

Hallov pojav

Tadej Strah

2. januar 2023

Izvedeno 8. december

1 Uvod

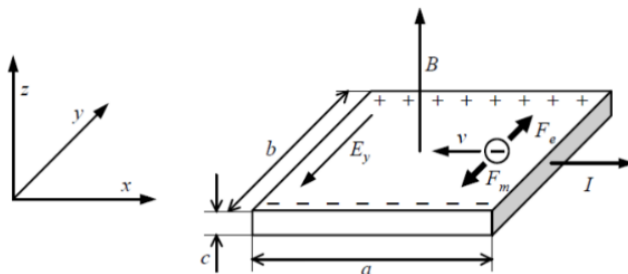
Električni vodnik postavimo v magnetno polje in skozenj pošljemo električni tok. Zaradi magnetne sile na premikajoče nabite delce, nastane med robovoma vodnika potencialna razlika, ki ji pravimo Hallova napetost.

Geometrijo omejimo na pravokoten kovinski trak s stranicami a , b in c ; $a \gg b, c$ po katerem teče el. tok I v smeri osi x . Magnetno polje B trak prebada v smeri z . Skico vidimo na sliki 1.

Predpostavimo, da so nosilci naboja elektroni z nabojem $-e_0$. Gostoto toka podamo kot $j = I/(bc) = -ne_0v$. Zaradi magnetne sile $F_m = -e_0vB$, ki deluje v smeri osi $-y$, se začnejo ob enem robu kopičiti elektroni, na drugem pa njihov primanjkljaj. Ustvari se el. polje E_y v smeri osi $-y$ in s tem električna sila, ki ravno izenači magnetno. V stacionarnem stanju, ki se vzpostavi v $\approx 10^{-12}$, torej velja

$$F_m = -F_e \quad (1)$$

$$e_0E_y = e_0vB \quad (2)$$



Slika 1: Shema Hallovega eksperimenta

Sledi

$$E_y = vB = \frac{jB}{ne_0}. \quad (3)$$

Napetost med robovoma traku, vzporednima smeri toka, se imenuje Hallova napetost U_H , in sicer znaša

$$U_H = E_y b = -\frac{jBb}{ne_0} = -\frac{IB}{ne_0 c}. \quad (4)$$

Kvoceient $E_y/jB = R_H$ imenujemo Hallova konstanta. Sledi

$$R_H = -\frac{1}{ne_0} = \frac{U_H c}{IB}. \quad (5)$$

Hallov pojav lahko uporabljamo za merjenje gostote mag. polja, lahko pa tudi za določanje predznaka nosilcev naboja.

1.1 Polprevodniki

V veliki kristalni mreži pri do tvorbe energijskih dovoljenih in prepovedanih pasov. Kristal je izolator, če ima vse energijske pasove do neke energije povsem polne, višje ležeči pasovi pa so prazni in ločeni s široko prepovedano energijsko režo, tipično večjo od 2 eV. Pri sobni temperaturi torej termična energija, ki je reda velikosti $k_B T = 1/40 \text{ eV}$, ne omogoči skoka elektrona v višje ležeče nezasedene pasove. Elektroni so torej vezani in snov ne prevaja.



Slika 2: Shema energijskih pasov za izolator, prevodnik in polprevodnik. Temni pasovi so zasedeni, svetli prazni.

V prevodniku je najvišje ležeči neprazni energijski pas le delno zaseden. Tako lahko elektroni prejmejo kinetično energijo, ko se gibljejo v električnem polju. V prevodniku torej električno polje požene električni tok.

Če je energijska reža med najnižjim nezasedenim in najvišjim zasedenim pasom okoli 1 eV, lahko pri dovolj visoki temperaturi termična energija zadošča, da del elektronov preide v prevodni pas in s tem prevaja električni tok. V tem primeru k prevodnosti prispevajo tako elektroni kot tudi vrzeli, ki nastanejo v valenčnem pasu. Za čisti polprevodnik velja, da je gostota elektronov n_p , ki so dvignjeni iz valenčnega pasu enaka

$$n_p(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_e k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right), \quad (6)$$

kjer je m_e efektivna masa elektrona in E_g velikost energijske reže med prevodnim in valenčnim pasom.

1.2 Hallov pojav v polprevodniku tipa n

Gostota nosilcev naboja (in s tem prevodnost) se v polprevodniku drastično poveča v prisotnosti primeri, ki se vgradijo v polprevodniški kristal. Če v kristal vgradimo (pet-valentne) atome arzena, dobimo v kristalu odvečne elektrone, ki že z zelo malo energije skočijo v prevodni pas. Dodatni donorski nivo tako leži tik pod prevodnim. To energijsko režo označimo E_d . Izkáže se, da so v primeru dopiranja s petvalentnimi atomi večinski nosilci naboja elektroni, zato pravimo takšnemu polprevodniku, da je tipa n .

H gostoti elektronov v prevodnem pasu v primeru polprevodnika tipa n prispevajo tudi elektroni, ki so bili termično dvignjeni iz donoskega nivoja. Iz velekanonične porazdelitve dobimo v limiti nizkih temperatur ($k_B T \ll E_d$) sledeči izraz

$$n_p(T) = N_d^{1/2} \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/4} \exp \left(-\frac{E_d}{2k_B T} \right), \quad (7)$$

kjer je N_d gostota donorskih primeri. Ko pa je termična energija dovolj velika ($k_B T \gg E_d$), so v prevodni pas vzbujeni vsi donorski elektroni

$$n_p(T) = N_d. \quad (8)$$

Ker je gostota valenčnih elektronov v polprevodniku cca. 10^{22}cm^{-3} in gostota nečistoč za 3 do 9 velikostnih redov manjša, prevladuje pri nižjih temperaturah prevodnost zaradi vzbujenih donorskih elektronov, pri višjih temperaturah pa zaradi valenčnih elektronov, vzbujenih v prevodni pas.

Z merjenjem Hallove napetosti lahko torej izmerimo temperaturno odvisnost gostote nosilcev naboja v polprevodniku tipa n .

2 Naloga

1. Izmeri temperaturno odvisnost Hallove napetosti vzorca polprevodnika tipa n na temperaturnem območju med 20- in 80°C .
2. Nariši graf Ohmske upornosti R v odvisnosti od temperature T .
3. Nariši graf Hallove konstante R_H v odvisnosti od temperature T .
4. Nariši graf $\ln n_p(1/k_B T)$
5. Določi vrsto nosilcev naboja v germanijevem vzorcu na tem temperaturnem območju.

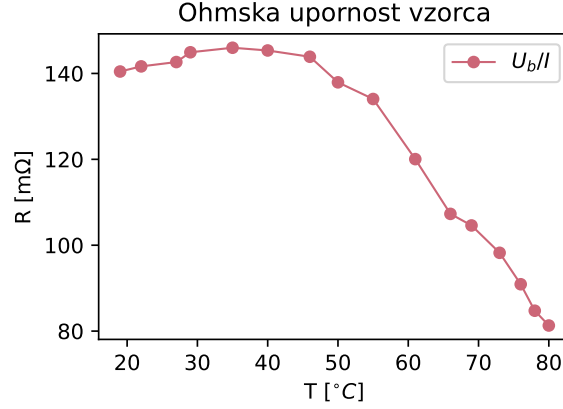
3 Meritve, obdelava, rezultati

Pri vaju delamo z germanijevim polprevodnikom tipa n , torej so večinski nosilci naboja elektroni. Vzorec debeline $c = 0.95 \text{mm}$ postavimo v magnetno polje $B = 0.173 \text{T}$ in izmerimo Hallovo napetost ob danem toku skozi polprevodnik. Ker kontakti na vzorcu niso povsem simetrični je izmerjena napetost vsota Hallove in napetosti zaradi nesimetrije $U_1 = U_H + \tilde{U}$. Če vzorec v magnetnem polju obrnemo se spremeni le predznak Hallove napetosti $U_2 = -U_H + \tilde{U}$. Izračunamo Hallovo napetost

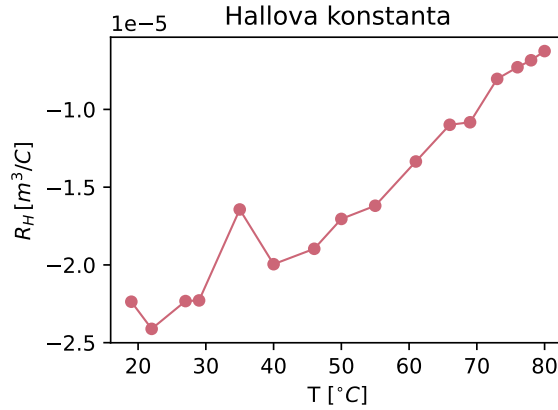
$$U_H = \frac{1}{2}(U_1 - U_2).$$

Najprej narišemo graf Ohmske upornosti vzorca in potem še spreminjanje Hallove konstante s temperaturo. Vidimo na grafih 3 in 4. Ohmska upornost pričakovano pada s temperaturo, saj je pri višjih temperaturah več elektronov vzbujenih v prevodni pas in je tako prevodnost večja. Hallova konstanta

ima negativen predznak, kar nakazuje, da so nosilci toka negativno nabiti delci (torej elektroni in ne vrzeli).



Slika 3: Ohmska upornost vzorca. Napajamo z baterijo z gonilno napetostjo $U_b = 1.1V$.



Slika 4: Spreminjanje Hallove konstante s temperaturo.

Hallova konstanta je obratno sorazmerna z gostoto nosilcev naboja, velja

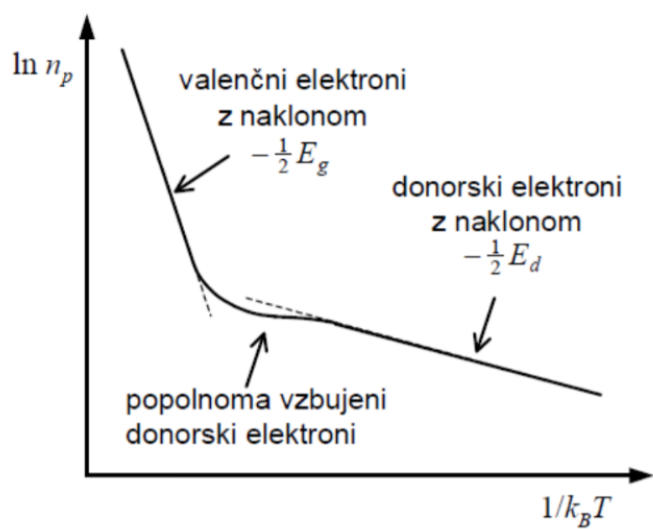
$$n = -\frac{1}{R_H e_0}.$$

Za gostota nosilcev pa v dveh temperaturnih režimih veljata enačbi 6 in 7. Narišemo graf $\ln n_p(1/k_B T)$. Pričakovano odvisnost kaže graf 5, izmerjeno pa graf 6. Iz naklona premic lahko določimo

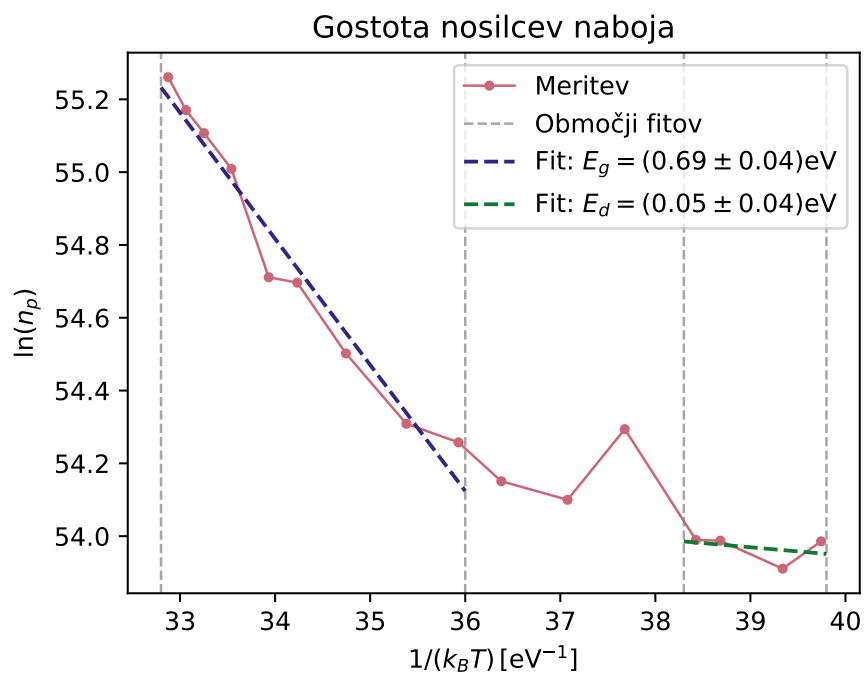
$$E_g = (0.69 \pm 0.04)eV,$$

$$E_d = (0.05 \pm 0.04)eV.$$

Referenčni vrednosti pa sta $E'_g = 0.66eV$ in $E'_d = 0.01eV$. Naše in referenčne meritve se znotraj napake ujemajo; ima pa naša meritev E_d zelo veliko napako, zaradi majhnega števila merskih točk. Pomeriti bi morali še pri nižjih temperaturah.



Slika 5: Pričakovana odvisnost



Slika 6: Izmerjena odvisnost. Znotraj označenih območij prilagodimo premici in izračunamo E_g in E_d .