

Badanie własności hallotronu, wyznaczenie stałej Halla

(E2)

1. Wymagane zagadnienia

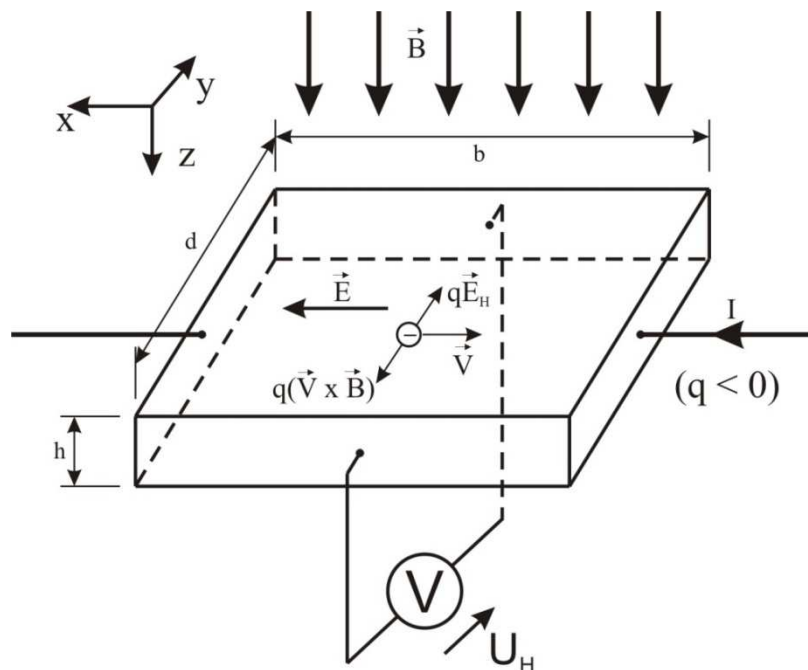
- ruch ładunku w polu magnetycznym, siła Lorentza, pole elektryczne
- omówić zjawisko Halla, wyprowadzić wzór na napięcie Halla
- przewodnictwo właściwe, ruchliwość nośników
- zastosowanie Hallotronu

2. Cel ćwiczenia

Wyznaczanie charakterystyk statycznych hallotronu półprzewodnikowego, stałej Halla oraz koncentracji nośników.

3. Wstęp

Zjawisko Halla polega na powstawaniu poprzecznej różnicy potencjałów na płytce półprzewodnika lub metalu, przez którą płynie prąd (I_x), jeżeli jest ona umieszczona w polu magnetycznym o indukcji \vec{B} skierowanym prostopadłe do kierunku przepływu tego prądu (patrz Rysunek 1).



Rysunek 1. Zasada działania hallotronu

Na nośniki prądu poruszające się w hallotronie działa siła Lorentza

$$\vec{F}_L = q(\vec{V} \times \vec{B})$$

która odchyła je w kierunku prostopadłym zarówno do kierunku wektora prędkości \vec{V} , jak i do kierunku wektora indukcji magnetycznej \vec{B} .

Wartość siły Lorentza wynosi:

$$F_L = qVB$$

Pod wpływem tej siły ładunki elektryczne doznają poprzecznego (zgodnego z kierunkiem \hat{y}) przesunięcia, wywołując różnicę potencjałów U_H (napięcie Halla). Napięcie Halla powoduje powstanie pola elektrycznego $E_H = \frac{U_H}{d}$. Siła działająca na nośniki prądu ze strony tego pola elektrycznego wynosi:

$$F_E = qE_H = q \frac{U_H}{d}$$

Zwroty sił \vec{F}_L oraz \vec{F}_E są przeciwne, więc przemieszczanie się ładunków elektrycznych trwa dopóki siły te nie zrównoważą się, czyli:

$$q \frac{U_H}{d} = qVB, \text{ stąd}$$

$$U_H = VBd.$$

Średnia prędkość ruchu V nośników o ładunku q może być powiązana z gęstością prądu $j = \frac{I}{ah}$ i koncentracją nośników n następującą zależnością:

$$\vec{j} = \vec{V}nq$$

Ostatecznie, wartość napięcia Halla wynosi

$$U_H = R_H \frac{IB}{h}$$

gdzie współczynnik:

$$R_H = \frac{1}{nq}$$

nazywamy stałą Halla. Pomiar wartości napięcia Halla pozwala wyznaczyć współczynnik Halla.

W półprzewodniku istnieją dwa rodzaje nośników ładunku: elektrony i dziury. W przypadku gdy nośnikami prądu są dodatnie dziury, we wzorze $\vec{F}_L = q(\vec{V} \times \vec{B})$, zmianie ulegają znaki ładunku i prędkości poruszających się nośników (w polu elektrycznym \vec{E} poruszają się one w kierunku zgodnym z kierunkiem pola). Zatem niezależnie od znaku ładunków nośniki odchylane są do tej samej powierzchni kryształu, ładując ją dodatnio lub ujemnie zależnie od znaku ładunków, nośników prądu. A więc odchylenie elektronów powoduje zmniejszenie napięcia Halla powstałego w wyniku odchylenia dziur.

Zgodnie z prawem Ohma gęstość przepływającego prądu jest wprost proporcjonalna do natężenia przyłożonego pola elektrycznego:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \text{ gdzie:}$$

σ - jest przewodnictwem właściwym, stąd:

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{nq^2\tau}{m} = nq\mu$$

μ – ruchliwość nośników, m – jest masą nośników, τ – jest średnim czasem pomiędzy zderzeniami poruszającego się nośnika.

Przewodnictwo właściwe półprzewodnika jest funkcją dwóch wielkości: koncentracji nośników n oraz ruchliwości μ . Wielkość przewodnictwa właściwego zależy przede wszystkim od koncentracji nośników, gdyż ruchliwość nośników dla różnych substancji różni się nieznacznie. Zarówno koncentracja jak i ruchliwość są funkcjami temperatury.

4. Wykonanie pomiarów

Omawiane zjawisko nadaje się do pomiaru koncentracji nośników ładunku tylko w półprzewodnikach domieszkowanych, w których koncentracja elektronów jest dużo większa od koncentracji dziur ($n \gg p$) lub odwrotnie ($p \gg n$). Doświadczenie pozwala rozróżnić, z którym z tych przypadków mamy do czynienia, gdyż znak napięcia Halla zależy od rodzaju przewodnictwa płytki półprzewodnikowej. Jeżeli przewodnictwo jest elektronowe ($n \gg p$) to U_H jest ujemne. Jeżeli przewodnictwo jest dziurowe ($p \gg n$) to U_H jest dodatnie.

Próbka do pomiaru napięcia Halla powinna być specjalnie przygotowana, w celu wyeliminowania efektów utrudniających pomiar. Tymi efektami są:

- a) zjawisko Ettingshausena,
- b) zjawisko Nernsta,
- c) zjawisko Righiego-Leducu,
- d) napięcie asymetrii.

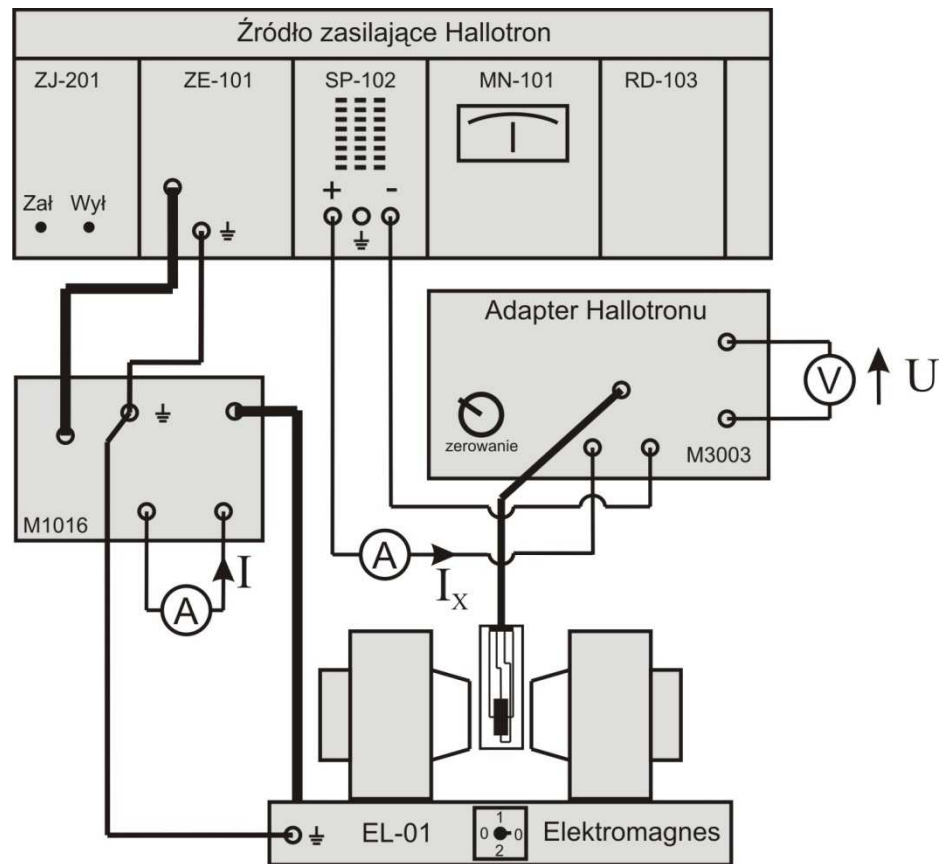
Mierzone napięcie U jest różnicą potencjałów pochodzącą nie tylko od efektu Halla ale również od innych efektów takich jak: własności przewodzące kontaktów, występowanie gradientu temperatury wzdłuż i w poprzek próbki, czyli:

$$U = U_H + U_T$$

gdzie: U_T jest napięciem efektów towarzyszącym. Aby wyeliminować błędy wykonuje się cztery niezależne pomiary napięć: $U_1(+I_X, +B)$, $U_2(-I_X, +B)$, $U_3(-I_X, -B)$, $U_4(+I_X, -B)$ dla różnych kierunków przepływu prądu I_X oraz dla przeciwnych zwrotów wektora indukcji magnetycznej \vec{B} . Wypadkowe napięcie pozwala wyznaczyć napięcie Halla:

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4}$$

4.1. Schemat układu pomiarowego



Rysunek 2. Schemat układu pomiarowego do badania zjawiska Halla

4.2. Przygotowanie stanowiska do pomiarów

- Odłączyć wszystkie urządzenia od zasilania
- Zmontować układ pomiarowy przedstawiony na rysunku powyżej.
- Dla miliamperomierza prądu I_X ustawić zakres pomiarowy na 75 mA
- Dla miliamperomierza prądu I ustawić zakres pomiarowy na 750 mA
- Dla woltomierza (U_H) ustawić zakresy pomiarowe na 10 V
- Ustawić pokrętkę panelu ZE-101 „Zasilacz elektromagnesu” w lewym skrajnym położeniu
- Ustawić wartość prądu panelu SP-102 „Stabilizator prądu” na wartość zero
- Połączyć zaciski zerujące paneli ZE-101 „Zasilacz elektromagnesu”, M-1016 „Adapter amperomierza” oraz EL-01 „Elektromagnes” przewodami z końcówkami widelkowymi

Wartość prądu panelu SP-102 jest zawsze większa od wartości ustawionej o 3 mA.

4.3. Parametry badanej próbki

Wymiary geometryczne:

- długość $b = 5 \text{ mm}$
- szerokość $d = 3 \text{ mm}$
- wysokość $h = 0,5 \text{ mm}$

4.4. Badania charakterystyki hallotronu od natężenia prądu I_x płynącego przez próbkę umieszczoną w stałym polu magnetycznym o indukcji B .

Pomiar należy wykonać dla następujących wartości indukcji magnetycznej (B): **300 mT, 500 mT**. Wartość prądu (I) w uzwojeniu elektromagnesu jaką należy ustawić na zasilaczu ZE-101 aby uzyskać żadaną wartość indukcji pola magnetycznego (B), należy odczytać z wykresu wzorcowego $B = f(I)$, dołączonego do opisu ćwiczenia.

Napięcie U należy zapisywać łącznie ze znakiem.

- Po uzyskaniu zgody osoby prowadzącej zajęcia podłączyć źródło zasilające hallotron do sieci elektrycznej oraz włączyć je przez wciśnięcie przełącznika „ZAŁ” panelu ZJ-210 „Zasilacz sieciowy”.
- Przekręcając powoli w prawo pokrętko panelu ZE-101 ustalić wartość prądu elektromagnesu (I) odpowiadający żądanej wartości indukcji magnetycznej B .
- Zwiększając wartość prądu I_x płynącego przez próbkę (panelu SP-102) od około 3 mA do 15 mA (z krokiem 1 mA) mierzyć napięcia Halla. Rzeczywistą wartości I_x odczytywać z miliamperomierza.
- Po skończonym pomiarze, ustawić prąd (I_x) panelu SP-102 na wartość zero, następnie ustawić kolejną wartość prądu elektromagnesu (I) odpowiadającą żądanej wartości indukcji magnetycznej (B) i powtórzyć czynności z punktów (c).
- Po wykonaniu pomiarów ustawić pokrętko panelu ZE-101 w lewym skrajnym położeniu oraz ustawić wartość prądu panelu SP-102 na wartość zero.
- Wyniki zebrać w tabeli.

| Pomiar zależności $U = f(I_x)_{B=\text{const}}$ | | | |
|---|--------|--------------|--------|
| B = mT | | B = mT | |
| I_x [mA] | U [mV] | I_x [mA] | U [mV] |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

4.5. Badania charakterystyki hallotronu od indukcji magnetycznej B przy stałym natężeniu prądu I_X płynącego przez próbkę.

Pomiar należy wykonać dla wartości prądu I_X około: **6 mA**, oraz **12 mA**.

Napięcie U należy zapisywać łącznie ze znakiem.

- Ustawić wartość prądu I_X płynącego przez próbkę (panelu SP-102) na zadaną wartość.
- Zwiększając wartość prądu I panelu ZE-101 od 200 mA do 700 mA (z krokiem 50 mA) mierzyć napięcia Halla.
- Po skończonym pomiarze, ustawić pokrętko regulacji prądu (I) panelu ZE-101 w lewym skrajnym położeniu, następnie ustawić kolejną wartość prądu (I_X) i powtórzyć czynności z punktów (b).
- Po wykonaniu pomiarów ustawić pokrętko panelu ZE-101 w lewym skrajnym położeniu oraz ustawić wartość prądu panelu SP-102 na wartość zero.
- Wyniki zebrać w tabeli.

| Pomiar zależności $U = f(B)_{I_X = \text{const}}$ | | | | | |
|---|----------|----------|----------------------------|----------|----------|
| $I_X = \dots\dots\dots$ mA | | | $I_X = \dots\dots\dots$ mA | | |
| I [mA] | B [mT] | U [mV] | I [mA] | B [mT] | U [mV] |
| 200 | | | 200 | | |
| 250 | | | 250 | | |
| 300 | | | 300 | | |
| | | | | | |
| 700 | | | 700 | | |

4.6. Pomiar napięcia Halla

Pomiary należy wykonać dla następujących wartości: prądu $I_X = 9$ mA oraz indukcji magnetycznej $B = 400$ mT. Zwrócić uwagę na prawidłowe podłączenie woltomierza mierzącego napięcie Halla, dla którego znak mierzonego napięcia U_1 będzie zgodny ze znakiem nośników.

Napięcie U należy zapisywać łącznie ze znakiem.

- Pomiar napięcia $U_1(+I_X, +B)$: Prąd I_X podłączyć do Adaptera hallotronu M3003 zgodnie z Rysunek 2, pokrętko Elektromagnesu EL-01 ustawić w pozycji **1**.

- b) Pomiar napięcia $U_2(-I_X, +B)$: Prąd I_X podłączyć do Adaptera hallotronu M3003 odwrotnie niż na Rysunek 2, pokrętko Elektromagnesu EL-01 ustawić w pozycji **1**.
- c) Pomiar napięcia $U_3(-I_X, -B)$: Prąd I_X podłączyć do Adaptera hallotronu M3003 odwrotnie niż na Rysunek 2, pokrętko Elektromagnesu EL-01 ustawić w pozycji **2**.
- d) Pomiar napięcia $U_4(+I_X, -B)$: , Prąd I_X podłączyć do Adaptera hallotronu M3003 zgodnie z Rysunek 2, pokrętko Elektromagnesu EL-01 ustawić w pozycji **2**.

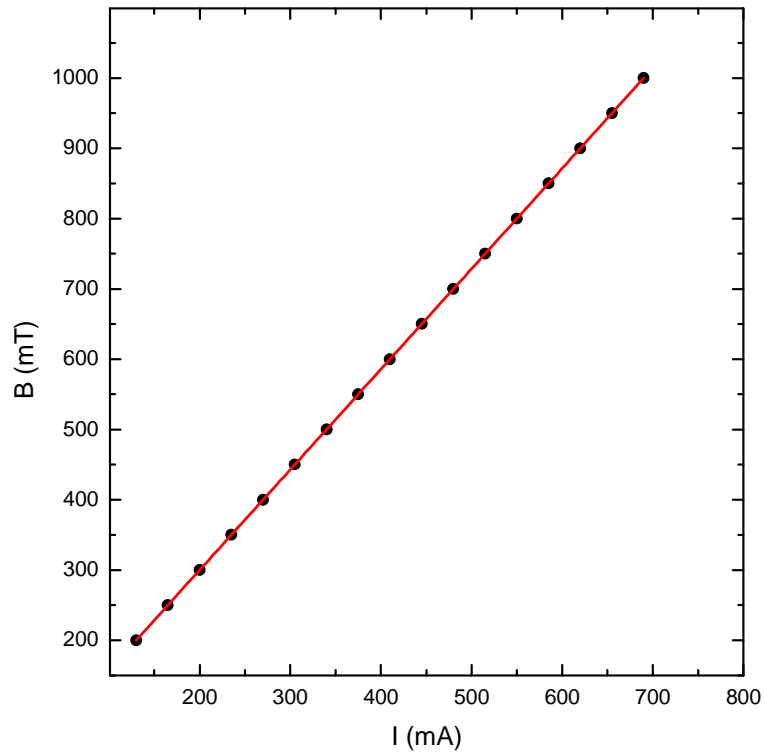
5. Opracowanie wyników pomiarów

- a) W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów wykreślić charakterystyki:
 - $U = f(I_X)_{B=\text{const}}$
 - $U = f(B)_{I_X=\text{const}}$
- b) Na podstawie pomiaru wartości napięć $U_1(+I_X, +B)$, $U_2(-I_X, +B)$, $U_3(-I_X, -B)$, $U_4(+I_X, -B)$ wyznaczyć napięcie Halla.
- c) Wyznaczyć wartość stałej Halla
- d) Błędy ocenić na podstawie znajomości klasy przyrządów

Literatura

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy Fizyki, t. 3*, PWN, Warszawa 2005
2. A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski, *Wstęp do Fizyki, Tom 2, Część 2*, PWN, Warszawa 1991
3. D. Halliday, R. Resnick, *Fizyka, t. 2*, PWN, Warszawa 1998
4. Ch. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN, Warszawa, 1999

Krzywa cechowania elektromagnesu $B=f(I)$



Krzywa cechowania elektromagnesu $B=f(d)$, $I=500\text{mA}$

