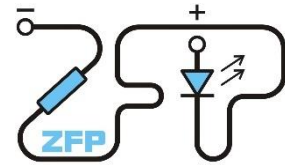


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum II



Úloha č. X

Název úlohy: Hallův jev

Jméno: Anežka Doležalová

Obor: **FOF** ~~FAF~~ ~~FMUZV~~

Datum měření: 30.10.2018

Datum odevzdání: 13.11.2018

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 3	
Teoretická část	0 - 2	
Výsledky a zpracování měření	0 - 9	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:

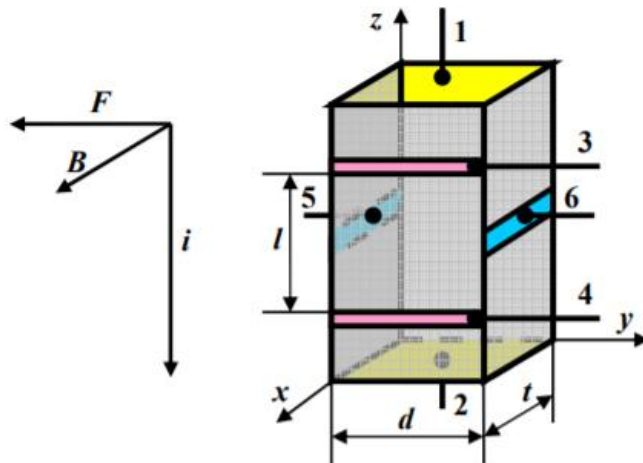
dne:

Pracovní úkoly

1. Zjistěte závislost proudu vzorkem na přiloženém napětí při nulové magnetické indukci.
2. Zjistěte závislost Hallova napětí na magnetické indukci při třech hodnotách konstantního proudu vzorkem.
3. Výsledky měření zpracujte graficky. Vyhodnoťte měrnou vodivost a Hallovu konstantu vzorku.
4. Vypočtěte pohyblivost a koncentraci nositelů náboje.

Teorie

Teče-li polovodičem na obr. 1[1] proud I mezi svorkami 1,2 a působí-li na něj magnetické pole o magnetické indukci B , poté bude mezi svorkami 5, 6 měřitelné napětí které se nazývá Hallovo napětí, značeno U_H . Toto napětí je způsobeno Lorenzovou silou působící na náboje v magnetickém poli.



obr. 1

Elektrická vodivost

Měrná elektrická vodivost se značí σ a je dána vztahem

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

kde i je hustota proudu a E elektrická intenzita.

Transport náboje zde v polovodiči je uskutečňován elektrony a dírami. Jejich střední rychlosti lze označit jako $\langle v_n \rangle$ a $\langle v_p \rangle$, tzv. driftové rychlosti. Po označení jejich koncentrací n , p bude pro hustotu proudu platit vztah

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

Z platnosti Ohmova zákona (vztahu (1)) vyplývá, že driftové rychlosti musí být úměrné intenzitě elektrického pole. Příslušné konstanty úměrnosti se nazývají pohyblivosti a značí se μ_n a μ_p . Vodivost lze tedy vyjádřit jako

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad \langle v_n \rangle = -\mu_n E, \quad \langle v_p \rangle = -\mu_p E \quad (3)$$

Hallův jev

U vzorku na obr. 1 lze říci, že pokud teče proud I mezi kontakty 1 a 2, bude proudová hustota dána vztahem

$$i = \frac{I}{td} \quad (4)$$

Při působení magnetické indukce (obr. 1) působí na náboje Lorenzova síla ve směru osy y ke kontaktu 6. Tím vzniká elektrické pole E_y , které také působí na náboje. Pokud jsou tyto síly v rovnováze, platí vztah

$$eE_y = e\langle v_n \rangle B \quad (5)$$

Ze vztahů (1), (3) a pokud je koncentrace $p=0$, bude platit následující vztah pro napětí mezi kontakty 5 a 6

$$U_H = E_y d = \frac{1}{en} \frac{IB}{t} \quad (6)$$

Vyjádřený vztah je velmi zjednodušený, ve skutečnosti je třeba ještě uvažovat tzv. Hallův rozptylový faktor r_H kvůli vlastnostem polovodičů, u kterých nejsou elektrony zcela volné. Tento faktor lze zavést vztahem

$$U_H = r_H \frac{1}{en} \frac{IB}{t} \quad (7)$$

Zavádí se také Hallova konstanta, která je vyjádřena pomocí rozptylového faktoru jako

$$R_H = \frac{r_H}{en} \quad (8)$$

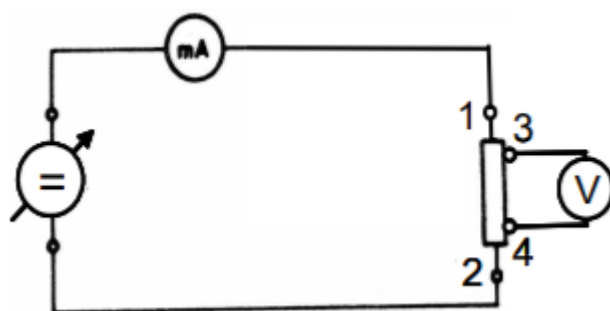
Tzv. Hallovskou pohyblivost pak lze vyjádřit jako

$$\mu_H = R_H \sigma \quad (9)$$

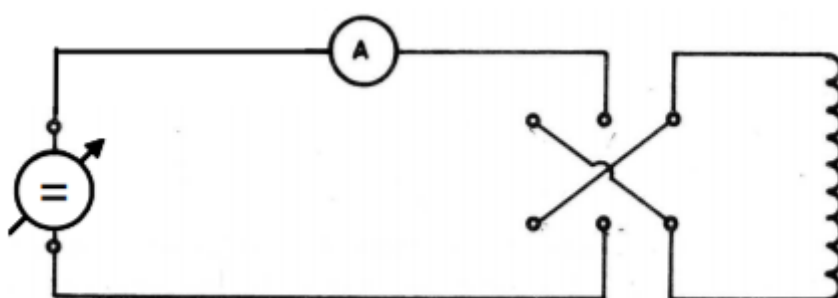
Postup měření

Pro měření vodivosti se používá čtyřbodová metoda kvůli zamezení vlivu kontaktů (viz obr. 2[1]). V tomto zapojení se měří proud mezi kontakty 1 a 2 a napětí mezi kontakty 3 a 4. Vodivost se poté dopočte ze vztahu

$$\sigma = \frac{l}{td} \frac{I_{12}}{U_{34}} \quad (10)$$



obr. 2



obr. 3

Při měření Hallova napětí použijeme pro generaci magnetického pole elektromagnet zapojený jako na obr. 3[1]. Vzorek je umístěn uvnitř cívky elektromagnetu a připojený ke zdroji kontakty 1, 2. Mezi kontakty 5, 6 je měřeno napětí. Toto napětí ale není přímo Hallovo, nelze zaručit že kontakty 5 a 6 jsou ve stejné výšce, a tak se zde může uplatnit i napětí ohmické. Abychom toto napětí eliminovali, měříme při obou polaritách magnetického pole. Absolutní hodnota Hallova napětí je tedy

$$|U_H| = \frac{|U_{56}^+ - U_{56}^-|}{2} \quad (11)$$

Výsledky měření

Celé měření probíhalo na vzorku Ge typu n ($p=0$), pro který je Hallův rozptylový faktor $r_H = 3\pi/8$, o rozměrech

$$l = (6,000 \pm 0,005) \text{ mm}$$

$$d = (3,350 \pm 0,005) \text{ mm}$$

$$t = (0,720 \pm 0,005) \text{ mm}$$

Proud vzorkem byl měřen přístrojem MASTECH MY-65, který měří na daném rozsahu s přesností $\pm 0,5 \% \pm 5 \text{ dg}$. Napětí na vzorku bylo měřeno přístrojem MATEX M-3270D s přesností $\pm 0,5 \% \pm 2 \text{ dg}$ na rozsahu do 400 mV a s přesností $\pm 0,8 \% \pm 3 \text{ dg}$ na rozsahu do 4 V.

Proud procházející elektromagnetem byl měřen ampérmetrem třídy přesnost 0,5. Pro daný elektromagnet je vztah mezi proudem a magnetickou indukcí následující

$$B(T) = 0,098I(A) \quad (12)$$

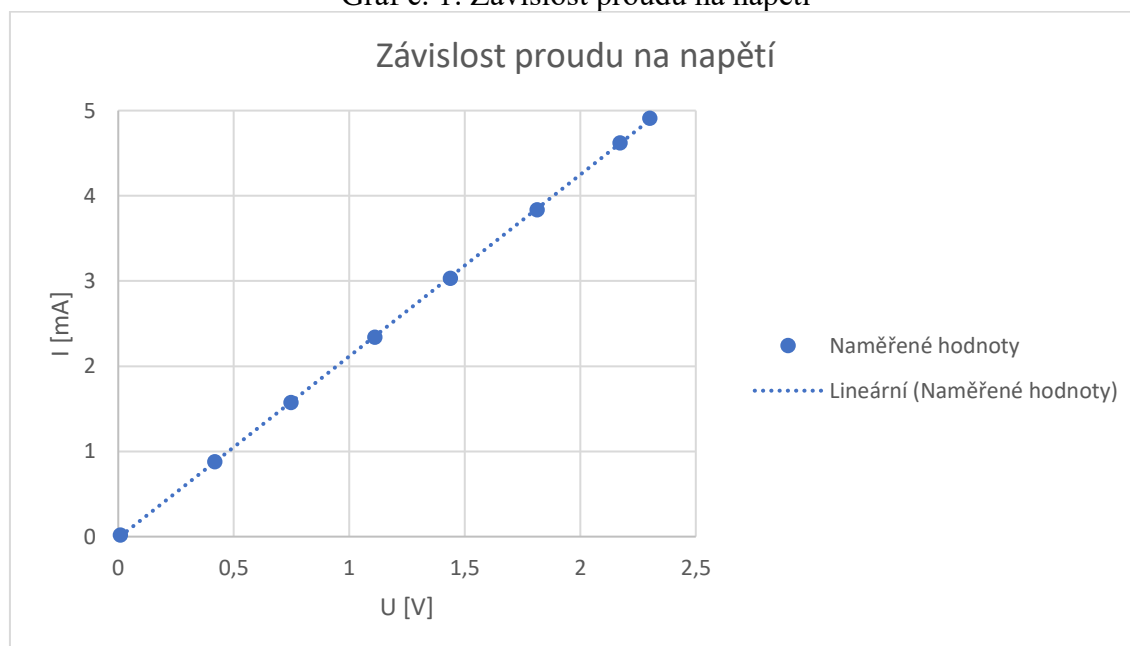
1) Měrná vodivost

Pro výpočet měrné vodivosti byla změřena závislost proudu a napětí pro vzorek nacházející se v nulovém magnetickém poli čtyřbodovou metodou (dle schématu na obr. 2). Polarita napětí je dána pouze připojením zdroje a nic nevyovídá o vzorku, proto je uvažovaná pouze velikost tohoto napětí. Závislost je zaznamenána v tabulce č. 1 a v grafu č. 1 je vynesena graficky.

Tabulka č. 1: Závislost proudu na napětí

U [V]	σ_U [V]	I [mA]	σ_I [mA]
0,0085	0,0002	0,018	0,005
0,418	0,001	0,880	0,009
0,748	0,003	1,574	0,013
1,111	0,006	2,341	0,017
1,438	0,009	3,03	0,02
1,81	0,01	3,837	0,024
2,172	0,014	4,62	0,03
2,301	0,015	4,91	0,03

Graf č. 1: Závislost proudu na napětí



Z této závislosti byla určena elektrická vodivost ze vztahu (10) lineární regresí a chyba byla určena ze zákona přenosu chyb veličin vystupujících ve vztahu (10). Konduktivita má tedy hodnotu $\sigma = (5,3 \pm 0,3) \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$.

2) Hallovo napětí

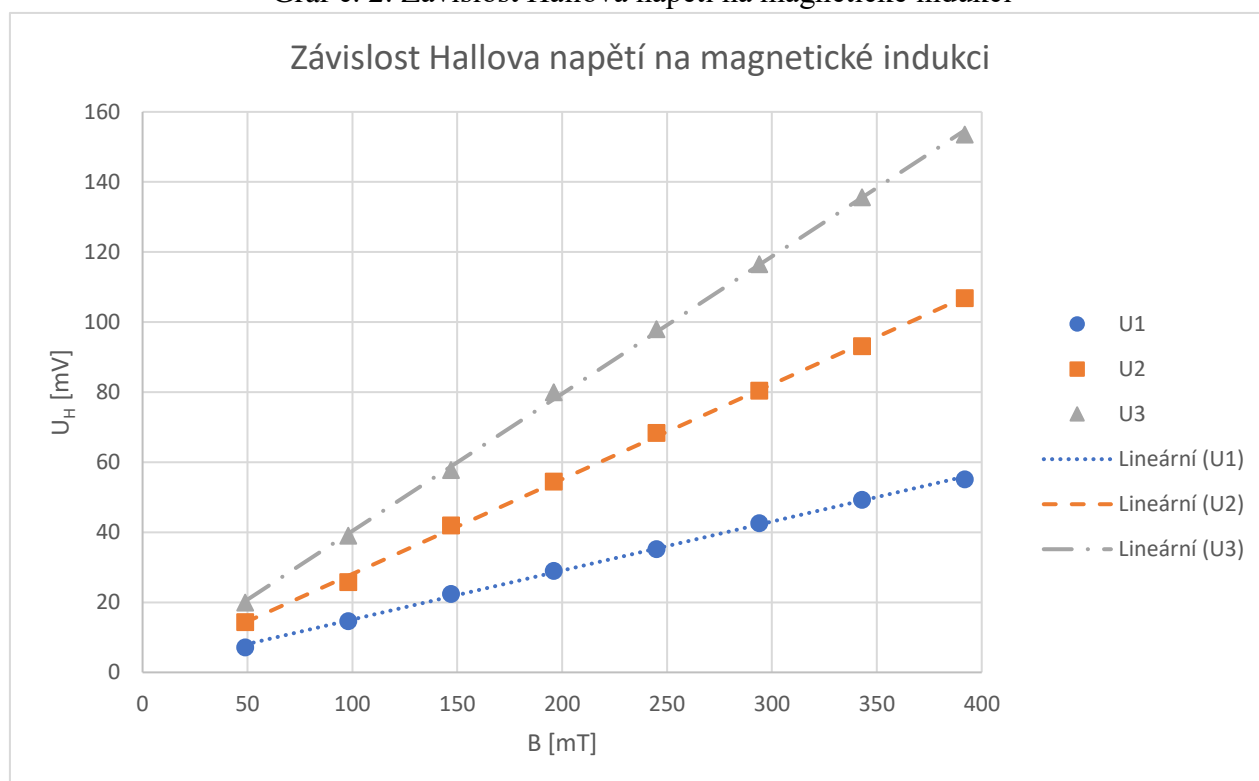
Pro měření Hallova napětí bylo použito obdobné schéma jako na obr. 2, jen voltmetr byl zapojen ke kontaktům 5 a 6. Vzorek se při tomto měření nacházel v magnetickém poli vytvářeném elektromagnetem, tedy uvnitř cívky, kterou procházel proud. Pro tři různé proudy procházející vzorkem byla změřena závislost Hallova napětí na magnetické indukci. Velikost magnetické indukce závisí na procházejícím proudu podle vztahu (12).

Kvůli nesymetrii kontaktů 5, 6 bylo nutné provést korekci ze vztahu (11) pro obě možné polarity, v závislosti je tedy již použita tato upravená hodnota. Změřená závislost je uvedena v tabulce č. 2 a graficky vynesena v grafu č. 2.

Tabulka č. 2: Závislost Hallova napětí na magnetické indukci

B [mT]	I = (1,59 ± 0,01) mA		I = (3,09 ± 0,02) mA		I = (4,76 ± 0,03) mA	
	U _H [mV]	σ _U [mV]	U _H [mV]	σ _U [mV]	U _H [mV]	σ _U [mV]
49 ± 3	7,20	0,04	14,4	0,1	20,0	0,1
98 ± 3	14,65	0,07	25,9	0,1	39,1	0,2
147 ± 3	22,4	0,1	42,0	0,2	57,8	0,3
196 ± 3	29,0	0,2	54,5	0,3	80,0	0,4
245 ± 3	35,2	0,2	68,4	0,3	98,0	0,5
294 ± 3	42,6	0,2	80,5	0,4	116,6	0,6
343 ± 3	49,25	0,25	93,2	0,5	135,7	0,7
392 ± 3	55,2	0,3	106,9	0,5	153,6	0,8

Graf č. 2: Závislost Hallova napětí na magnetické indukci



Jednotlivé konstanty úměrnosti pro lineární regrese vztahů $U_H(IB/t)$ byly spočítány pomocí funkce linregrese programu excel. Tyto konstanty mají hodnoty $R_1 = (63 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$, $R_2 = (63 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$ a $R_3 = (59 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$. Jejich zprůměrováním dostáváme hodnotu Hallovy konstanty $R_H = (62 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$.

3) Výpočet pohyblivosti a koncentrace

Pro výpočet pohyblivosti a koncentrace nositelů náboje byli použity již získané hodnoty – Hallova konstanta a koncentrace.

Ze vztahu (8) můžeme tedy dopočítat z Hallovy konstanty koncentraci nábojů (e je elementární náboj [2]), která má hodnotu $n = (1,19 \pm 0,06) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

Pro výpočet pohyblivosti byl využit vztah (3), kde $p=0$. Takto vypočtená pohyblivost má hodnotu $\mu = (0,279 \pm 0,007) \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Dále byla vypočtena i Hallovska pohyblivost podle vztahu (9), která má hodnotu $\mu_H = (0,33 \pm 0,02) \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Diskuse

Bez přítomnosti magnetického pole byla změřena závislost proudu protékajícího vzorkem na napětí. Tato závislost vyšla dle očekávání lineární, dokonce po proložení grafu lineární regrese vypadá, že všechny hodnoty leží na této přímce. Lze tedy předpokládat, že u žádného měření nebyla výrazně větší chyba. Pro chybu systematickou zde též nic nenaznačuje, tedy hodnoty jsou zatíženy jen chybou měřících přístrojů, protože při použití čtyřbodové metody nemají vliv ani přírodní vodiče.

Zmíněné chyby se také přenášejí do vypočtené vodivosti dle zákona přenosu chyb. Lze tedy předpokládat, že i zde není žádná systematická nebo hrubá chyba započtena.

Rozměry vzorku byly zadané, předpokládá se tedy, že chyby odpovídají. Vzorek nelze přeměřit, je napevno umístěn v elektromagnetu a nelze tedy zadané hodnoty ověřit. Zde se mohla vyskytnout chyba v závislosti na změně rozměrů při působení Jouleova tepla. Předpokládáme, že tyto chyby jsou zanedbatelné.

Pro měření Hallova napětí byl použit elektromagnet, uvnitř cívky elektromagnetu se nacházel měřený vzorek. Cívkou procházel proud a na vzorek tak působilo magnetické pole. Pro toto uspořádání byla změřena závislost Hallova napětí na velikosti magnetické indukce. Přepočet proudu na magnetickou indukci byl též součástí zadání a předpokládá se tedy jeho správnost. Během měření kolísal proud vzorkem, a to by mohlo způsobit jistou chybu. Předpokládáme ale, že tyto výchyly byly dostatečně malé na to, aby mohli ovlivnit výsledky měření.

Zadán byl i Hallův rozptylový faktor, a tudíž opět předpokládáme, že se výrazně nemění v závislosti na procházejícím proudu potažmo teplotě vzorku a odpovídá tedy zadané hodnotě po celou dobu měření.

V žádném měření nebyla překročena doporučená maximální hranice procházejícího proudu. Pro vzorek je to 5 mA, pro elektromagnet 4A.

Závěr

Byla změřena závislost proudu na napětí bez přítomnosti magnetického pole, dle očekávání byla lineární. Měrná vodivost byla vypočtena na $\sigma = (5,3 \pm 0,3) \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Závislost Hallova napětí na magnetické indukci byla též dle očekávání lineární pro všechny tři hodnoty procházejícího proudu, hodnota Hallovy konstanty byla určena na hodnotu $R_H = (62 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$.

Vypočtená koncentrace nosičů náboje je $n = (1,19 \pm 0,06) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

Pohyblivost elektronů byla spočtena na $\mu = (0,279 \pm 0,007) \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, Hallovska pohyblivost na $\mu_H = (0,33 \pm 0,02) \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Zdroje

- [1] Základní fyzikální praktikum [Základní fyzikální praktikum]. [online][cit. 12.11.2018]. Dostupné z:
https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/media/zadani/texty/txt_210.pdf
- [2] Elementární náboj – Wikipedie. [online][cit. 12.11.2018]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Element%C3%A1rn%C3%AD_n%C3%A1boj