

10. MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI A HALLOVY KONSTANTY POLOVODIČE

Pracovní úkol

1. Změřte závislost proudu vzorkem na přiloženém napětí při nulové magnetické indukci.
2. Zjistěte závislost Hallova napětí na magnetické indukci při konstantním proudu vzorkem.
3. Výsledky měření zpracujte graficky a vyhodnoňte měrnou vodivost a Hallovu konstantu vzorku.
4. Vypočtete pohyblivost a koncentraci nositelů náboje.

Elektrická vodivost

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

$$\underline{i} = \sigma \underline{E} \quad , \quad (1)$$

v němž \underline{i} je hustota proudu a \underline{E} intenzita elektrického pole. V polovodiči může být transport náboje zprostředkován buď elektrony nebo dírami. Je-li střední rychlost uspořádaného pohybu elektronů $\langle v_n \rangle$ 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

$$\underline{i} = -e n \langle v_n \rangle + e p \langle v_p \rangle \quad . \quad (2)$$

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

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

Z předchozích rovnic pak pro vodivost plyne

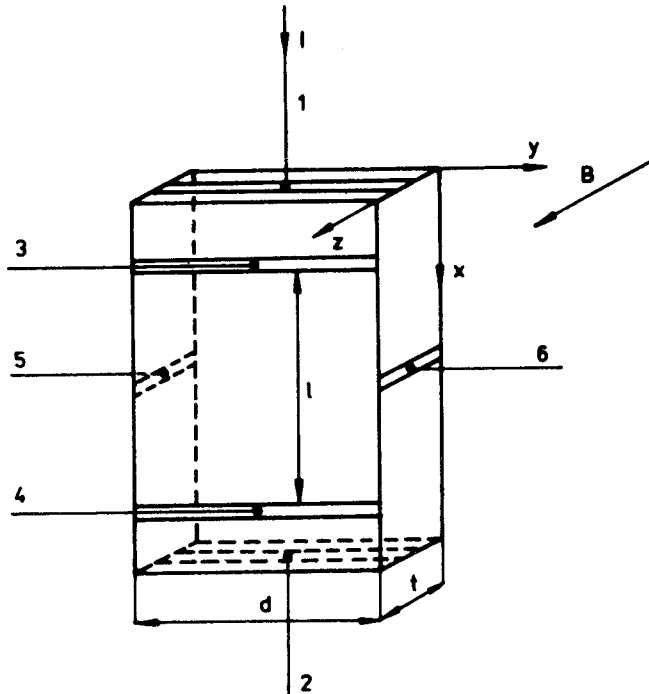
$$\sigma = e (n \mu_n + p \mu_p) \quad . \quad (4)$$

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 pouze 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

Je důsledkem působení Lorentzovy síly na náboje pohybující se v materiálu umístěném v magnetickém poli.

Mějme vzorek ve tvaru hranolu, na jehož stěnách jsou umístěny kontakty tak, jak je zakresleno na obr.1. Teče-li proud I mezi kontakty 1 a 2, platí pro proudovou hustotu uvnitř homogenního vzorku



Obr. 1

pole o intenzitě E_y mající směr osy $-y$. Kromě Lorentzovy síly pak na náboje působí i síla eE_y . K rovnováze dojde, jsou-li obě síly v rovnováze a platí

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

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

$$E_y = \mu_n E_x B$$

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

$$U_H = E_y \cdot d = \frac{1}{e n} \frac{I B}{t} \quad (7)$$

Změříme-li Hallovo napětí U_H a proud I protékající vzorkem známých rozměrů, umístěným v magnetickém poli o známé indukci B , je možno ze vztahu (7) 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

$$U_H = r_H \frac{1}{e n} \frac{I B}{t} \quad (8)$$

je různý od jedné. Hallova konstanta je pak rovna

$$R_H = \frac{r_H}{e n} \quad (9)$$

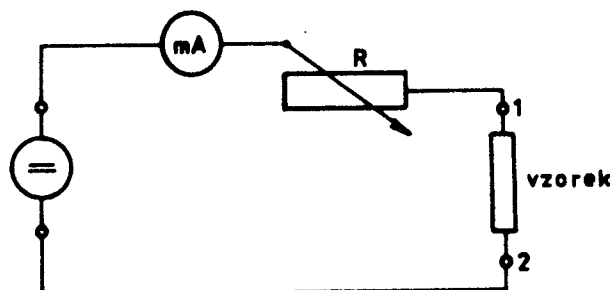
V praxi měříme zpravidla vzorky indiumantimonidu $InSb$ při pokojové teplotě. Pro tento případ je možno uvažovat $r_H = 3\pi / 8$.

Stanovíme-li kromě Hallovy konstanty i měrnou vodivost, můžeme vypočítat tak zvanou hallovskou pohyblivost ze vztahu

$$\mu = R_H \sigma \quad (10)$$

Měření vodivosti

Jak jsme již uvedli, používá se pro měření vodivosti a Hallovy konstanty 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. Opatřují se proto vzorky kromě proudových kontaktů (kontakty 1 a 2 na obr.1) též napěťovými kontakty (kontakty 3,4). V našem případě se jedná o kontakty pájené indiem. Podrobněji je o přípravě vzorků pojednáno v doporučené literatuře. Napětí mezi kontakty 3, 4 musíme měřit přístrojem se zanedbatelným odběrem proudu. V praxi pro tyto účely používáme buď multimetr G.1001 nebo mikrovoltmetr BM 545. Měření provádíme v zapojení podle obr.2.



Obr. 2

Jako zdroj je vhodné použít stabilizovaný zdroj napětí s regulovatelným výstupním napětím (např. Aritma). Není-li k dispozici, je možno použít zdroj 6 V ss z rozvodu. Do série se vzorkem zapojujeme posuvný odpor R , kterým dostavujeme proud vzorkem. Proud měříme multimetrem G 1001.500. Při měření nesmí být vzorek

znatelně ohříván protékajícím proudem. Ohmické ztráty ve vzorku by neměly překročit podstatně 10 mW . Jelikož odpor vzorku je menší než 1 Ω , můžeme měřit s proudy do 100 mA .

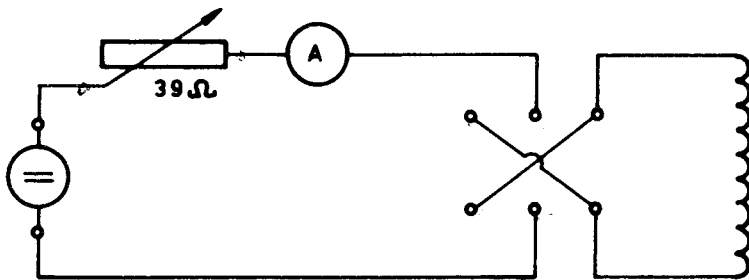
Napěťové kontakty 3, 4 vzorku připojíme ke kompenzátoru nebo k mikrovoltmetru. Používáme-li kompenzátor, je nutno dbát na polaritu napětí. Vodi-
vost vypočteme ze vztahu

$$\sigma = \frac{l}{t d} \frac{I_{1,2}}{U_{3,4}} \quad (11)$$

Zde označujeme $I_{1,2}$ proud vzorkem a $U_{3,4}$ napětí mezi kontakty 3, 4 .

Měření Hallova napětí

Elektromagnet zapojujeme podle schématu na obr.3 . Proud magnetem mění-
me v rozmezí 1 až 4 A . Ihned po měření obvod odpojujeme od sítě, abychom
zbytečně nezatěžovali zdroj. Hallovo napětí měříme opět kompenzátozem nebo



Obr. 3

mikrovoltmetrem mezi kontakty 5, 6 . Je o více než dva řády menší než ohmické napětí $U_{3,4}$, takže měříme na rozsahu 5 mV kompenzátoru nebo 1 mV mikrovoltmetru. 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 hodnotě magnetické indukce. 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. Napětí před komutací proudu magnetem nechť je $U_{5,6}^{(1)}$, po komutaci $U_{5,6}^{(2)}$. Před každou komutací proudu magnetem snížíme proud magnetem na minimum. Absolutní hodnotu Hallova napětí pak stanovíme podle vztahu

$$\left| U_H \right| = \left| U_{5,6}^{(1)} - U_{5,6}^{(2)} \right| / 2 \quad (12)$$

Při komutaci proudu magnetem se může měnit i polarita napětí $U_{5,6}$. Pak je výhodné, měříme-li kompenzátozem, zapojit mezi vzorek (kontakty 5,6) a měřící přístroj komutátor.

Literatura

J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření II/8 ,
stať 11.1 a čl. 11.1.3.1