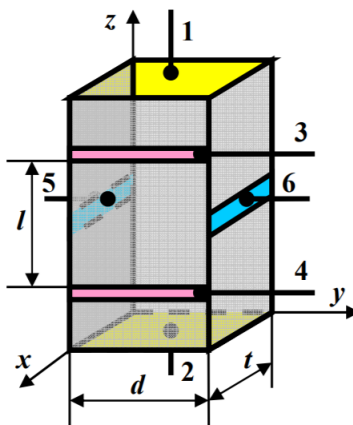


Úkol

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

Teorie

Hallův jev je důsledkem působení *Lorentzovy síly* na náboje pohybující se v magnetickém poli. Na obrázku 1 je znázorněn měřený vzorek germania. Kontakty 1 a 2 jsou *proudové kontakty*, 3 a 4 jsou *napěťové kontakty*, použité pro čtyřbodovou metodu měření. Kontakty 5 a 6 jsou určeny pro měření Hallova napětí.

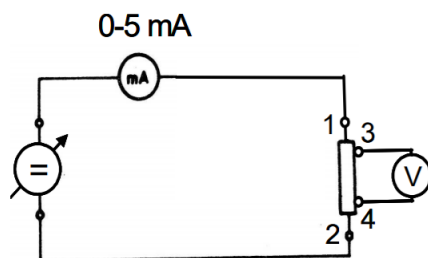


Obrázek 1: Znázornění měřeného vzorku s rozměry a kontakty [1]

Vodivost vzorku při nulové magnetické indukci měříme pomocí zapojení 2. Platí vztah

$$\sigma = \frac{l}{td} \frac{I}{U} = \frac{lA}{td}, \quad (1)$$

kde A dostaneme jako směrnici regresní přímky závislosti I na U .



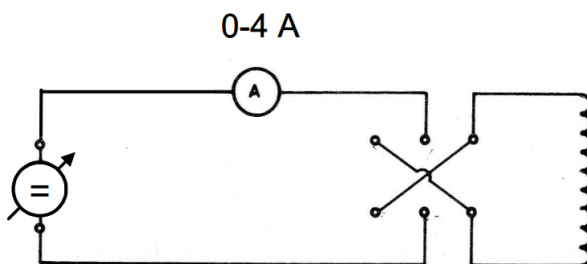
Obrázek 2: Zapojení pro měření vodivosti [1]

Zapojení napájení elektromagnetu je vyobrazeno na obrázku 3. Intenzita magnetického pole souvisí s napájecím proudem vztahem

$$B = 0,098I. \quad (2)$$

Hallovo napětí měříme na svorkách 5 a 6 podle obrázku 1. Protože tyto svorky neleží na vzorku symetricky, měříme napětí při obou polaritách magnetické indukce. Hallovo napětí pak získáme jako

$$|U_H| = \frac{|U^+ - U^-|}{2}. \quad (3)$$



Obrázek 3: Obvod pro napájení elektromagnetu [1]

Hallovu konstantu vzorku dostaneme ze vztahu

$$R_H = \frac{tU_H}{IB} = \frac{tC}{I}, \quad (4)$$

přičemž C získáme jako směrnici regresní přímky závislosti U_H na B .

Koncentraci nositelů náboje lze vyjádřit jako

$$n = \frac{r_h}{eR_H}, \quad (5)$$

kde $r_h = \frac{3\pi}{8}$ je *Hallův rozptylový faktor* [1] a $e \doteq 1,6022 \times 10^{-19}$ C je *elementární náboj* [2].

Pohyblivost nositelů náboje dostaneme ze vztahu

$$\mu_n = \frac{\sigma}{en}. \quad (6)$$

Výsledky měření

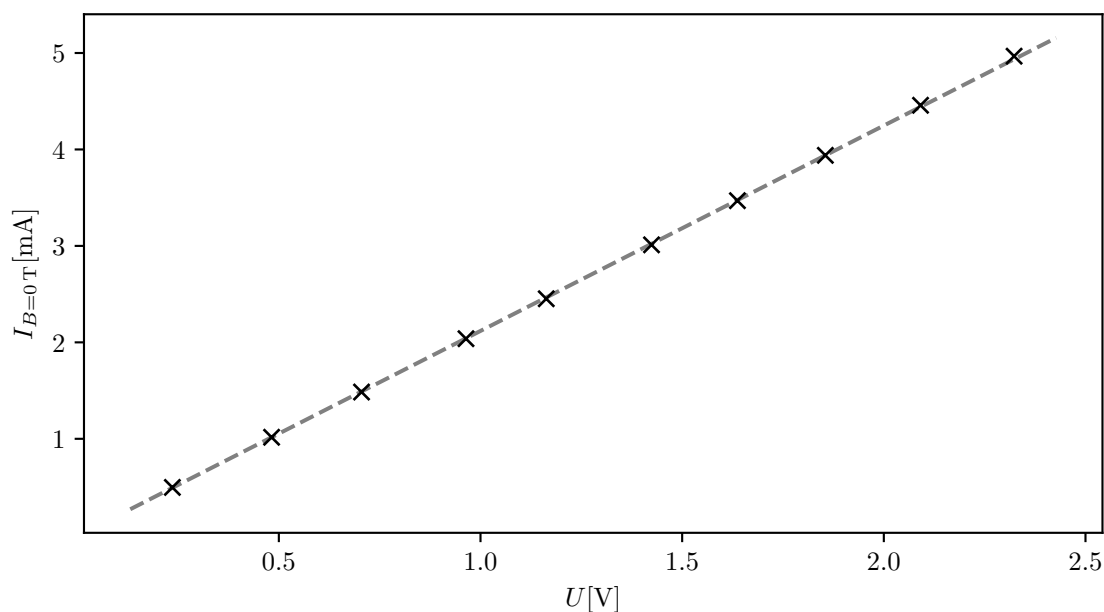
Úkol 1

Následující tabulka obsahuje naměřené hodnoty napětí a proudu při nulové indukci. Pro měření napětí byl použit multimetr **MY-68**, jako ampérmetr sloužil multimetr **MY-65** v rozsahu 20 mA.

U V	σ_U V	$I_{B=0\text{ T}}$ mA	$\sigma_{I_{B=0\text{ T}}}$ mA
0,236	0,003	0,496	0,007
0,482	0,003	1,016	0,010
0,705	0,004	1,485	0,012
0,964	0,005	2,038	0,015
1,163	0,005	2,452	0,017
1,424	0,006	3,011	0,020
1,637	0,007	3,469	0,022
1,855	0,008	3,939	0,025
2,091	0,008	4,458	0,027
2,323	0,009	4,967	0,030

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí a proudu při nulové indukci

V následujícím grafu jsou vyobrazeny hodnoty z tabulky 1, proložené přímkou se směrnici $A = (2,129 \pm 0,005) \times 10^{-3}$.



Obrázek 4: Závislost proudu na napětí při nulové indukci

Úkol 2

V následujících dvou tabulkách lze nalézt naměřené hodnoty proudu napájecího elektromagnetu, napětí na svorkách 5 a 6 při obou polaritách magnetického pole, jakožto i vypočítané hodnoty magnetické indukce podle (2) a Hallova napětí podle (3). Napětí bylo měřeno multimetrem **MY-65** při odpovídajících rozsazích, konstantní proud vzorkem byl kontrolován multimetrem **MY-68** a napájecí proud I_B byl měřen analogovým ampérmetrem třídy přesnosti 0,5.

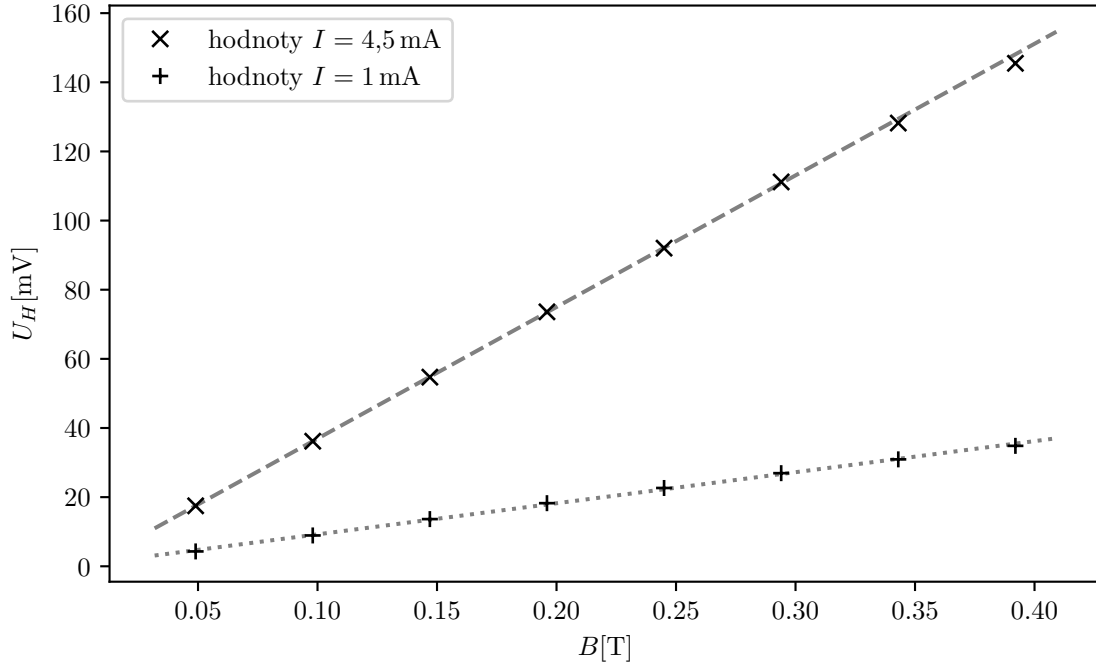
I_B [A]	σ_{I_B} [A]	U^+ [mV]	σ_{U^+} [mV]	U^- [mV]	σ_{U^-} [mV]	B [T]	σ_B [T]	U_H [mV]	σ_{U_H} [mV]
0,500	0,006	17,65	0,04	9,05	0,03	0,0490	0,0006	4,300	0,026
1,000	0,006	22,37	0,04	4,53	0,03	0,0980	0,0006	8,920	0,026
1,500	0,030	26,73	0,04	-0,57	0,03	0,1470	0,0029	13,650	0,026
2,000	0,030	31,93	0,05	-4,58	0,03	0,1960	0,0029	18,255	0,028
2,500	0,030	36,37	0,05	-8,93	0,03	0,2450	0,0029	22,650	0,030
3,000	0,030	40,75	0,05	-13,12	0,04	0,2940	0,0029	26,935	0,031
3,500	0,030	44,99	0,05	-16,87	0,04	0,3430	0,0029	30,930	0,033
4,000	0,030	48,63	0,05	-21,04	0,04	0,3920	0,0029	34,835	0,034

Tabulka 2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro určení Hallova napětí při konstantním proudu 1 mA

I_B [A]	σ_{I_B} [A]	U^+ [mV]	σ_{U^+} [mV]	U^- [mV]	σ_{U^-} [mV]	B [T]	σ_B [T]	U_H [mV]	σ_{U_H} [mV]
0,500	0,006	87,78	0,07	52,80	0,06	0,0490	0,0006	17,49	0,05
1,000	0,006	106,90	0,08	34,55	0,05	0,0980	0,0006	36,18	0,05
1,500	0,030	125,57	0,09	16,15	0,04	0,1470	0,0029	54,71	0,05
2,000	0,030	145,95	0,10	-1,250	0,03	0,1960	0,0029	73,60	0,05
2,500	0,030	164,35	0,11	-19,70	0,04	0,2450	0,0029	92,02	0,06
3,000	0,030	184,60	0,12	-37,75	0,05	0,2940	0,0029	111,17	0,07
3,500	0,030	202,2	0,5	-54,21	0,06	0,3430	0,0029	128,20	0,25
4,000	0,030	219,4	0,5	-71,58	0,07	0,3920	0,0029	145,49	0,26

Tabulka 3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro určení Hallova napětí při konstantním proudu 4,5 mA

Následující graf zachycuje lineární závislosti mezi magnetickou indukcí a Hallovým napětím spolu s regresními přímkami se směrnici $C_{I=1\text{ mA}} = (89,9 \pm 1,2) \times 10^{-3}$ a $C_{I=4,5\text{ mA}} = (380,7 \pm 1,4) \times 10^{-3}$.



Obrázek 5: Závislost Hallova napětí na magnetické indukci

Úkol 3

Hodnoty chyb spočtených veličin v tomto a následujícím úkolu byly určeny metodou přenosu chyb.

Vodivost σ byla určena podle (1) jako

$$\sigma = (5,30 \pm 0,04) \text{ S m}^{-1}.$$

Hallovu konstantu vzorku jsem spočítal podle (4) pro oba konstantní proudy.

$$R_{H_{I=1\text{ A}}} = (64,7 \pm 2,7) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1},$$

$$R_{H_{I=4,5\text{ A}}} = (60,9 \pm 0,9) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}.$$

Dále budeme počítat s průměrem těchto hodnot:

$$R_H = (62,8 \pm 1,0) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

.

Úkol 4

Koncentraci nositelů náboje spočítáme z (5)

$$n = (1,171 \pm 0,012) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

a jejich pohyblivost podle (6)

$$\mu_n = (0,2824 \pm 0,0022) \text{ m}^3 \Omega^{-1} \text{ C}^{-1}.$$

Diskuse

V souladu s teoretickou předpovědí jsme v obou měřeních dostali lineární závislost, žádná z hodnot se výrazně z této závislosti nevychyluje. Nejméně přesná je závislost Hallova napětí na indukci pro proud rovný 1 A. Tento fakt se následně projevuje vyšší chybou vypočtené hodnoty Hallovy konstanty. Tato hodnota se v rámci chyby shoduje s hodnotou, dosaženou s využitím směrnice závislosti pro proud 4,5 A.

V celém průběhu měření byly zanedbány odpory vodičů a spojů, které se však mohly v měření mírně projevit. Stejně tak není uvažován vliv prostředí. Vztah mezi napájecím proudem elektromagnetu a intenzitou magnetického pole je považován za dokonale přesný, chyba zaokrouhlení hodnoty elementárního náboje není třeba uvažovat.

Závěr

V úkolu 1 byla zjištěna lineární závislost proudu na přiloženém napětí při nulové magnetické indukci.

V úkolu 2 byla taktéž naměřena lineární závislost Hallova napětí na magnetické indukci. Hodnota konstantního proudu vzorkem se odráží ve strmosti řečené závislosti.

Pomocí lineárních regresí těchto závislostí byly v úkolu 3 určeny hodnoty měrné vodivosti a Hallovy konstanty vzorku jako

$$\begin{aligned}\sigma &= (5,30 \pm 0,04) \text{ S m}^{-1}, \\ R_{H_{I=1\text{ A}}} &= (64,7 \pm 2,7) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}, \\ R_{H_{I=4,5\text{ A}}} &= (60,9 \pm 0,9) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}.\end{aligned}$$

V úkolu 4 následně byly spočteny hodnoty pohyblivosti a koncentrace nositelů náboje

$$\begin{aligned}n &= (1,171 \pm 0,012) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}, \\ \mu_n &= (0,2824 \pm 0,0022) \text{ m}^3 \Omega^{-1} \text{ C}^{-1}.\end{aligned}$$

Literatura

- [1] Studijní text "Měření elektrické vodivosti a Hallovy konstanty polovodiče", dostupné z http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_210.pdf, 25. 10. 2017
- [2] The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty, dostupné z <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>, 29. 10. 2017