zavise od elektronske strukture samog poluprovodnika a primesni ili **dopirani** poluprovodnici su oni čija svojstva zavise od vrste i koncentracije primesa. Specifična električna provodnost ovih materijala je od 10^{-6} do 10^{8} Ωm, dok je temperaturni koeficijent otpornosti manji od nule. Kod poluprovodnika je jako izražen Hallov efekat, a osetljivi su i na elektromagnetno zračenje.

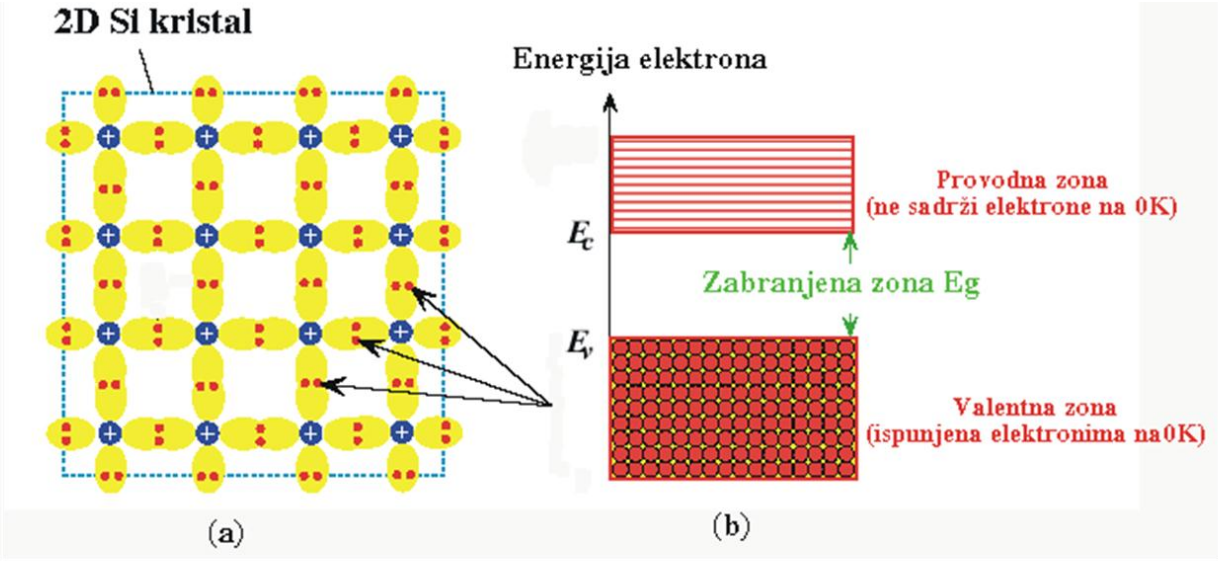
Potpuno čist kristal poluprovodnika, kod koga su svi elektroni povezani valentnim vezama ponašao bi se kao izolator. Međutim, već na sobnoj temperaturi, usled termikih vibracija kristalne rešetke, određeni valentni elektroni povećavaju svoju energiju do te mere da mogu da se oslobode valentnih veza i postaju slobodni elektroni. Ovaj elektron ostavlja prazno mesto u atomu koje se naziva **šupljina**. Slobodni elektroni i šupljine u kristalu poluprovodnika imaju ograničeno vreme života, jer se u kretanju kroz kristal susreću i rekombinuju (poništenje elektron-šupljina) uspostavljajući ponovo valentene veze. Provodnost kod provodnika je ostvarena pomoću elektrona, dok kod poluprovodnika u provođenju struje učestvuju i šupljine.

Poluprovodnike karakteriše zonska struktura. Energetski nivoi atoma mogu se predstaviti horizontalnim linijama sa energetskim procepom (energija koju ne mogu imati). Kada se spoje dva atoma doći će do cepanja svakog energetskog nivoa na dva, koji su vrlo malo pomereni. S obzirom da se u kristalnoj rešetki nalazi veliki broj atoma u međusobnoj vezi, svaki nivo se cepa u veći broj novih, međusobno pomerenih nivoa, koji obrazuju dozvoljene energetske zone odvojene energetskim procepima (slika 1). Za analizu svojstva poluprovodnika posmatraju se dva najviša energetska procepa, najviša energetska zona je skoro prazna i naziva se **provodna zona**. Druga niža energetska zona popunjna elektronima iz spoljašnje orbite atoma poluprovodnika, valentnim elektornima i naziva se **valentna zona**. Drugim rečima, valentna zona odgovara elektronskim stanjima valentnih elektrona koji učestvuju u formiranju kovalentne veze. Na apsolutnoj nuli ova stanja su popunjena. Provodna zona odgovara energetskim stanjima viška energije i na apsolutnoj nuli su ova stanja nepopunjena. Provodna zona je od valentne zone razdvojena nivom energetskih nivoa koje elektroni ne mogu da zauzimaju i naziva se **zabranjenom zonom**. Širina zabranjene zone predstavlja minimum energije koji je potrebno dovesti da bi elektron prešao iz valentne u provodnu zonu. Elektron ne prelazi fizički, već to znači da ima veću energiju tako da postaje slobodan elektron koji učestvuje u provođenju struje. Širina zabranjene zone za Si je 1.12 eV, za Ge je 0.66 eV, dok je za GaAs je 1.42 eV. Ako je širina zabranjene zone do 3 eV materijal se smatra poluprovodnikom. Iznad te energije zabranjene zone, materijali se smatraju izolatorima.

U koliko elektron iz valentne zone dobije energiju $E \geq Eg$, on može da savlada energetsku barijeru i da pređe u provodnu zonu oslobađajući za sobom šupljinu u valentnoj zoni. Stvaranje para elektron-šupljina može se postići termičkom energijom $Eg \leq kT$, ozračivanjem poluprovodnika energijom $h\nu \geq Eg$, dopiranjem i jonizacijom primesa na višim temperaturama. Elektroni u provodnoj zoni kao i šupljine u valentnoj zoni predstavljaju dva osnovna tipa nosilaca naelektrisanja koji doprinose protoku struje u poluprovodnicima pod dejstvom spoljašnjeg polja. Na slici 2 prikazana je ilustracija silicijumskog kristala – **sopstvenog, nedopiranog poluprovodnika** sa odgovarajućom interpretacijom energetskim dijagramom.



Slika 1. Energetski nivoi atoma (a), dva atoma (b) i kristala (c)



Slika 2. Sopstveni poluprovodnik

Specifična električna provodnost poluprovodnika data je opštim izrazom:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU
Računske vežbe

Pokretljivosti elektrona i šupljina date su izrazima:

$$\mu_n = \frac{e\tau_n}{m_e}, \qquad \mu_p = \frac{e\tau_p}{m_p}.$$

Koncentracija elektrona u provodnoj zoni je:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right), \qquad N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2}.$$

Koncentracija šupljina u valentnoj zoni je:

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right), \qquad N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{3/2}.$$

U datim formulama, E_c je energija koja odgovara dnu provodne zone, E_v je energija koja odgovara vrhu valentne zone, dok je E_f- Fermijeva energija. Fermijeva energija se definiše kod provodnika, kao energije ispod koje su svi nivoi popunjeni, a iznad koje svu svi nivoi prazni. Kod sopstvenih poluprovodnika, uzima se da je Fermijev nivo na sredini zabranjene zone. Sada se može pisati:

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right)\exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right) = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right).$$

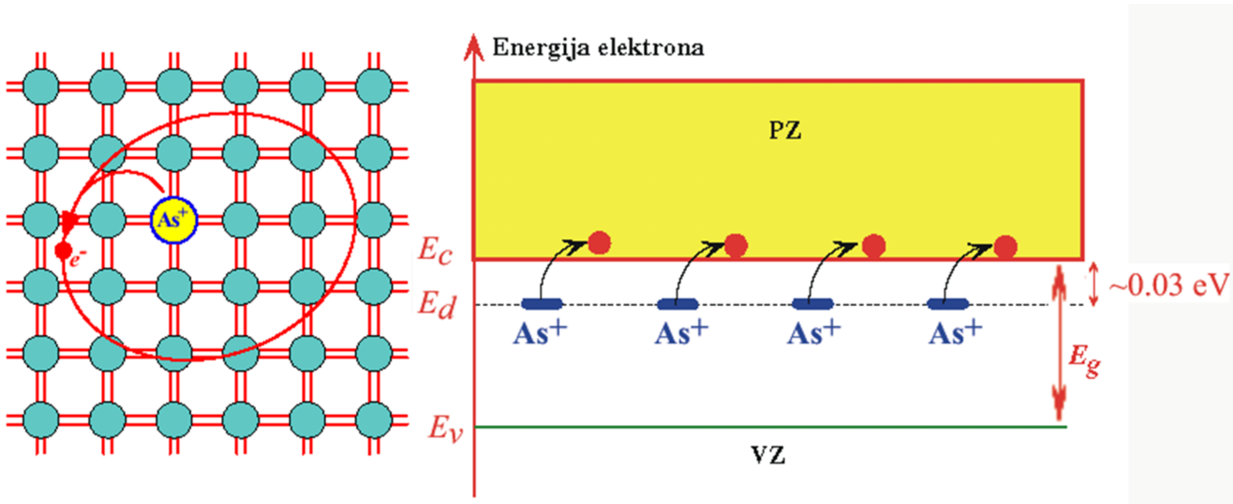
Proizvod $n{\cdot}p$ zavisi samo od temperature i veličine Eg, a ne i od položaja Fermijevog nivoa. Za sopstvene poluprovodnike (nedopirane poluprovodnike) $n=p$ pa jednačina ima oblik:

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v}\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right).$$

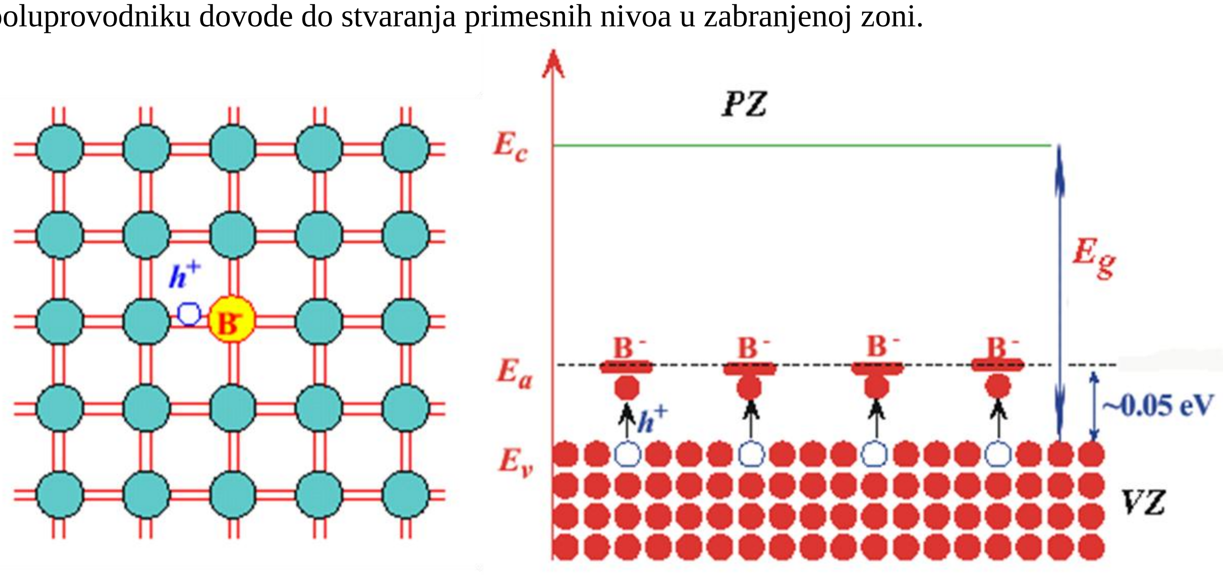
Primesni (dopirani) poluprovodnici.

N-tip poluprovodnika nastaje kada se četvorovalentnim elementima (Si) dodaju petovalentne primese (P, As, Sb). S obzirom da je broj primesnih atoma u jedinici zapremine vrlo mali u poređenju sa brojem atoma poluprovodnika, svaki atom primese normalno je okružen atomima poluprovodnika. Kako samo četiri valentna elektrona primese ulaze u valentne veze, peti valentni elektron je samo slabo vezan za atom, te se lako može osloboditi veze i postati slobodan elektron. Energija potrebna za oslobađanje ovog elektrona je vrlo mala, reda 0,01 eV do 0,02 eV kod germanijuma i 0,04 eV do 0,07 eV kod silicijuma, tako da su već na vrlo niskim temperaturama, a posebno na sobnoj temperaturi, svi elektroni koji potiču od atoma primesa "u" provodnoj zoni i slobodno se mogu kretati kroz kristal. Petovalentne primese daju slobodne elektrone, te se zovu **donorske primese**, ili kratko donori i njihova koncentracija se označava sa N_D. Donorski atomi gubitkom elektrona postaju pozitivni joni i ostaju vezani u strukturi kristalne rešetke, ali treba napomenuti da je dodavanjem donora poluprovodnik ostao električno neutralan. **Elektroni** se u n-tipu poluprovodnika često zovu **većinski**, a **šupljine - manjinski** nosioci naelektrisanja. U dijagramu energetskih nivoa prisustvo donorskih primesa ima za posledicu postojanje dodatnog energetskog nivoa unutar zabranjene zone, i to u blizini dna provodne zone. Taj nivo se zove donorski nivo E_D. To što se donorski nivo nalazi u zabranjenoj zoni u blizini provodne zone leži u činjenici da je za "prebacivanje" elektrona (koji potiču od donorskih atoma) u provodnu zonu potreban vrlo mali iznos energije.



Slika 3. Ilustracija za n-tip poluprovodnika

P-tip poluprovodnika nastaje kada se četvorovalentnim elementima (Si) dodaju trovalentne primese (B, Ge, Al, In). Trovalentnoj primesi nedostaje jedan elektron da dopuni valentnu vezu. Ona se kompletira na taj način što je dopuni valentni elektron iz susedne veze, ili, drugim rečima, da bi se obrazovala i četvrta valentna veza, privlači se jedan elektron iz neke obližnje veze. Tako se stvara šupljina na mestu odakle je valentni elektron privučen. Kako trovalentne primese kompletiraju valentne veze primajući elektrone iz valentne zone, zovu se **akceptorske primese**, ili kratko akceptori, a njihova koncentracija obeležava se sa N_A. Akceptorski atom postaje negativan jon čvrsto vezan za kristalnu rešetku. Energije jonizacije akceptorskih primesa su vrlo male i leže u istom intervalu energija kao i za donorske primese, tako da je broj šupljina po na sobnoj tempertauri veoma blizak broju akceptorskih primesa. U poluprovodniku p-tipa **šupljine** su **većinski**, a **elektroni manjinski** nosioci naelektrisanja. Akceptorske primese uvode u dijagram energetskih nivoa dodatni akceptorski nivo E_A, koji leži unutar zabranjene zone i to u blizini vrha valentne zone. Dakle, prisustva stranih akceptorskih i donorskih primesa u poluprovodniku dovode do stvaranja primesnih nivoa u zabranjenoj zoni.



Slika 4. Ilustracija za p-tip poluprovodnika

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU
Računske vežbe

Za poluprovodnike važi **jednačina elektroneutralnosti** koja ima oblik:

$$n + N_A - p_a = p + N_D - n_d$$

gde je N_D - koncentracija donorskih primesa, N_A - koncentracija akceptorskih primesa, n_d - koncentracija elektrona na donorskom nivou (nejonizovani donori), p_a - koncentracija šupljina na akceptorskom nivou (nejonizovani akceptori). Za sopstveni (besprimesni) poluprovodnik $N_D=N_A=n_d=p_a=0$, i iz jednačine elektroneutralnosti sledi da je $n=p$. Za sopstveni poluprovodnik pod uslovom da je $m_n^*=m_p^*$ Fermijev nivo je:

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} = \frac{Eg}{2}.$$

Za **n - tip** poluprovodnika $N_A=p_a=0$ i jednačina elektroneutralnosti ima oblik

$$n = p + N_d - n_d$$

Pod uslovom da su sve primese jonizovane $n_d = 0$, može se napisati da je $\boldsymbol{n=N_D}$. Koncentracija manjinskih nosilaca računa se kao:

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}.$$

Za **p - tip** poluprovodnika N_D, $n_d = 0$ jednačina elektroneutralnosti ima oblik

$$n + N_A - p_a = p$$

Pod uslovom da su sve primese jonizovane pa=0, može se smatrati da je $\boldsymbol{p=N_A}$. . Koncentracija manjinskih nosilaca računa se kao:

$$n = \frac{n_i^2}{N_A}.$$

Kada je $N_D=N_A$ govori se o **potpuno kompenzovanom** poluprovodniku, dok kada je $N_A > N_D$ nastaje delimično kompenzovani p- tip poluprovodnika, odnosno kada je $N_D > N_A$ dobija se delimično kompenzovani n-tip poluprovodnika.

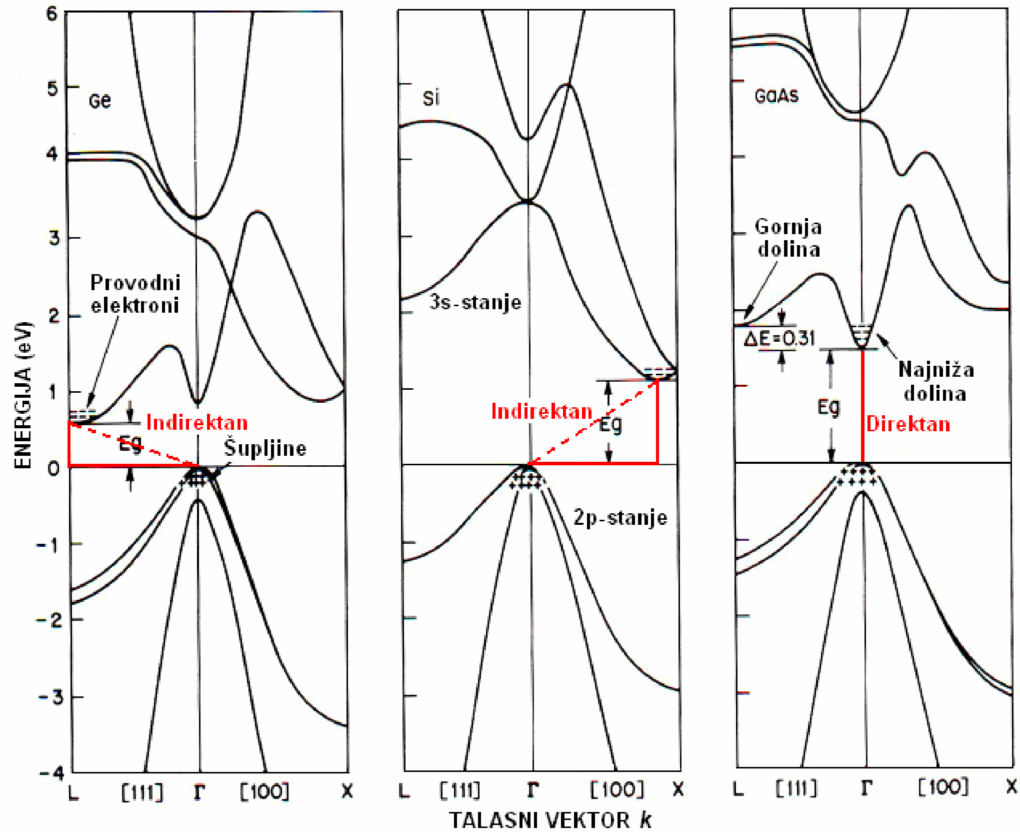
Provodnost poluprovodnika. Gustina struje data je izrazom:

$$j = j_n + j_p = \sigma \cdot K$$

gde je specifična provodnost poluprovodnika:

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p) = e(N_C N_V)^{1/2}(\mu_n + \mu_p)e^{-\frac{E_g}{2kT}}.$$

Zavisnosti energije od talasnog vektora k: E(k) su veoma složene i pokazuju apsolutne minimume i maksimume energije u provodnoj i valentnoj zoni u k-prostoru (slika 5). Ako se apsolutni minimum provodne zone (dno provodne zone) poklapa sa apsolutnim maksimumom provodne zone (vrh valentne zone) govori se o **poluprovodniku sa direktnim prelazom** (GaAs). Kada se apsolutni minimum ne nalazi ispod vrha valentne zone govori se o **poluprovodniku sa indirektnim prelazom** (Si, Ge).



Slika 5. Poluprovodnici sa direktnim i indirektnim prelazom

Hallov efekat je mnogo izraženiji kod poluprovodnika, gde su prisutni i elektroni i šupljine, nego kod provodnika. Obe vrste nosilaca skreću pod dejstvom Lorencove sile, tako da Hallov napon zavisi od odnosa pokretljivosti i koncentracije elektrona i šupljina. Holova konstanta za poluprovodnike je:

$$R_H = \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{e(\mu_p p + \mu_n n)^2}.$$

Holova konstanta za n-tip poluprovodnika kada je n>>p:

$$R_H = -\frac{1}{en}.$$

Za p-tip poluprovodnika kada je p>>n:

$$R_H = \frac{1}{ep}.$$

Za sopstveni tip poluprovodnika $n = p \approx n_i$

$$R_H = \frac{\mu_p^2 - \mu_n^2}{en_i(\mu_p + \mu_n)^2}.$$

Holov napon je:

$$U_H = \frac{R_H BI}{h}.$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU
Računske vežbe

ZADATAK 1. Izračunati koncentraciju primesa u Si po m^3 ako je koncentracija primesa 1ppm, d_{Si}=2.3g/cm^3, M_{Si}=28.1g/mol.

Rešenje:
Na osnovu poznate gustine i molarne mase dobija se:

$$N_{Si} = \frac{2.3g/cm^3 \cdot N_A}{28.1g/mol} = \frac{2.3g/cm^3 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} 1/mol}{28.1g/mol}$$

$$N_{Si} = 4.93 \cdot 10^{22} cm^{-3}$$

$$N_{Si} = 4.93 \cdot 10^{28} m^{-3}$$

$$N_{prim} = \frac{N_{Si}}{10^6} = 4.93 \cdot 10^{22} m^{-3}$$

.

ZADATAK 2. U uzorku Ge nalazi se 10^{23} atoma Sb po m^3. Uzimajući da su pri sobnoj temperaturi svi atomi Sb jonizovani odrediti koncentraciju elektrona i šupljina. Širina zabranjene zone u germanijumu je E_g = 0.75eV.

Rešenje:
Sb - donorska primesa $\rightarrow N_D = 10^{23}$ m^{-3}

$$n \approx N_D = 10^{23} \text{ m}^{-3}$$

$$p \cdot n = n_i^2 \qquad \Rightarrow \qquad p = \frac{n_i^2}{n}$$

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = 2\left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2} 2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

smatramo da je $m_n = m_p = m_0$

$$n_i^2 = 4\left(\frac{2\pi m_0 kT}{h^2}\right)^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{4\left(\frac{2\pi m_0 kT}{h^2}\right)^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)}{N_D} = 1.62 \cdot 10^{15} m^{-3}$$

ZADATAK 3. Za Ge koji sadrži $5 \cdot 10^{22}$m^{-3} atoma As i 10^{22}m^{-3} atoma Ga izračunati položaj Fermijevog nivoa u odnosu na dno provodne zone na T=300K. Efektivna gustina stanja u provodnoj zoni je $N_C=10^{25}$m^{-3}, a koncentracija sopstvenih nosilaca $n_i=2 \cdot 10^{19}$m^{-3}. Smatrati da su na datoj temperaturi sve primese jonizovane.

Rešenje:
Iz jednačine elektroneutralnosti:

$$n + N_A - p_a = p + N_D - n_d$$

ako su sve primese jonizovane, sledi da je $p_a = n_d$ = 0, jednačina elektroneutralnosti ima oblik:

$$n + N_A = p + N_D$$

$$p \cdot n = n_i^2 \qquad \Rightarrow \qquad p = \frac{n_i^2}{n}$$

$$n + N_A = \frac{n_i^2}{n} + N_D \qquad / \cdot n$$

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

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

$$N_D - N_A = 4 \cdot 10^{22} m^{-3} \qquad (N_D - N_A)^2 >> 4n_i^2$$

$$n = N_D - N_A = 4 \cdot 10^{22} m^{-3}$$

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right)$$

$$E_C - E_f = kT \ln \frac{N_C}{n} = 0.14eV = 2.28 \cdot 10^{-20} J$$

ZADATAK 4. Sopstvena specifična električna otpornost Ge na T=300K je ρ=0.47Ωm. Pokretljivost elektrona i šupljina kod Ge zavisi od temperature na sledeći način: $\mu_n=3.5\cdot10^3 T^{-1.67} m^2/Vs$ i $\mu_p=9.1\cdot10^4 T^{-2.3} m^2/Vs$. Izračunati sopstvenu koncentraciju nosilaca naelektrisanja.

Rešenje:

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p) = \frac{1}{\rho}$$

$$n_i = \frac{1}{e\rho(\mu_n + \mu_p)}$$

$$\mu_n = 3.5 \cdot 10^3 (300)^{-1.67} = 0.255 \frac{m^2}{Vs}$$

$$\mu_p = 9.1 \cdot 10^4 (300)^{-2.3} = 0.183 \frac{m^2}{Vs}$$

$$n_i = 30.36 \cdot 10^{18} m^{-3}$$

ZADATAK 5.

a) Izračunati vrednost Holovog koeficijenta u Na i InSb i uporediti ih. Na kristališe u ZCK kubnom sistemu sa konstantom rešetke a=0.428nm. Širina zabranjene zone u InSb je Eg=0.15eV, efektivna masa elektrona je $m_n^*=0.014\, m_0$, a šupljina $m_p^*=0.18\, m_0$, pokretljivosti su $\mu_n=0.5 m^2/Vs$ i $\mu_p=0.015 m^2/Vs$.

b) Izračunati Holov napon u oba slučaja ako su obe pločice dimenzija 20x1x1mm. Uzorak Na priključen je na idealni strujni generator struje 100mA, a uzorak InSb na idealni naponski generator napona 5V, pri indukciji magnetnog polja 0.1T. Oba uzorka se nalaze na sobnoj temperaturi T=300K.

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU
Računske vežbe

Rešenje:

a) Na- jednovalentan metal:

$$R_H = -\frac{1}{ne}$$

ZCK rešetka $\Rightarrow$ $n_i=2$

$$n = \frac{2}{a^3}$$

$$R_H = -\frac{1}{ne} = -2.45\cdot 10^{-10}\,\frac{m^3}{C}$$

InSb:

$$R_H = \frac{\mu^2{}_p - \mu^2{}_n}{en_i(\mu_n + \mu_p)^2}$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_n{}^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$N_V = 2\left(\frac{2\pi m_p{}^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$N_C = 4.15\cdot 10^{22}\,m^{-3}$$

$$N_V = 1.92\cdot 10^{24}\,m^{-3}$$

$$n_i = 1.57\cdot 10^{22}\,m^{-3}$$

$$R_H = -3.57\cdot 10^{-4}\,\frac{m^3}{C}$$

b) Holov napon je:

$$U_H = \frac{R_H BI}{h}$$

Na:

$$U_H = 2.485\cdot 10^{-9}\,V$$

InSb:

$$\sigma = en_i(\mu_p + \mu_n) = 1.6\cdot 10^{-19}\cdot 1.57\cdot 10^{22}(0.5 + 0.015) = 1.29\cdot 10^3\,\Omega^{-1}m^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 7.73\cdot 10^{-4}\,\Omega m$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = 7.73 \cdot 10^{-4} \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\left(1 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 15.46$$

$$I = \frac{U}{R} = 323mA$$

U_H=11.5mV

ZADATAK 6.

a) Izračunati vrednost Holovog koeficijenta u Ca i GaAs na 300K i uporediti ih. Ca kristališe u PCK kubnom sistemu sa konstantom rešetke a=0.558nm. Širina zabranjene zone u GaAs je Eg=1.42eV, efektivna masa elektrona je $m_n^*=0.068 \cdot m_0$, a šupljina $m_p^*=0.50 \cdot m_0$, pokretljivosti su $\mu_n=0.85m^2/Vs$ i $\mu_p=0.045m^2/Vs$.
b) Izračunati Holov napon u oba slučaja u pločicama debljine h=0.75mm ako se kroz njih propušta struja jačine 125mA pri indukciji magnetnog polja 0.1T.

Rešenje:

a) Ca je dvovalentni metal, tako da je:

$$R_H = -\frac{1}{2ne}$$

Kako je PCK tip rešetke, n_i=4, sledi:

$$n = \frac{4}{a^3} = \frac{4}{\left(0.558 \cdot 10^{-9}\right)^3} = 2.30 \cdot 10^{28} m^{-3}$$

$$R_H = -\frac{1}{2ne} = -\frac{1}{2 \cdot 2.30 \cdot 10^{28} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} = -1.358 \cdot 10^{-10} \frac{m^3}{C}$$

GaAs:

$$R_H = \frac{\mu_p^2 - \mu_n^2}{en_i(\mu_n + \mu_p)^2}$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$N_V = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$N_C = 4.44 \cdot 10^{23} m^{-3}$$

$$N_V = 8.86 \cdot 10^{24} m^{-3}$$

$$n_i = \sqrt{4.44 \cdot 10^{23} \cdot 8.86 \cdot 10^{24}} \cdot \exp\left(-\frac{1.42 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) = 2.39 \cdot 10^{12} m^{-3}$$

$$R_H = -2.35 \cdot 10^6 \frac{m^3}{C}$$

b) Holov napon se izračunava direktnom primenom formule:

$$U_H = \frac{R_H BI}{h}.$$

ZADATAK 7. Posmatra se uzorak monokristalnog Si, dimenzija 1cmx1cmx1cm, na temperaturi T=300K.

a) Izračunati električnu otpornost nedopiranog uzorka Si čija je sopstvena koncentracija nosilaca naelektrisanja $n_i=1.45\cdot10^{10}cm^{-3}$ a pokretljivosti elektrona $\mu_n=1350cm^2V^{-1}s^{-1}$ i šupljina $\mu_p=450cm^2V^{-1}s^{-1}$.

b) Ako se Si dopira As (primesom n-tipa) koncentracije 10^{16} cm^{-3}, izračunati električnu otpornost uzorka smatrajući da su na na datoj temperaturi (T=300K) sve primese jonizovane i da su pokretljivosti nosilaca naelektrisanja iste kao u nedopiranom uzorku.

c) Za koliko se položaj Fermijevog nivoa u dopiranom uzorku Si pomerio u odnosu na položaj Fermijevog nivoa u nedopiranom uzorku?

Rešenje:

a)

$$\sigma = ne(\mu_n + \mu_p) \qquad \sigma = 1.45 \cdot 10^{10} cm^{-3} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} C \cdot (1350 cm^2 V^{-1} s^{-1} + 450 cm^2 V^{-1} s^{-1})$$

$$\sigma = 4.17 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 2.39 \cdot 10^5 \Omega cm$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = 2.39 \cdot 10^5 \Omega$$

b) Za dopirani Si

$$n = N_D = 10^{16} \mathrm{cm}^{-3};$$

$$\sigma = ne\mu_n = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot 1350 = 2.16 (\Omega \mathrm{cm})^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 0.462 \Omega cm \; ; \qquad R = \rho \frac{l}{S} = 0.462 \Omega$$

c)

$$n = N_C \exp\left(-\frac{Ec - Ef}{kT}\right);$$

$$n = N_D = N_C \exp\left(-\frac{Ec - Ef_n}{kT}\right)$$

$$\frac{N_D}{n_i} = \exp\left[\frac{Ef_n - Ef}{kT}\right]$$

$$Ef_n - Ef = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 1.38 \cdot 10^{23} \cdot 300K \ln \frac{1 \cdot 10^{16}}{1.45 \cdot 10^{10}} = 4.14 \cdot 10^{-21} \cdot 13.44 = 5.56 \cdot 10^{-20} J = 0.347 eV$$