

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe****6. PROVODNI MATERIJALI****TEORIJSKI PREGLED**

Provodni materijali (**provodnici**) su materijali čija je specifična električna otpornost od  $10^{-6}$  do  $10^{-8} \Omega\text{m}$ . Dele se u dve grupe: provodnici I reda, gde spadaju metali i legure koje karakteriše provođenje elektronima i provodnici II reda, gde spadaju elektroliti koje karakteriše provođenje jonima. Osnovne karakteristike provodnih materijala su: visoka električna i toplotna provodnost, sjajnost i kovnost, sposobnost emitovanja elektrona pri višim temperaturama (termoelektronska emisija) i sposobnost emitovanja elektrona pod dejstvom električnog polja (hladna emisija).

Električna provodnost metala može se objasniti **modelom Fermijevog gasa slobodnih elektrona**, što znači da se smatra da su, već na sobnoj temperaturi, elektroni napustili matične atome i mogu slobodno da se kreću. Elektroni ne trpe uticaj elektrostatičkog potencijala pozitivnih jona u čvorovima kristalne rešetke, tj. može se zanemariti uticaj pozitivnih jona. Joni ne mogu da privuku elektrone da opet budu sastavni deo atoma. U odsustvu električnog polja elektroni se kreću haotično rasejavajući se na fononima (vibrirajućim jonima) i defektima. Sudari su elastični, što utiče na promenu brzine elektrona. U prisustvu električnog polja javlja se drift elektrona, tj. usmereno kretanje elektrona.

**Fermijeva energija** za metale je maksimalna energija koju imaju elektroni u metalu na temperaturi 0K:

$$E_f = -\frac{h^2}{8m} \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{2/3} [eV]$$

gde je  $h$  – Plankova konstanta ( $h=6.62 \cdot 10^{-34}\text{Js}$ ),  $m$  – masa elektrona,  $n$  – koncentracija elektrona.

Ukupna brzina elektrona jednaka je zbiru driftovske i difuzione brzine. Brzina  $v_d$  predstavlja **driftovsku brzinu**, tj. usled postojanja električnog polja  $K$  brzina elektrona je  $v_d$ . Iz jednačine se vidi da se ona linearno povećava sa poljem  $K$ , a koeficijent srazmere je pokretljivost elektrona  $\mu$ :

$$\vec{v}_d = -\frac{e\tau}{m^*} \vec{K} = -\mu \vec{K}$$

gde je  $\tau$  – vreme relaksacije (vreme između dva sudara elektrona sa fononima kristalne rešetke),  $m^*$  je efektivna masa elektrona. Put koji elektron pređe između dva sudara je srednja dužina slobodnog puta elektrona:

$$l = v\tau.$$

**Difuziona brzina** elektrona jednaka je termičkoj brzini, to je brzina elektrona mase  $m$  u metalu kada se on nalazi na temperaturi  $T$ , van električnog polja:

$$v_t = \sqrt{\frac{k_B T}{m}}.$$

**Fermijeva brzina** se definiše kao:

$$v_f = \sqrt{\frac{2E_f}{m_e}}.$$

## MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

## Računske vežbe

U nastavku će biti dato izvođenje **Omovog zakona u lokalnom obliku** (slika 1). Gustina struje se definiše kao količina proteklog naelektrisanje  $\Delta Q$  kroz provodnik poprečnog preseka  $A$  u vremenu  $\Delta t$ :

$$j = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta t}$$

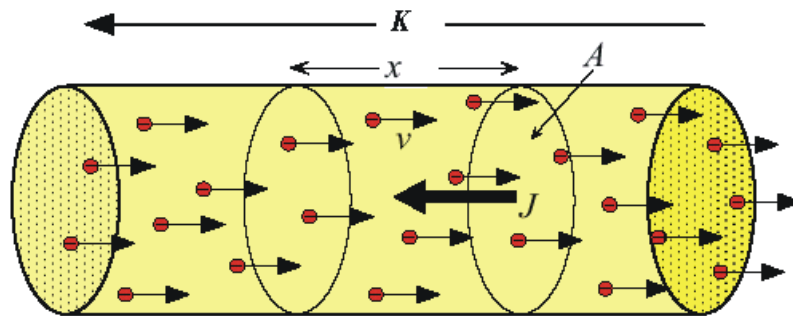
Proteklo naelektrisanje predstavlja broj  $N$  proteklih elektrona naelektrisanja  $-e$ :

$$\Delta Q = -eN = -eN \frac{V}{V} = -e \frac{N}{V} Ax = -enAx = -enAv\Delta t$$

Tako da je:

$$\vec{j} = -en\vec{v} = en\mu\vec{K} = \frac{e^2 n \tau}{m^*} \vec{K} = \sigma \vec{K}$$

gde je  $\sigma$  – specifična električna provodnost, tj.  $\rho = 1/\sigma$ , specifična električna otpornost.



Slika 1. Ilustracija uz izvođenje Omovog zakona u lokalnom obliku

**Mattheisen-ovo pravilo** se odnosi na specifičnu otpornost provodnika. U metalima u kojima su prisutne primese i nečistoće, do rasejavanja elektrona dolazi na fononima kristalne rešetke i sa atoma primesa odnosno nečistoća. Tako da je ukupna otpornost jednaka zbiru otpornost koja potiče zbog rasejavanja na fononima (termičke vibracije) i otpornosti koja potiče usled rasejavanja elektrona na atomima primesa:

$$\rho = \rho_T + \rho_P = \frac{1}{en\mu_T} + \frac{1}{en\mu_P}.$$

S obzirom da do rasejavanja elektrona dolazi ne samo na primesama već i na defektima kristalne rešetke kao što su dislokacije ili granice zrna, prethodna jednačina se može napisati u obliku:

$$\rho = \rho_T + \rho_R$$

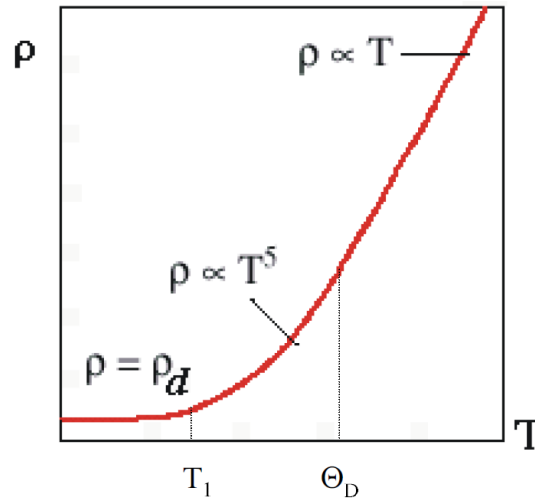
otpornost  $\rho_R$  se naziva rezidualnom otpornošću i ona uključuje i  $\rho_P$  otpornost. Zavisnost specifične električne otpornosti od temperature kod provodnih materijala prikazana je na slici 2. Do temperature  $T_1$ , specifična otpornost je jednaka otpornosti koja potiče od rasejanja na primesama i defektima. Između temperature  $T_1$  i Debajeve temperature  $\Theta_D$ , otpornost se menja po zakonu  $T^5$ . Na temperaturama iznad Debajeve je zavisnost otpornosti od temperature linearna i menja se po zakonu:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

gde je  $\alpha$  – temperaturni koeficijent specifične električne otpornosti. Ovo je oblast najčešće primene provodnih materijala.

## MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

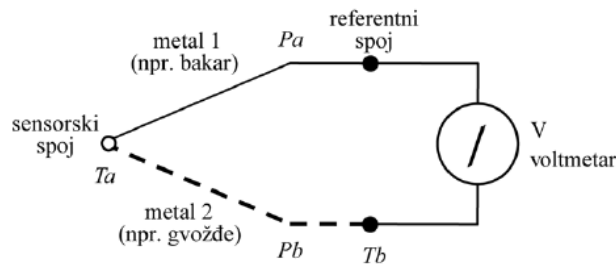
## Računske vežbe

Slika 2. Mattheisen-ovo pravilo – zavisnost  $\rho(T)$ 

**TERMOELEKTRIČNI EFEKTI. Zibekov efekat** javlja se kada se spojevi dva različita provodna materijala u kolu drže na različitim temperaturama, između spojeva se javlja mala potencijalna razlika usled čega u kolu protiče struja (slika 3). Elektroni idu sa toplijeg ka hladnijem kraju, tako da će na hladnijem kraju biti višak negativnog naelektrisanja; dok će na toplijem kraju biti višak pozitivnog naelektrisanja, što uslovljava postojanje potencijalne razlike. Termoparovi zasnivaju rad na Zibekovom efektu. Generisan napon je:

$$V = (S_a - S_b)(T_a - T_b) = S_e \Delta T$$

gde su  $S_a$  i  $S_b$  su Zibekovi koeficijenti materijala i mogu biti i negativni.



Slika 3. Zibekov efekat

**Tomsonov efekat** se javlja kada kroz provodnik teče struja i temperatura duž njega opada ili raste, on će preuzimati ili odavati toplotu od okoline, zavisno od smera struje (slika 4). Provodnik će preuzimati toplotu ako struja teče ka kraju viših temperatura, a predavaće je okolini kada je smer struje ka kraju nižih temperatura. Usled temperaturne razlike  $\Delta T$ , količina toplote se može izraziti kao:

$$Q = \pm \mu_T J \frac{\Delta T}{\Delta x} t$$

gde je  $\mu_T$  – Tomsonov koeficijent.

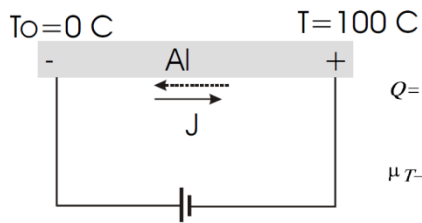
**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**

**Računske vežbe**

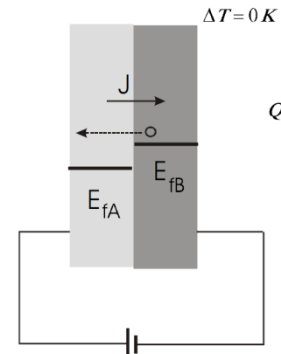
**Peltijev efekat** podrazumeva da kada kroz spojeve međusobno spojenih različitih provodnih materijala (imaju različitu Fermijevu energiju) proteče električna struja, provodni materijali će iz okoline preuzimati ili odavati toplotu (slika 5). Količina toplote u zavisnosti od struje  $J$  može izraziti kao:

$$Q = \pm \Pi_{AB} J t$$

gde je  $\Pi_{AB}$  – Peltijev koeficijent. Ovaj efekat izraženiji je kod poluprovodnika.

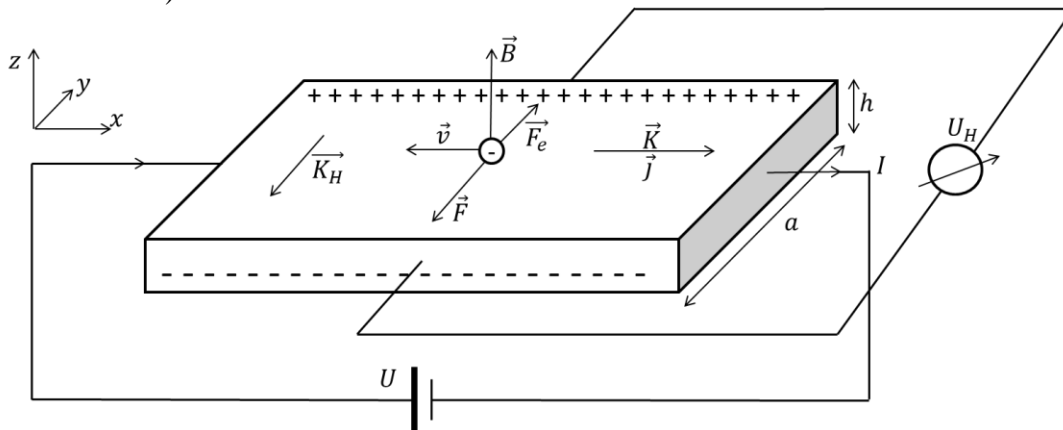


Slika 4. Tomsonov efekat



Slika 5. Peltijev efekat

**GALVANOMAGNETNI EFEKAT. Holov (Hall) efekat.** Holov efekat javlja se kada se metalna pločica priključena na napon  $U$  (uslovljava postojanje električnog polja  $K$ ) nađe i u magnetnom polju (magnetne indukcije  $B$ ), tada pod uticajem Lorencove sile dolazi do razdvajanja naelektrisanja na krajevima pločice, tako da se javlja potencijalna razlika, tj. Holov napon  $U_H$  (slika 6). Komponente koje rade na bazi Holovog efekta su vatmetri, magnetometri (senzori magnetnog polja za opseg  $10\mu T - 1T$ ), kao i elektronski prekidači (na pr. u sistemima za paljenje automobila).



Slika 6. Holov efekat

Pod dejstvom Lorencove sile dolazi do razdvajanja naelektrisanja na krajevima pločice:

$$\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B}).$$

Razdvojeno naelektrisanje stvara tzv. Holovo polje koje na naelektrisanja deluje elektrostatičkom silom:

$$\vec{F}_e = -e\vec{K}_H.$$

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

Razdvajanje naelektrisanja traje do uspostavljanja ravnoteže:

$$\vec{F} + \vec{F}_e = 0$$

$$\vec{K}_H = -(\vec{v} \times \vec{B}) = \vec{B} \times \vec{v}.$$

Vektor gustine struje:

$$\vec{j} = -en\vec{v} \Rightarrow \vec{v} = -\frac{1}{en}\vec{j}.$$

Zamenom se dobija:

$$\vec{K}_H = -\frac{1}{en}(\vec{B} \times \vec{j}) = R_H(\vec{B} \times \vec{j}).$$

$R_H$  je Holova konstanta (za većinu provodnika je manja od nule):

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

Konačno se za Holov napon dobija:

$$U_H = K_H a = R_H B j a = R_H B \frac{I}{ah} a = R_H B \frac{I}{h}.$$

**Podela provodnih materijala prema primeni:**

Niskoomski materijali ( $\rho \sim 10^{-8} \Omega\text{m}$ ): Cu, Ag, Au, Al- izrada izolovanih i neizolovanih provodnika (vodova, telegrafskih i telefonskih kablova), u mikroelektronici za izradu žica i nanošenje provodnih slojeva (metalizacije).

Visokoomski materijali ( $\rho \sim 10^{-7} \Omega\text{m}$ ): Fe, Ni, Zn, Ta, W, Mo, Pt- izrada otpornika (običnih, preciznih, regulacionih) i izrada zagrevnih elemenata.

Otporne legure ( $\rho \sim 10^{-6} \Omega\text{m}$ ): konstantan (Cu/Ni), nihrom (Ni/Cr), nikelin (Cu/Ni/Mn), cekas (Ni/Cr/Fe), kantel (Fe/Cr/Al) za izradu termičkih grejača.

Provodni materijali specijalne namene: termoparovi (Pt, Ir, W, Mo), električni kontakti (W, Mo, Ni), lemovi (Pb, Sn, Zn), topljivi osigurači (Pb, Sn, Zn), katode vakuumskih cevi (W, Mo), provodne i otporne paste u hibridnim IK (Ti, Ta, Pd, Pt).

**ZADATAK 1.** U Cu provodniku čija je površina  $S=0.2\text{cm}^2$  protiče struja jačine 1A. Izračunati srednju driftovsku brzinu elektrona ako je koncentracija elektrona  $n=8.4 \cdot 10^{28}\text{m}^{-3}$ .

*Rešenje:*

$$j = env;$$

$$j = \frac{I}{S}$$

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

$$v = \frac{I}{enS}$$

$$v = \frac{1A}{1.6 \cdot 10^{-19} C \cdot 8.4 \cdot 10^{28} m^{-3} \cdot 0.2 \cdot 10^{-4} m^2}$$

$$v = 3.7 \cdot 10^{-6} m/s$$

**ZADATAK 2.** Izračunati srednju driftovsku brzinu i vreme relaksacije elektrona u srebru ako je jačina polja duž provodnika  $K=10^2 V/m$ , specifična električna otpornost  $\rho_{Ag}=1.54 \cdot 10^{-8} \Omega m$  i koncentracija elektrona  $n=5.8 \cdot 10^{28} m^{-3}$ .

*Rešenje:*

Pokretljivost elektrona se može izračunati iz:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = en\mu \Rightarrow \mu = \frac{1}{e\rho n}$$

$$\mu = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} C \cdot 1.54 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot 5.8 \cdot 10^{28} m^{-3}} = 0.0069 \frac{m^2}{Vs}$$

Driftovska brzina elektrona je:

$$v = \mu K$$

$$v = 0.0069 \frac{m^2}{s} \cdot 10^2 \frac{V}{m} = 0.69 m/s$$

Vreme relaksacije je:

$$\mu = \frac{e\tau}{m} \Rightarrow \tau = \frac{m\mu}{e}$$

$$\tau = \frac{9.1 \cdot 10^{-31} kg \cdot 0.0069 m^2 / Vs}{1.6 \cdot 10^{-19} C} = 3.9 \cdot 10^{-14} s$$

**ZADATAK 3.** Specifična električna otpornost srebra na sobnoj temperaturi je  $1.6 \cdot 10^{-8} \Omega m$ . Efektivni broj provodnih elektrona po atomu srebra je 0.9, a Fermijeva energija 5.5eV. Ako je gustina srebra  $1.05 \cdot 10^4 kg/m^3$  i atomska masa 107.87 izračunati srednju dužinu puta provodnih elektrona na Fermijevom nivou. Uzeti da je  $m^*=m_0=9.1 \cdot 10^{-31} kg$ .

*Rešenje:*

Za srednju dužinu puta dobija se:

$$l = v_f \tau$$

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

$$E_f = \frac{m^* v_f^2}{2} \Rightarrow v_f = \sqrt{\frac{2E_f}{m^*}}$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 5.5 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 13.9 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$d = \frac{n_i A}{a^3 N_A} = N \frac{A}{N_A} \Rightarrow N = \frac{d N_A}{A}$$

$$n = 0.9 N = \frac{0.9 d N_A}{A}$$

$$n = 5.3 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e n \mu_n = \frac{e^2 \tau n}{m^*}$$

$$\tau = \frac{\sigma m^*}{e^2 n} = \frac{m^*}{\rho e^2 n} = \frac{9.1 \cdot 10^{-31}}{1.6 \cdot 10^{-8} (1.6 \cdot 10^{-19})^2 5.3 \cdot 10^{28}}$$

$$\tau = 4.2 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

$$l = v_f \cdot \tau = 13.9 \cdot 10^5 \text{ m/s} \cdot 4.2 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

$$l = 5.8 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

**ZADATAK 4.** Otpornost metalnog vlakna sijalice na 25°C iznosi 20Ω, a na temperaturi gorenja sijalice je 188Ω. Odrediti temperaturu gorenja vlakna sijalice ako je temperaturni koeficijent otpornosti materijala od koga je vlakno  $\alpha=0.004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

*Rešenje:*

Električna otpornost materijala zavisi od temperature i data je jednačinom:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha \Delta T)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

$$T_2 - T_1 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1}$$

$$T_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + T_1 = 2125^\circ\text{C}$$

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

**ZADATAK 5.** Izračunati koliko namotaja Ni-Cu žice treba namotati na izolatorsko telo poluprečnika  $r_1=2\text{cm}$  da bi se dobila otpornost otpornika  $R=40\Omega$ , ako je prečnik žice  $2r=1\text{mm}$  i specifična otpornost  $\rho=10^{-6}\Omega\text{m}$ .

*Rešenje:*

Električna otpornost materijala  $R$  je:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

gde je  $l$  dužina provodnika a  $S$  površina provodnika.

$$l = n2r_1\pi$$

$$S = r^2\pi$$

$$R = \rho \frac{2nr_1\pi}{r^2\pi}$$

$$n = \frac{Rr^2}{2\rho r_1}$$

$$n = \frac{40\Omega \cdot (5 \cdot 10^{-4} \text{ m})^2}{2 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 250$$

**ZADATAK 6.** Bakar pripada prvoj grupi periodnog sistema i ima PCK rešetku. Gustina bakra iznosi  $d=8.93\text{g/cm}^3$ . Ako je pokretljivost elektrona bakra  $\mu_e= 43\text{cm}^2/\text{Vs}$  a atomska masa bakra  $A=63.5\text{g/mol}$  izračunati:

- Provodnost bakra.
- Fermijevu brzinu provodnih elektrona ako je Fermijeva energija  $7.03\text{eV}$ .
- Odnos driftovske i Fermijeve brzine ako je jačina polja u provodniku  $8.41 \cdot 10^{-4} \text{ V/m}$ .
- Srednji slobodni put elektrona i uporediti ga sa konstantom kristalne rešetke.

*Rešenje:*

- Provodnost bakra je:

$$\sigma = ne\mu$$

$$n = \frac{dN_A}{M_{at}} = \frac{8.93 \times 6.02 \cdot 10^{23}}{63.5} = 8.47 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \quad \text{ili} \quad 8.47 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$\sigma = ne\mu = 8.47 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0.0043 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} = 5.8 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$$

- Brzina provodnih elektrona je:

$$E_f = \frac{m^* v_f^2}{2}$$



**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

$$v_f = \sqrt{\frac{2E_f}{m^*}} = 1.57 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

c) Driftovska brzina je:  $v_d = \mu_d \cdot K = 0.0043 \cdot 8.41 \cdot 10^{-4} = 3.62 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ , tako da je odnos  $v_d/v_s = 2.07 \cdot 10^{-12}$ .

d) Da bi odredili slobodni put elektrona  $l = v_f \tau$ , prvo ćemo odrediti vreme relaksacije:

$$\tau = \frac{\mu_d m_e}{e} = 2.45 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

Tako da je srednji slobodni put:  $l = v_f \tau = (1.57 \cdot 10^6)(2.45 \cdot 10^{-14}) = 3.84 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ . Za konstantu kristalne rešetke preko izraza za gustinu dobija se:  $a = 3.62 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ .

**ZADATAK 7.** Specifična električna otpornost srebra je  $1.6 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ , a Fermijeva energija  $E_f = 5.5 \text{ eV}$ . Izračunati:

- Pokretljivost elektrona.
- Brzinu i srednji slobodni put elektrona na Fermijevom nivou.
- Termičku brzinu elektrona na sobnoj temperaturi.
- Holovu konstantu.

*Rešenje:*

a) Pokretljivost određujemo iz:

$$\rho = \frac{1}{en\mu}$$

$$\mu = \frac{1}{e\rho n}$$

Na osnovu poznate Fermijeve energije određuje se koncentracija elektrona:

$$n = \frac{\pi}{3} \left( \frac{8E_f m}{h^2} \right)^{3/2} = 5.85 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

Tako da se za pokretljivost dobija  $\mu = 6.67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Vs}$ .

b) Fermijeva brzina je:

$$v_f = \sqrt{\frac{2E_f}{m^*}} = 1.39 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

Vreme relaksacije je:

$$\tau = \frac{\mu m}{e} = 3.8 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

Srednji slobodni put elektrona je  $l = v_f \tau = 5.27 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ .

c) Termička brzina se izračunava iz formule:

$$v_t = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 1.17 \cdot 10^5 \text{ m/s.}$$

d) Holova konstanta je:

$$R_H = -\frac{1}{en} = -1.07 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 / \text{s.}$$

**ZADATAK 8.** Gustina bakra (Cu) iznosi  $d = 8.92 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  a atomska masa bakra je  $A_{\text{Cu}} = 63.5$ .

- Izračunati koncentraciju elektrona po  $\text{m}^3$ .
- Ako je Fermijeva energija za Cu  $E_f = 7 \text{ eV}$  izračunati srednju brzinu elektrona na Fermijevom nivou.
- Ako je specifična električna provodnost bakra na  $20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$  izračunati srednji slobodni put elektrona na Fermijevom nivou.

*Rešenje:*

$$\text{a) } d = \frac{n_i M}{V N_A} \Rightarrow N = \frac{N_A d}{M} = \frac{6.02 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{kmol}} \cdot 8.92 \cdot 10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{63.5 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 8.456 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} = n(\text{elektrona})$$

$$\text{b) } \frac{mv^2}{2} = E_f \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_f}{m}} = 1.56 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{c) } \sigma = \frac{ne^2 l}{mv_f} \Rightarrow l = \frac{\sigma mv_f}{ne^2} = 0.386 \text{ nm.}$$

**MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU****Računske vežbe**

**ZADATAK 9.** Aluminijum pripada III grupi periodnog sistema i ima PCK rešetku sa parametrima rešetke  $a=0.404$  nm. Provodnost aluminijuma je  $3.8 \cdot 10^5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , gustina  $2.71 \text{ g/cm}^3$ , atomska masa  $A=26.98$  g/mol.

- Izračunati koncentraciju provodnih elektrona.
- Izračunati pokretljivost elektrona  $\mu_n$ .

*Rešenje:*

- Koncentracija provodnih elektrona dobija se iz:

$$d = \frac{n_i M}{a^3 N_A} = N \frac{M}{N_A} \Rightarrow N = \frac{d N_A}{M}$$

$$n = 3N = 1.818 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}.$$

- Pokretljivost elektrona je:

$$\mu = \frac{1}{e \rho n} = 1.306 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{Vs}.$$

**ZADATAK 10.** Srebrna žica u obliku trake ima dužinu 0.5cm i debljinu 0.01cm. Ako struja jačine 2A prolazi kroz traku normalno na magnetno polje indukcije 0.8T, izračunati Holov napon i pokretljivost elektrona. Gustina srebra je  $d=10.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $M=108$ ,  $\sigma=6.6 \cdot 10^5 (\Omega\text{cm})^{-1}$ .

*Rešenje:*

$$U_H = R_H B \frac{I}{h}$$

$$U_H = \frac{1}{en} \frac{BI}{h}$$

$$d = \frac{n_i M}{a^3 N_A} = N \frac{M}{N_A} \Rightarrow N = \frac{d N_A}{M}$$

Srebro pripada I grupi periodnog sistema i ima jedan valentan elektron po atomu, pa je broj provodnih elektrona jednak broju atoma, tj.

$$n = N$$

$$U_H = \frac{M}{ed N_A} \frac{BI}{h} = 1.7 \mu\text{V}$$

$$\sigma = en\mu \Rightarrow \mu = \frac{\sigma}{en} = R_H \sigma$$

$$\mu = \frac{\sigma M}{ed N_A} = 6.8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$$