

Laboratorium Podstaw Fizyki

Ćwiczenie nr 57C

Temat ćwiczenia: Badanie efektu Halla

Nazwisko i imię prowadzącego kurs: dr inż. Hajdusianek Anna

Nazwisko i imię, nr indeksu	Wołoszański Jakub Szymańska Emilia
Termin zajęć	Środa, 7:30-9:00
Kod grupy	E01-01v
Data wykonania ćwiczenia	06.11.2019
Ocena końcowa	

Zatwierdzam wyniki pomiarów

Data i podpis prowadzącego zajęcia.....

Adnotacje dotyczące wymaganych poprawek oraz daty otrzymania poprawionego sprawozdania

1. Wstęp

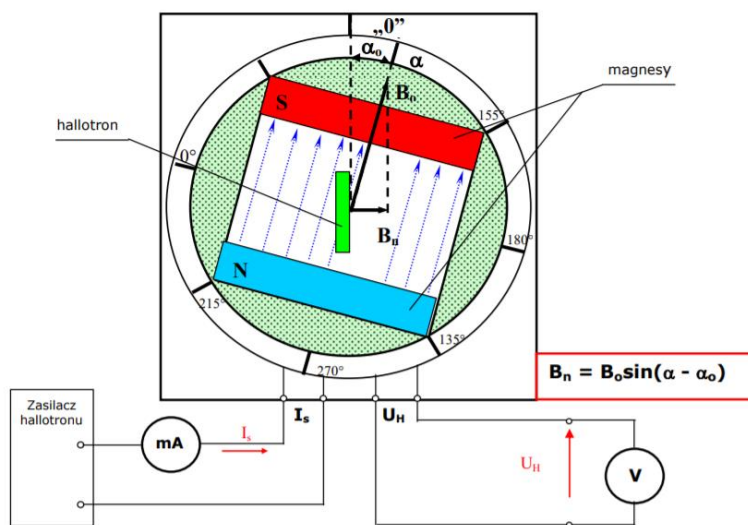
1.1. Cel ćwiczenia

- Zmierzenie charakterystyk statycznych hallotronu:
 $U_H = f(\alpha)$ i $U_H = f(\beta)$ – wersja podstawowa ćwiczenia,
 $U_H = f(I_S)$ – wersja dodatkowa ćwiczenia,
- Wyznaczenie czułości polowej $\gamma_B = \Delta U_H / \Delta B$ i czułości prądowej $\gamma_I = \Delta U_H / \Delta I$ hallotronu,
- Wyznaczenie koncentracji n swobodnych nośników ładunku,
- Wyznaczenie maksymalnej czułości kątowej $S_\alpha = \Delta U_H / \Delta \alpha$ hallotronu,

1.2. Wykaz przyrządów

- Hallotron umieszczony w polu magnetycznym wytworzonym przez magnesy trwałe. Magnesy zamocowane są tak, by możliwy był pomiar zmian orientacji pola magnetycznego względem płaszczyzny hallotronu,
- Zasilacz hallotronu,
- Miliamperomierz do pomiaru natężenia prądu sterującego I_S ,
- Woltomierz do pomiaru napięcia Halla U_H : miernik M-4660A,
- Przewody elektryczne.

1.3. Schemat układu pomiarowego



2. Wyniki i ich opracowanie

Na początku ustalamy wartość natężenia prądu sterującego $I_S = 5$ [mA]. Obracamy magnesy w położenie, przy którym napięcie Halla $U_H = 0$ V. Wtedy kierunek pola magnetycznego jest równoległy do powierzchni hallotronu. W naszym przypadku wartość najbliższa zero jest równa $U_H = -0,09$ dla $\alpha = 5^\circ$, jednak przy pomiarach zauważamy, że następuje przejście z ujemnych na dodatnie wartości dla $\alpha_0 = 190^\circ$. Zgodnie z instrukcją miernika, niedokładność pomiaru napięcia dla naszego zakresu (200mV) to $\Delta_p x = \pm(0,05\%rdg + 3dgt)$, gdzie $dgt = 10 \mu V = 0,01$ mV.

Niepewność typu B amperomierza dla zakresu 7,5 mA wynosi:

$$u_B(I_S) = klasa \cdot \frac{zakres}{100\sqrt{3}} = \frac{5}{10} \cdot \frac{7,5}{100\sqrt{3}} = 0,02165... \approx 0,022 [mA].$$

Niepewność standardowa typu B dla pomiaru kąta po przeliczeniu na radiany wynosi:

$$u_B(\alpha) = \sqrt{\frac{(\Delta_p \alpha)^2}{3}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{2\pi}{360} \cdot 5\right)^2}{3}} = 0,050383 \approx 0,051 [rad]$$

Dokonujemy pomiarów napięcia Halla dla kątów α od 5° do 355° co 10° . Dokonujemy od razu zamiany stopni na radiany i zaokrąglenia.

Lp.	$I_S [mA]$	$u(I_S) [mA]$	$\alpha [^\circ]$	$\alpha [rad]$	$u(\alpha) [rad]$	$U_H [mV]$	$u(U_H) [mV]$	$B_N [T]$	$u(B_N) [T]$
1	5,000	0,022	5	0,087	0,051	-0,090	0,018	0,044	0,036
2			15	0,262		-8,270	0,015	-0,044	0,036
3			25	0,436		-16,410	0,012	-0,130	0,037
4			35	0,611		-25,160	0,011	-0,211	0,049
5			45	0,785		-32,8100	0,0079	-0,287	0,041
6			55	0,960		-39,4100	0,0060	-0,354	0,044
7			65	1,134		-44,7900	0,0044	-0,410	0,046
8			75	1,309		-48,7800	0,0033	-0,453	0,048
9			85	1,484		-51,4400	0,0025	-0,483	0,050
10			95	1,658		-52,7800	0,0021	-0,498	0,050
11			105	1,833		-52,5900	0,0022	-0,498	0,050
12			115	2,007		-50,9400	0,0027	-0,483	0,050
13			125	2,182		-48,0000	0,0035	-0,453	0,048
14			135	2,356		-43,4600	0,0048	-0,410	0,046
15			145	2,531		-37,6700	0,0065	-0,354	0,044
16			155	2,705		-30,8300	0,0085	-0,287	0,041
17			165	2,880		-22,910	0,011	-0,211	0,039
18			175	3,054		-13,990	0,014	-0,129	0,037
19			185	3,229		-4,830	0,016	-0,044	0,036
20			195	3,403		3,780	0,019	0,044	0,036
21			205	3,578		12,550	0,021	0,129	0,037
22			215	3,752		22,020	0,024	0,211	0,039
23			225	3,927		28,490	0,026	0,287	0,041
24			235	4,102		34,830	0,028	0,354	0,044
25			245	4,276		40,150	0,029	0,410	0,046
26			255	4,451		44,030	0,031	0,453	0,048
27			265	4,625		46,530	0,031	0,483	0,050
28			275	4,800		47,690	0,032	0,498	0,050
29			285	4,974		47,410	0,032	0,498	0,050
30			295	5,149		45,760	0,031	0,483	0,050
31			305	5,323		42,560	0,030	0,453	0,048
32			315	5,498		38,160	0,029	0,410	0,046
33			325	5,672		32,530	0,027	0,353	0,044
34			335	5,847		25,690	0,025	0,287	0,041
35			345	6,021		18,180	0,023	0,1211	0,039
36			355	6,196		9,550	0,021	0,129	0,037

Do przykładowego obliczenia niepewności pomiarowej pomiaru napięcia Halla podstawiam wartości pomiaru nr 25 do wzoru:

$$u(U_{H25}) = \frac{0,0005 \cdot 40,15 + 3 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} = 0,02891 \dots \approx 0,029 \text{ [mV]}$$

Wartość indukcji pola magnetycznego wyznaczamy ze wzoru $B_n = B_0 \sin(\alpha - \alpha_0) [T]$, gdzie $B_0 = (0,50 \pm 0,05) [T]$.

Przykładowo dla pomiaru nr 12 wykonujemy następujące obliczenia:

$$B_{12} = 0,5 \cdot \sin(115 - 190) = -0,48296 \dots [T].$$

Wzór na niepewność pomiarową indukcji pola magnetycznego jest następujący:

$$u_c(B_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial B_n}{\partial B_0} \cdot u(B_0)\right)^2 + \left(\frac{\partial B_n}{\partial \alpha} \cdot u(\alpha)\right)^2 + \left(\frac{\partial B_n}{\partial \alpha_0} \cdot u(\alpha_0)\right)^2}.$$

Obliczamy pochodne

$$\frac{\partial B_n}{\partial B_0} = \frac{\partial B_0 \sin(\alpha - \alpha_0)}{\partial B_0} = \sin(\alpha - \alpha_0)$$

$$\frac{\partial B_n}{\partial \alpha} = \frac{\partial B_0 \sin(\alpha - \alpha_0)}{\partial \alpha} = B_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)$$

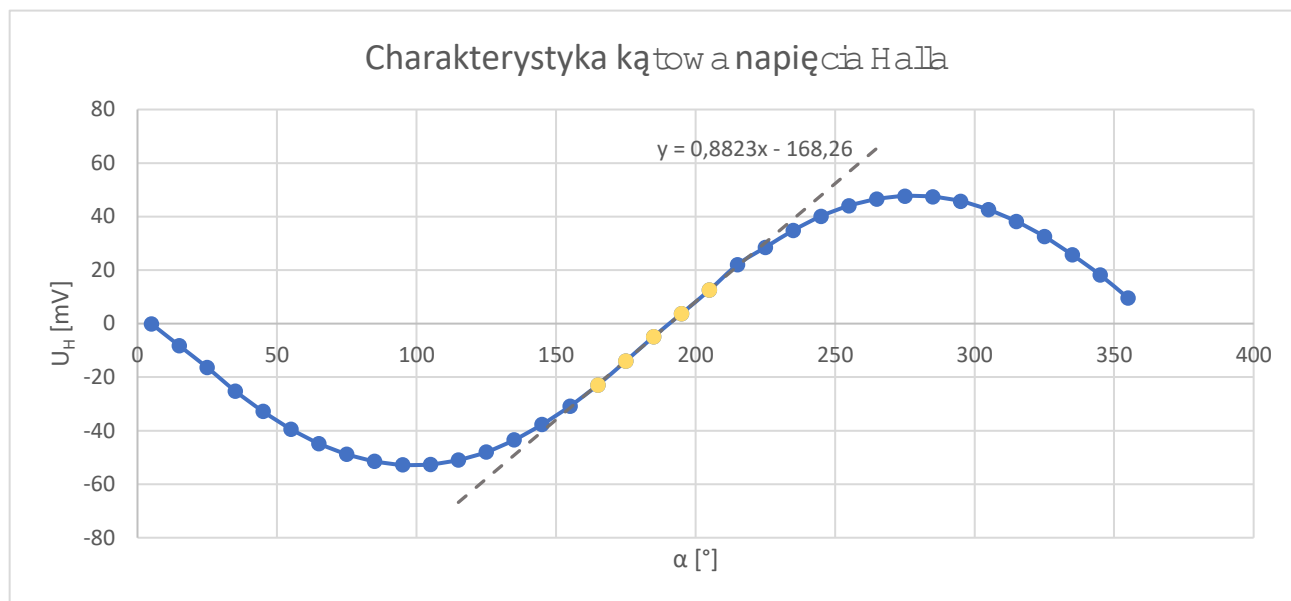
$$\frac{\partial B_n}{\partial \alpha_0} = \frac{\partial B_0 \sin(\alpha - \alpha_0)}{\partial \alpha_0} = -B_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)$$

Podstawiamy pochodne do równania

$$\begin{aligned} u_c(B_{12}) &= \sqrt{\left(\sin(\alpha - \alpha_0) \cdot u(B_0)\right)^2 + \left(B_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) \cdot u(\alpha)\right)^2 + \left(-B_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) \cdot u(\alpha_0)\right)^2} = \\ &= \sqrt{(\sin(115 - 190) \cdot 0,05)^2 + (0,5 \cdot \cos(115 - 190) \cdot 0,050383)^2 + (-0,5 \cdot \cos(115 - 190) \cdot 0,050383)^2} = \\ &= \sqrt{(-0,049809)^2 + (-0,002195)^2 + (0,0021955)^2} = 0,0499064 \approx 0,050 [T] \end{aligned}$$

Zaokrąglamy do dwóch cyfr znaczących w górę niepewności typu C, a następnie zaokrąglamy odpowiednio wyniki obliczeń B_n .

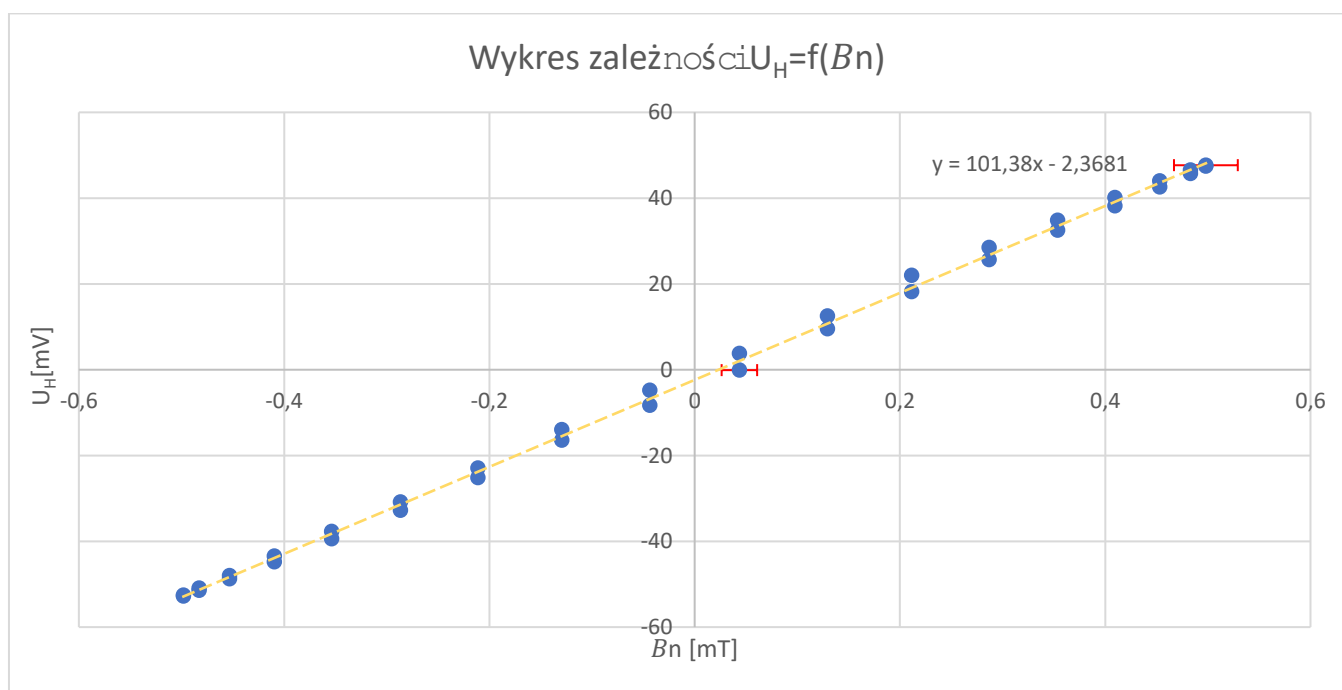
Na podstawie wyników sporządzamy wykres charakterystyki kątowej napięcia Halla wraz z zaznaczonym obszarem najszybszych zmian U_H (żółte punkty).



Maksymalną czułość kątową S_α wyznaczamy na podstawie najdłuższego, niemalże prostoliniowego fragmentu wykresu. Tutaj jest to fragment od $\alpha = 160^\circ$ do 210° . Z wykresu odczytujemy i z wartości niedokładności obliczonych dzięki regresji liniowej mamy:

$$S_\alpha = (0,8823 \pm 0,0080) \left[\frac{V}{^\circ} \right]$$

Z wykresu odczytujemy, że $\alpha_0 \approx 190^\circ$.



Dla wykresu $y=ax+b$ będącego prostą najlepszego dopasowania dla punktów z charakterystyki $U_H = f(B_n)$ za pomocą funkcji regresji liniowej otrzymujemy współczynniki $a = (-101,38 \pm 0,58) \left[\frac{V}{T} \right]$ oraz $b = (-2,37 \pm 0,21) [mT]$. Współczynnik korelacji wynosi $R_K = 0,9989 [1]$.

Czułość polową na podstawie wyników w tabeli obliczamy ze wzoru:

$$\gamma_B = \frac{U_h}{I_s B_n}$$

Niepewność tej czułości mamy daną następującym wzorem:

$$u_c(\gamma_B) = \sqrt{\left(\frac{1}{I_B} \cdot u(U)\right)^2 + \left(\frac{-U}{I_B^2} \cdot u(B)\right)^2 + \left(\frac{-U}{I_B^2} \cdot u(I)\right)^2}$$

Wówczas dla przykładowego przypadku (pomiar nr 26):

$$\gamma_B = \frac{0,044030}{0,005 \cdot 0,453} = 19,4392935 \dots \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$$

$$\begin{aligned} u_c(\gamma_B) &= \sqrt{\left(\frac{1}{0,005 \cdot 0,453} \cdot 0,000031\right)^2 + \left(\frac{-0,044030}{0,005 \cdot 0,453^2} \cdot 0,048\right)^2 + \left(\frac{-0,044030}{0,005^2 \cdot 0,453} \cdot 0,000022\right)^2} \\ &= 2,0616 \dots \approx 2,1 \left[\frac{V}{A \cdot T} \right] \end{aligned}$$

Ostatecznie $\gamma_{B1} = (19,4 \pm 2,1) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$.

Czułość polową na podstawie linii trendu obliczamy w następujący sposób:

$$a = \gamma I_s \quad \rightarrow \quad \gamma = \frac{a}{I_s}$$

$$u(\gamma) = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial I} \cdot u(I)\right)^2}$$

Wówczas $\gamma_{B2} = (20,3 \pm 1,8) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$.

Średnia z tych dwóch wartości wynosi $\gamma_{Bsr} (19,9 \pm 2,0) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$.

Koncentracja swobodnych nośników ładunku to:

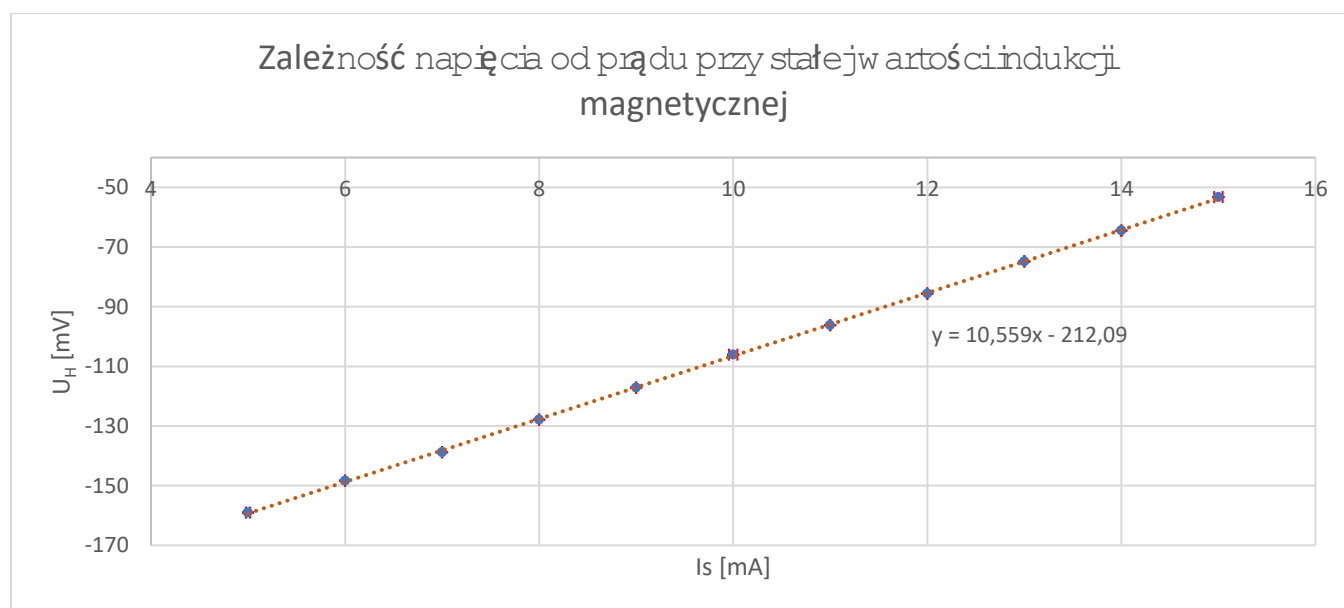
$$n = \frac{1}{e \gamma d}$$

$$u_c(n) = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{e \gamma d^2}\right)^2 + \left(\frac{u(\gamma)}{e d \gamma^2}\right)^2}$$

Wielkość e przyjmujemy jako stałą, a do obliczeń podstawimy wartość γ_{Bsr} . W takim przypadku koncentracja nośników wynosi $n = (1,57 \pm 0,17) \cdot 10^{23} \left[\frac{1}{m^3} \right]$.

W drugiej części zadania ustawiamy kąt na wartość 95° i przy stałej wartości indukcji magnetycznej pola będziemy mierzyć napięcie Halla w zależności od prądu, który przepuścimy przez płytkę. Obliczenia wykonujemy analogicznie do wykonanych już wcześniej. W tym przypadku $B_n = (0,498 \pm 0,050) [T]$. Pomiary od 5 do 7 V dokonywaliśmy na zakresie 7,5 mA, później działaliśmy na zakresie 15 mA. Tworzymy wykres zależności $U_H = f(I_s)$. Z funkcji regresji liniowej otrzymujemy współczynniki prostej $y = ax + b$ będącej najlepszym dopasowaniem liniowym charakterystyki: $a = (10,559 \pm 0,036) \left[\frac{V}{A} \right]$ oraz $b = (-212,09 \pm 0,38) [mV]$. Współczynnik korelacji wynosi $R_K = 0,9999 [1]$.

Lp.	I _s [mA]	u(I _s) [mA]	α [rad]	u(α) [rad]	U _H [mV]	u(U _H) [mV]	B _N [T]	u(B _N) [T]
1	5,000	0,022	1,658	0,051	-159,010	0,029	-0,498	0,050
2	6,000				-148,310	0,026		
3	7,000				-138,790	0,023		
4	8,000	0,044			-127,860	0,020		
5	9,000				-117,120	0,017		
6	10,000				-106,080	0,014		
7	11,000				-96,200	0,011		
8	12,000				-85,600	0,0074		
9	13,000				-74,820	0,0043		
10	14,000				-64,480	0,0013		
11	15,000				-53,250	0,0020		



Przy obliczeniach dla pomiaru środkowego mamy $\gamma_{I1} = (21,3 \pm 2,2) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$, a ze wzoru drugiego (wykorzystującego współczynnik z regresji liniowej) otrzymujemy $\gamma_{I2} = (21,2 \pm 2,2) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$. Dla $\gamma_{I\text{śr}} = (21,25 \pm 2,2) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$ wynikiem obliczeń dotyczących koncentracji nośników jest $n = (1,47 \pm 0,15) \cdot 10^{23} \left[\frac{1}{m^3} \right]$.

3. Wnioski

Głównym celem ćwiczenia było wyznaczenie maksymalnej czułości kątowej. W naszym przypadku wyniosła ona $S_\alpha = (0,8823 \pm 0,0080) \left[\frac{V}{^\circ} \right]$. Dla wybranych przez nas pomiarów obliczyliśmy czułość prądową i czułość polową hallotronu; w naszym przypadku wyszły podobne wartości ze względu na dobór punktów, względem których liczyliśmy te czułości: $\gamma_I = (21,25 \pm 2,2) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$ i $\gamma_B = (19,9 \pm 2,0) \left[\frac{V}{A \cdot T} \right]$. Niepewności pomiarowe mają stosunkowo wysoką wartość, co można by zniwelować za pomocą doboru dokładniejszych przyrządów pomiarowych, wykonywania pomiarów z większą częstotliwością (np. co 5° zamiast 10° albo w drugiej części ćwiczenia co 0,5 mA). W obu częściach ćwiczenia koncentracja nośników wyszła nam rzędu $10^{23} \left[\frac{1}{m^3} \right]$, co pozwala wywnioskować, że hallotron jest wykonany z półprzewodnika. Do określenia, z jakim materiałem mamy do czynienia, oszacowaliśmy wartość stałej Halla ze wzoru $R_H = \frac{1}{ne} \left[\frac{m^3}{C} \right]$. Jest ona rzędu ok. $0,4 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^3}{C} \right]$ i najbliższa jej wartość odpowiada stałej Halla cynku. Wiemy jednak, że powinien wyjść nam materiał półprzewodnikowy, więc możemy zakładać, że jest to element wykonany z półprzewodnika domieszkowanego cynkiem. Mogły jednak wystąpić błędy, które wpływają na błędne wyciągnięcie wniosków na temat badanego materiału. Niepoprawny wynik może wynikać z niedokładności odczytu kąta α_0 (niedokładności samego przyrządu), nieprzewidzianych zakłóceń pola elektrycznego lub magnetycznego, niepoprawnego odczytania napięcia lub prądu płynącego przez płytkę.