

7 – Hallův jev v kovu a polovodiči

Zadání

1. Změřte Hallův koeficient pro kov a polovodič při laboratorní teplotě.
2. Změřte měrnou vodivost obou vzorků.
3. Pro několik hodnot proudu a magnetické indukce ověřte, že závislost napětí na proudu a na magnetické indukci je lineární.
4. Odvoďte podmínku pro slabé magnetické pole a zjistěte, zda byla splněna.

Teorie

Pokud budeme působit magnetickým polem na vodič, jímž protéká proud s určitou hustotou, budeme pozorovat že nositelé náboje se vychylují a vzniká tzv. příčné pole \vec{E}_H , které nazveme Hallovo. Intenzita Hallova pole kompenzuje vliv pole magnetického. Tento jev má za následek ustanovení rovnováhy, kterou můžeme popsat takto

$$0 = q\vec{E}_H + q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

kde $\vec{v} = nq\vec{j}$ je driftová rychlost nositelů náboje q , jejichž koncentrace je n . \vec{j} je hustota proudu. Hallovy koeficientem R_H pak nazveme koeficient úměry mezi Hallovy polem a $-\vec{j} \times \vec{B}$. Vztah pro tento koeficient lze odvodit po menších úpravách z rovnice 1:

$$\vec{E}_H = -\frac{1}{nq} \cdot (\vec{j} \times \vec{B}) \Rightarrow R_H = \frac{1}{nq} \quad (2)$$

Tento vztah je dobře aplikovatelný, měříme-li kov. Pokud bychom chtěli proměřit polovodič, musíme počítat s tím, že jsou zde přítomny dva nositelé náboje, které mají opačný náboj a mohou mít i rozdílnou efektivní hmotnost a rychlosti. V případě polovodiče pro Hallův koeficient platí následující vztah

$$R_H = -r_H \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{|q|(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad (3)$$

r_H je rozptylový faktor, který závisí na druhu nositelů proudu. Pro polovodič je jeho hodnota 1. n a p jsou koncentrace nositelů náboje a μ s příslušným indexem jejich pohyblivost. Pokud převládne jeden typ nositelů, můžeme vztah přepsat následovně

$$R_H = -\frac{r_H}{e_0 n} \quad R_H = -\frac{r_H}{e_0 p}. \quad (4)$$

Experiment je postaven tak, že pole \vec{B} je kolmé na vodič. V takovém případě můžeme sledovat pouze velikosti veličin, není třeba brát ohled na směr. Předpokládejme, že ve směru magnetického pole má vzorek tloušťku w a šířku a . Pak lze psát

$$R_H = \frac{E_H}{jB} = \frac{U_H wa}{aIB} = \frac{U_H w}{IB}, \quad (5)$$

kde I je proud a U_H nazveme Hallovy napětím.

Výše uvedené vztahy však platí pouze pro slabé magnetické pole. Takové pole má mnohem větší poloměr zakřivení, než je střední volná dráha nositelů náboje. Uvažujme elektrony, pak pro střední volnou dráhu bude platit

$$l = v\tau = v \frac{\sigma m}{ne^2} \quad \sigma = ne\mu \quad (6)$$

Položíme-li do rovnosti magnetickou a dostředivou sílu, získáme poloměr křivosti a odtud jednodušími úpravami podmínku pro slabé pole

$$\frac{mv^2}{R} = evB \Rightarrow R = \frac{mv}{eB} \quad (7)$$

$$l \ll R \Rightarrow \frac{vne\mu m}{ne^2} \ll \frac{mv}{eB} \Rightarrow \mu B \ll 1 \quad (8)$$

Měření

Byly proměřovány dva vzorky. Jednak polovodič typu p (Ge 2) a hliník. Pro germaniový vzorek nám byly rozměry známy, u hliníkového vzorku je bylo třeba určit, respektive bylo třeba změřit tloušťku napařené vrstvy. Vrstva byla proměřena pomocí interferenčního mikroskopu Tolanského metodou. Je-li na vzorku schodek, tedy rozhraní mezi vrstvou a podkladem, vidíme schodek i na interferenčních proužcích. Z posunu proužků a ze vzdálenosti dvou proužků jsme schopni určit tloušťku vrstvy. Vlnová délka použitého světla je $\lambda = 589\text{nm}$ a pro tloušťku platí vzorec $w = x\lambda/2y$. Rozměry proměřovaných vzorků jsou

	w	a	l
polovodič	0.78 mm	2.93 mm	3.0 mm
kov	73.22 nm	5.05 mm	10.80 mm

V následujících tabulkách jsou uvedeny vypočtené hodnoty pro kov i germaniový polovodič. V posledním sloupci je uvedena hodnota, kterou můžeme diskutovat pro podmínku splnění slabého magnetického pole.

Tabulka 1: Tabulka výsledků pro polovodič

B[mT]	I[mA]	U_σ [V]	U_H [V]	ρ [Ωm]	R_H [m^3C^{-1}]	μ_H	n [m^{-3}]	
300	0.228	0.03576	2.9322e-03	0.1236	0.03343	0.9349	1.8668e+20	0.28
300	0.410	0.03576	5.2440e-03	0.0687	0.03325	0.9298	1.8771e+20	0.27
300	0.810	0.03576	1.0360e-02	0.0347	0.03325	0.9297	1.8772e+20	0.28
300	1.612	0.03576	2.0590e-02	0.0174	0.03321	0.9285	1.8796e+20	0.28
300	3.21	0.03576	4.1114e-02	0.0878	0.03330	0.9311	1.8745e+20	0.28
200	0.81	0.03576	5.2205e-03	0.0347	0.02513	0.7028	2.4834e+20	0.14
520	0.81	0.03576	1.5850e-02	0.0347	0.02935	0.8206	2.1267e+20	0.43
800	0.81	0.03576	2.1681e-02	0.0347	0.02609	0.7296	2.3919e+20	0.58
1100	0.81	0.03576	2.7595e-02	0.3479	0.02415	0.6754	2.5840e+20	0.74

Tabulka 2: Tabulka výsledků pro kov

B[mT]	I[mA]	U_σ [V]	U_H [V]	ρ [Ωm]	R_H [m^3C^{-1}]	μ_H	n [m^{-3}]	
1070	55.6	0.03156	-1.2550e-08	6.9710e-09	-5.1488e-15	-1.6314e-13	-1.2124e+33	-1.7456e-13
1070	81.0	0.03156	-1.8600e-09	4.7850e-09	1.3376e-15	-1.6284e-13	-1.2265e+33	-1.7351e-13
1070	109.2	0.03156	-2.4175e-08	3.5493e-09	-5.0498e-15	-1.6001e-13	-1.2361e+33	-1.7121e-13
1250	81.0	0.03156	-2.1050e-08	4.7850e-09	-5.0743e-15	-1.6078e-13	-1.2302e+33	-2.0098e-13
1500	81.0	0.03156	-2.1600e-08	4.7850e-09	-4.3391e-15	-1.3749e-13	-1.4386e+33	-2.0623e-13
800	81.0	0.31560	-8.8000e-09	4.7850e-09	-3.3146e-15	-1.0502e-13	-1.8833e+33	-8.4019e-14

Výsledné hodnoty jsou následující:

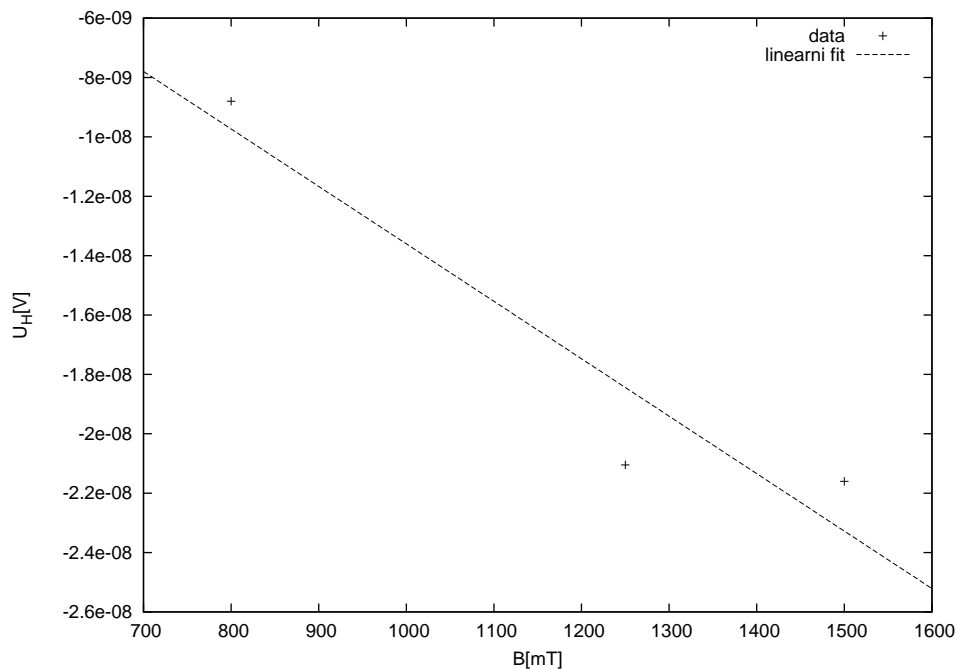
$$R_H(\text{kov}) = (-4.32 \pm 1.31) \cdot 10^{-15} \text{ m}^3\text{C}^{-1}$$

$$R_H(\text{polovodič}) = (3.01 \pm 0.13) \cdot 10^{-2} \text{ m}^3\text{C}^{-1}$$

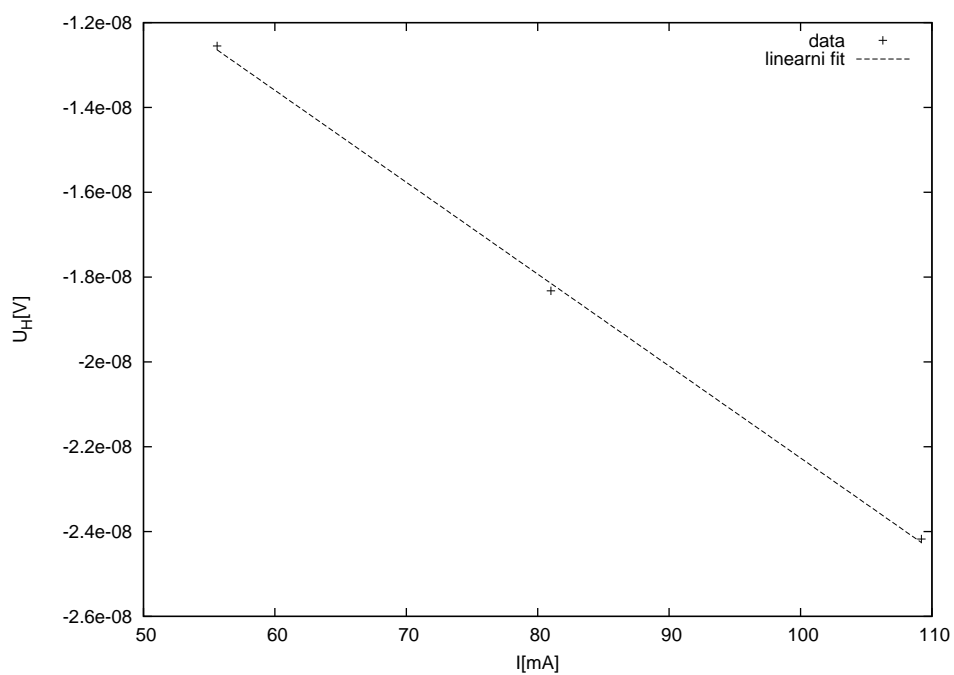
$$\sigma(\text{kov}) = (2.52 \pm 1.38) \cdot 10^8 (\Omega\text{m})^{-1}$$

$$\sigma(\text{polovodič}) = (37.49 \pm 13.24) (\Omega\text{m})^{-1}$$

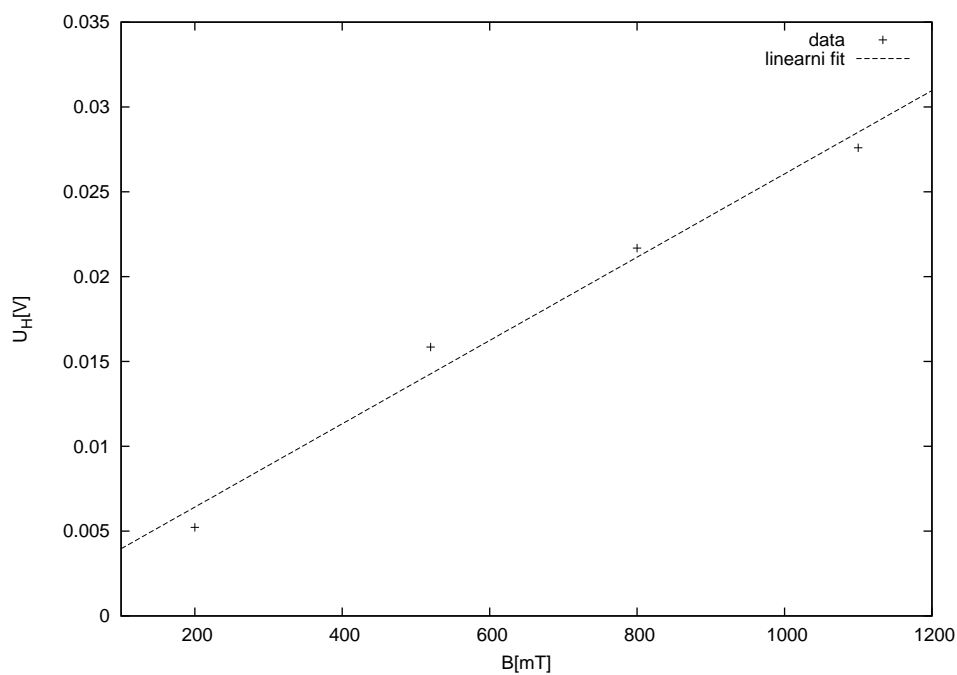
Následně jsem prokládala lineární fit pro závislost Hallova napětí jednak na proudu (napětí) při konstantním napětí (proudu). Z toho byla dále určena Hallova konstanta. Hallova konstanta byla určena jako průměr z obou fitů pro kov i polovodič. Níže uvádím jednotlivé grafy.



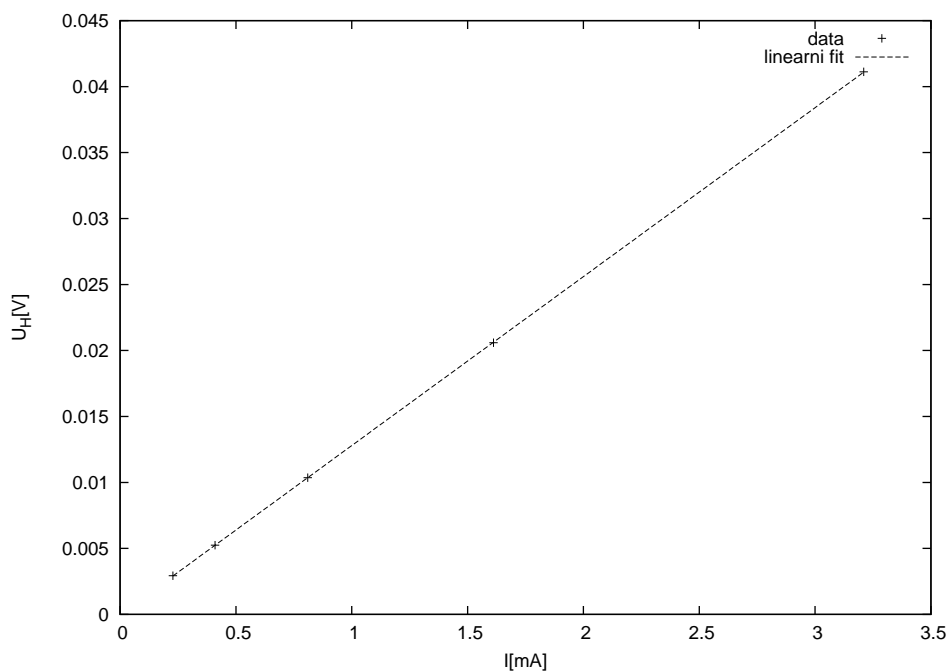
Obrázek 1: Závislost Hallova napětí na magnetické indukci při konstantním I



Obrázek 2: Závislost Hallova napětí na proudu při konstantním B



Obrázek 3: Závislost Hallova napětí na magnetické indukci při konstantním I



Obrázek 4: Závislost Hallova napětí na proudu při konstantním B

Pro kov jsou výsledky následující: pro konstantní B (1070 mT) vychází $R_H = -2.17 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3\text{C}^{-1}$, pro konstantní I (81 mA) pak $R_H = -1.93 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3\text{C}^{-1}$. Zprůměrováním pak dostaneme hodnotu $R_H = -2.05 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3\text{C}^{-1}$.

Pro polovodič jsou výsledky: pro konstantní B (300 mT) je $R_H = 0.012 \text{ m}^3\text{C}^{-1}$, pro konstantní I (0.81 mA) pak $R_H = 0.024 \text{ m}^3\text{C}^{-1}$. Zprůměrováním se dostaneme k hodnotě $R_H = 0.018 \text{ m}^3\text{C}^{-1}$.

Dále bylo třeba zjistit koncentraci nositelů náboje, k čemuž posloužil vztah uvedený na začátku protokolu. Pro kov je použit přímo zmíněný vztah, pro polovodič je situace složitější, jak je uvedeno v návodu k praktiku, $r_H = 3\pi/8$ pro polovodič. Pro kov je koncentrace $p = 2.1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, pro polovodič pak $n = 3 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}$.

Závěr

Dílní výsledky jsou uvedeny u jednotlivých úkolů. Správně bylo určeno, že v kovu jsou nositelé náboje záporní, kdežto v polovodiči kladní (mají záporný, respektive kladný náboj). Při určování koncentrací nám vyšlo, že nositelů náboje je v kovu o cca osm řádů víc než v polovodiči. Je tedy patrné, že v polovodiči k vodivosti přispívá jen malý podíl částic.

Při ověřování podmínky slabého magnetického pole jsme použili vztah pro pohyblivost nositelů. Podmínka byla zjevně dobře splněna pro kov, pro germanium byla situace poněkud horší, takže i výsledky jsou méně kvalitní.