

10. MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI A HALLOVY KONSTANTY POLOVODIČE

Elektrická vodivost

Měrné elektrická vodivost σ je veličina charakterizující schopnost látky vést elektrický proud. Vystupuje v Ohmově zákoně zapsaném v diferenciálním tvaru

$$i = \sigma E, \quad (1)$$

v němž i je hustota proudu a E intenzita elektrického pole. V polovodiči může být transport náboje zprostředkován buď elektrony nebo dírami. Je-li střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů (driftová rychlost) $\langle v_n \rangle$ a děr $\langle v_p \rangle$, bude každý elektron s nábojem $-e$ přispívat k hustotě proudu hodnotou $-e\langle v_n \rangle$ a díra hodnotou $e\langle v_p \rangle$. Označíme-li koncentraci elektronů n a koncentraci děr p , bude celková hustota proudu

$$i = -en\langle v_n \rangle + ep\langle v_p \rangle. \quad (2)$$

Má-li platit Ohmův zákon, musí být střední rychlosti $\langle v_n \rangle$ a $\langle v_p \rangle$ úměrné intenzitě pole E . Příslušné konstanty se nazývají pohyblivosti μ_n a μ_p .

$$\langle v_n \rangle = -\mu_n E; \quad \langle v_p \rangle = \mu_p E \quad (3)$$

Z předchozích rovnic pak pro vodivost plyne

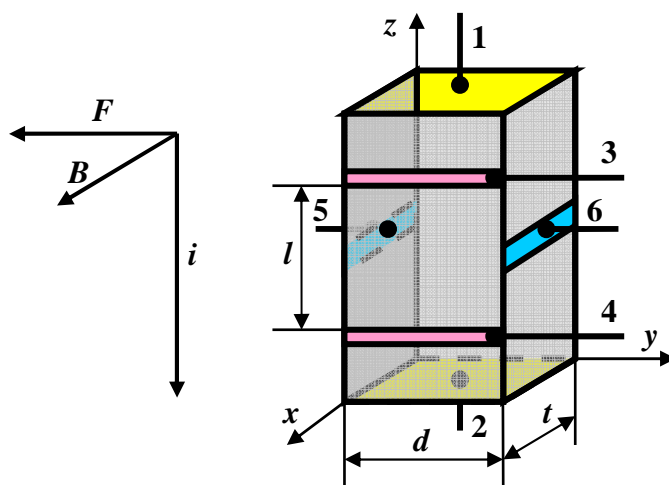
$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p). \quad (4)$$

Častým úkolem při výzkumu polovodičů je zjistit jak koncentraci nositelů, tak i jejich pohyblivost. Z rovnice (4) je zřejmé, že tento úkol nelze splnit, stanovíme-li jenom měrnou vodivost. Jestliže však výrazně převažuje vodivost jediného typu buď elektronová nebo děrová, lze tohoto cíle dosáhnout, doplníme-li měření vodivosti měřením Hallova napětí.

Hallův jev

Hallův jev je důsledkem Lorentzovy síly na náboje pohybující se v magnetickém poli.

Mějme vzorek ve tvaru hranolu, na jehož stěnách jsou umístěny kontakty tak, jak je zakresleno na obr. 1. Teče-li proud (konvenční kladný náboj) mezi kontakty 1 a 2 (v záporném smyslu osy z), platí pro proudovou hustotu uvnitř homogenního vzorku:



Obr. 1: Schematický obrázek vzorku polovodiče s rozměry a kontakty pro měření Hallova jevu

$$i = \frac{I}{t \cdot d}, \quad (5)$$

Kde $t \cdot d$ je průřez vzorku (obr. 1). Necht' na vzorek působí magnetické pole o indukci B v kladném smyslu osy x . Potom působí na tyto náboje Lorentzova síla o velikosti $-e\langle v_n \rangle B$, jejíž výslednice mívá ve směru záporné osy y . Tato síla způsobuje odchýlení elektronů směrem ke straně, v níž je kontakt 6 (viz obr. 1). Tím vzniká mezi protilehlými stěnami vzorku příčné elektrické pole E mající směr osy $-y$. Kromě Lorentzovy síly pak na náboje působí síla eE_y . Jsou-li obě síly v rovnováze platí

$$eE_y = e\langle v_n \rangle B. \quad (6)$$

Protože střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů můžeme vyjádřit pomocí jejich pohyblivosti a intenzity podélného pole E_z jako $\langle v_n \rangle = \mu_n E_z$, bude platit

$$E_y = \mu_n E_x B. \quad (7)$$

S použitím vztahů $i = \sigma E_z$ analogickým s (1) a $\sigma = en\mu_n$ plynoucím z (4) při koncentraci děr $p = 0$, dostaneme pro napětí mezi kontakty 5 a 6 (viz obr. 1)

$$U_H = E_y d = \frac{1}{en} \frac{I \cdot B}{t}. \quad (8)$$

Změříme-li Hallovo napětí U_H a proud I protékající vzorkem známých rozměrů, umístěným v magnetickém poli o indukci B , je možno ze vztahu (8) vypočítat koncentraci elektronů.

Odvození výrazu pro Hallovo napětí, které jsme zde uvedli, je značně zjednodušené. Vychází z představy, že elektrony jsou zcela volné a chovají se podobně jako molekuly plynu. Většinou je třeba uvažovat, že tak zvaný Hallův rozptylový faktor r_H , zavedený např. vztahem

$$U_H = r_H \frac{1}{en} \frac{I \cdot B}{t} \quad (9)$$

je různý od jedné. Hallova konstanta je pak rovna

$$R_H = \frac{r_H}{en}. \quad (10)$$

V praxi měříme vzorky Ge při pokojové teplotě. Pro tento případ je možno uvažovat $r_H = 3\pi/8$.

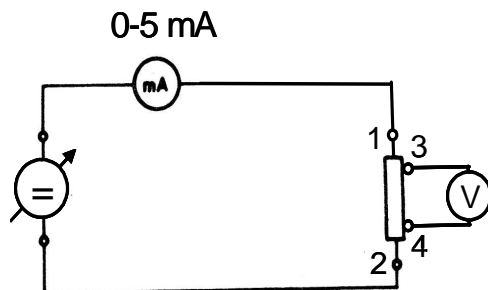
Stanovíme-li kromě Hallovy konstanty i měrnou vodivost, můžeme vypočítat tzv. Hallovskou pohyblivost ze vztahu

$$\mu = R_H \sigma \quad (11)$$

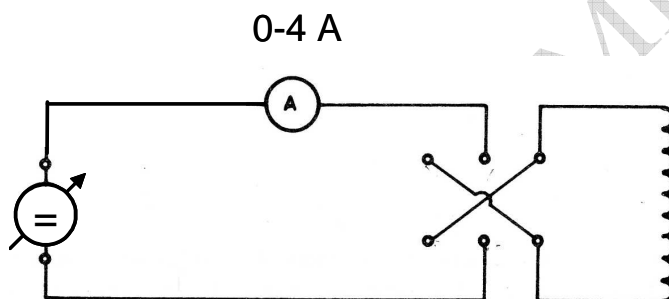
Měření vodivosti

Jak bylo řečeno výše, pro měření vodivosti a Hallovy konstanty se používá vzorek jednoduchého geometrického tvaru. Jeho délka má být alespoň třikrát větší než šířka. Vzorek je nutné opatřit kontakty, které nemají mít přechodové nebo hradlové odpory. Tento požadavek je

obvykle obtížné splnit. Proto se pro měření napětí využívá čtyřbodová metoda (viz úloha č.4 - Měření malých odporů), která eliminuje vliv přívodů a kontaktního napětí. Měříme v zapojení podle obr.2. Napěťové kontakty (kontakty 3,4) jsou odděleny od proudových kontaktů (kontakty 1,2). Napětí mezi kontakty 3,4 se musí měřit voltmetrem s vysokým vnitřním odporem. Maximální proud vzorkem je 5 mA



Obr. 2



Obr. 3: Napájení elektromagnetu

Napěťové kontakty 3, 4 vzorku připojíme k voltmetru. Vodivost vypočteme ze vztahu

$$\sigma = \frac{l}{td} \frac{I_{12}}{U_{34}} . \quad (12)$$

Zde označujeme I_{12} proud vzorkem a U_{34} napětí mezi kontakty 3 a 4.

Měření Hallova napětí

Obvod pro napájení vzorku nerozebíráme, zapojíme pouze obvod napájení elektromagnetu podle obr. 3. Proud magnetem měníme v rozmezí 1 až 4 A. Hallovo napětí měříme opět digitálním voltmetrem, tentokrát mezi kontakty 5 a 6 (viz obr. 1). Vzhledem k tomu, že se jen vzácně podaří naletovat kontakty 5, 6 naprosto symetricky, naměříme mezi nimi, teče-li proud vzorkem, napětí i při nulové magnetické indukci. Nejedná se pochopitelně o Hallovo napětí, ale o ohmické napětí.

Správnou hodnotu Hallova napětí stanovíme po odečtení tohoto ohmického napětí. Toto můžeme provést, změříme-li napětí $U_{5,6}$ při obou možných polaritách magnetického pole U_{56}^+ a U_{56}^- . Absolutní hodnota Hallova napětí je tedy rovna

$$|U_H| = |U_{56}^+ - U_{56}^-| / 2 . \quad (13)$$

Literatura:

- [1] J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření II, stat' 11.1 a čl. 11.3.3.1
- [2] B.Sedlák, I. Štoll: Elektřina a magnetismus, Academia, Praha 2002, str. 431
- [3] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II., SPN, Praha 1989

Fyzikální praktikum MFF UK