

MAGNETOOTPOR METALA I POLUVODIČA

UVOD

Električni otpor uzoraka metala i poluvodiča promijeni se ako se uzorak smjesti u magnetsko polje, tako da je jedan od načina mjerenja magnetskog polja može se izvesti pomoću mjerenja otpora materijala imaju veliki magnetootpor. Jedan od takvih materijala je bizmut, koji, za razliku od karakterističnog malenog magnetootpora za metale, pokazuje veliki magnetootpor. Stoga se često za precizno mjerenje jakosti magnetskog polja preko izmjerenog otpora koristi bizmutova petlja. Mjerenjem magnetootpora mogu se izmjeriti neka svojstva materijala. Jedno od takvih svojstava je i pokretljivost elektrona.

TEORIJSKI DIO

Pretpostavimo da je uzorak oblika kvadra visine h , širine w i duljine l . Neka električno polje \vec{E} djeluje u smjeru osi z , a magnetsko polje u smjeru osi y . Kada ne bi bilo magnetskog polja \vec{B} , elektroni bi putovali u smjeru z osi. Sa magnetskim poljem, elektroni koji putuju kroz uzorak osjećaju magnetski dio Lorentzove sile $e\vec{B} \times \vec{v}$ te se njihova putanja otklanja. Stoga se na plohi $x=l$ stvara višak negativnog naboja, dok se na plohi $x=0$ stvara višak pozitivnog naboja. Dolazi do pojave električnog polja, koje se naziva Hallovo polje, koje kompenzira magnetski dio Lorentzove sile. Stoga je iznos Hallovog polja dan jednadžbom $E_H = vB$. Nakon uspostavljanja ovog uvjeta, putanje elektrona više na otklanjaju, i sistem je u ravnoteži. Transport elektrona je, pa tako i otpor, jednak u prisutstvu magnetskog polja kao i bez njega.

Ovo bi razmatranje bilo točno da svi elektroni imaju istu brzinu. Brzine elektrona nisu iste, pa je ovo razmatranje točno samo za elektrone neke srednje brzine \bar{v} , pa se i iznos Hallovog polja mijenja u

$$E_H = \bar{v}B \quad (1)$$

Stoga, i u uvjetima ravnoteže, dolazi do otklanjanja putanje elektrona. Elektroni se zbog toga više raspršuju te dolazi do povećanja otpora.

Elektroni su fermioni pa za njih vrijedi Fermi-Diracova statistika. Za slučaj kada vrijedi

$$kT \gg E_F(T=0) \quad (2)$$

gdje je $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ Boltzmanova konstanta, T temperatura sistema, a E_F Fermijeva energija koja ovisi o temperaturi, Fermi-Diracova raspodjela može se aproksimirati Boltzmanovom. Stoga se definira temperatura:

$$T_0 = \frac{E_F(T=0)}{k} \quad (3)$$

koja se naziva temperaturom degeneracije. Ako je $T < T_0$ za fermionski plin kaže se da je degeneriran. Fermijeva energija fermionskog plina na temperaturi $T=0$ dana je prvim članom u Somerfeldovom razvoju:

$$E_F(T=0) = \frac{h^2}{2m^*} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

gdje je $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Planckova konstanta, n je koncentracija fermiona, a m^* je efektivna masa. U ovoj se vježbi mjerenja izvode na bizmutovoj petlji na temperaturi od

$T_{Bi} = 295\text{K}$. Uvrštavajući u jednadžbu (4) koncentraciju nosilaca naboja za bizmut $n_{Bi} = 10^{24}\text{m}^{-3}$, te stavljajući $m^* = m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}\text{kg}$, za temperaturu degeneracije dobiva se $T_0 = 42\text{K}$. Fermionski plin u bizmutu stoga nije degeneriran. Ne može se primijeniti niti Boltzmanova statistika jer uvjet iz jednadžbe (2) nije ispunjen. Stoga je potrebno u obzir uzeti i drugi član u temperaturi u Somerfeldovom razvoju. Jednadžba za Fermijevu energiju tada glasi:

$$E_F = E_F(T=0) \left[1 + \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{kT}{E_F(T=0)} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

U odnosu na veličinu otklona definiraju se "jaka" i "slaba" magnetska polja. Kod prisustva magnetskog polja putanja elektrona otklanja se od putanje elektrona srednje brzine \bar{v} za kut \mathcal{G} . Ako vrijedi $\mathcal{G} \ll 1$ za većinu elektrona, tada oni ne skreću bitno sa svoje putanje, te se magnetsko polje naziva slabim.

Driftna brzina elektrona je reda veličine $v_{Drift} = 10^{-2}\text{ms}^{-1}$. Neka se, za potrebe ocjene, za srednju brzinu elektrona uzme deseterostruka vrijednost $\bar{v} = 10^{-1}\text{ms}^{-1}$. Tada se iz kuta otklona putanje elektrona brzine $v=0$ vidi može li se polje smatrati slabim. Na elektron brzine $v=0$ djeluju samo mjerno električno polje duž vodiča \vec{E} , te Hallovo polje $\vec{E}_H = \vec{v} \times \vec{B}$ okomito na polje \vec{E} . Stoga je kut otklona \mathcal{G} dan sa:

$$\mathcal{G} = \frac{\bar{v}B}{E} = \frac{\bar{v}BL}{V} \quad (6)$$

gdje je V mjerni napon, a L duljina vodiča. Da bi polje bilo slabo mora vrijediti:

$$B \ll \frac{V}{L\bar{v}} \quad (7)$$

Što za vrijednosti od $L=1\text{cm}$, $V=10\text{mV}$ i $\bar{v}=10^{-1}\text{ms}^{-1}$ za bizmut daje ocjenu $B \ll 10\text{T}$. Mjerenja u ovoj vježbi izvode se sa poljima maksimalne jakosti $B=0.5\text{T}$. Stoga se magnetska polja u ovoj vježbi za bizmut mogu smatrati slabima.

Jednadžba za ovisnost otpora o slabom magnetskom polju za degenerirane fermionske plinove glasi:

$$\frac{R-R_0}{R_0} = \frac{\pi^2}{12} \left(\mu(E_F(T=0)) \frac{kT}{E_F(T=0)} \right)^2 |\vec{B}|^2 \quad (8)$$

gdje je R otpor vodiča, R_0 je otpor vodiča u odsutnosti magnetskog polja, a $\mu(E_K)$ je mobilnost elektrona sa kinetičkom energijom E_K definiranom kao:

$$\bar{v}_{Drift}(E_K)\vec{E} = \mu(E_K)|\vec{E}|^2 \quad (9)$$

Bizmut na sobnoj temperaturi nije degeneriran, ali je temperatura degeneracije blizu sobne temperature. Stoga se koristi jednadžba:

$$\frac{R-R_0}{R_0} = \frac{\pi^2}{12} \left(\mu(E_F) \frac{kT}{E_F} \right)^2 |\vec{B}|^2 \quad (10)$$

Jednadžba (10) izvedena je za specifičan slučaj kada je magnetsko polje \vec{B} okomito, a električno polje \vec{E} paralelno sa vodičem. Uvrštavajući jednadžbu (5) i vrijednosti za bizmut u jednadžbu (10) dobiva se:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \mu(E_F)^2 \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{2m_e k T_{Bi}}{h^2} \left(\frac{8\pi}{3n_{Bi}} \right)^{\frac{2}{3}} \left[1 + \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{2m_e k T_{Bi}}{h^2} \left(\frac{8\pi}{3n_{Bi}} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \right)^2 |\vec{B}|^2 \quad (11)$$

Stoga se, mjereći otpor R u ovisnosti o jačini magnetskog polja $|\vec{B}|$, može se izmjeriti mobilnost elektrona kinetičke energije jednake Fermijevoj energiji $\mu(E_F)$.

Za dobivanje polja koriste se zavojnice kroz koje protječe istosmjerna struja jakosti I . Ovisnost jakosti magnetskog polja o jakosti struje I dana je jednačbom:

$$B = \mu NI \quad (12)$$

gdje je μ permeabilnost jezgre zavojnice, a N je broj zavoja.