

## Ćwiczenie 35

### Badanie efektu Halla w półprzewodniku typu n

#### 35.1. Zasada ćwiczenia

W ćwiczeniu badany jest opór elektryczny i napięcie Halla w prostopadłościenną próbkę kryształu germanu w funkcji natężenia prądu, pola magnetycznego i temperatury. Na podstawie pomiarów określona zostaje przewodność właściwa, rodzaj nośników, ich ruchliwość i koncentracja.

#### 35.2. Wiadomości teoretyczne

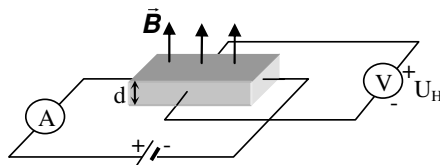
W punkcie 1 ćwiczenia badane jest zjawisko magnetooporu występujące w próbce półprzewodnikowej umieszczonej w zewnętrznym polu magnetycznym. Zjawisko magnetooporu polega na wzroście oporności próbki pod wpływem pola magnetycznego. Związane jest to ze skróceniem średniej drogi swobodnej nośników ładunku w próbce w obecności pola magnetycznego. Względna zmiana oporności próbki  $\Delta R/R_0$  umieszczonej w polu o indukcji  $B$  dana jest zależnością:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\gamma B^2}{1 + \mu^2 B^2}, \quad (35.1)$$

gdzie:  $\Delta R = R - R_0$ ;  $R$  – opór elektryczny próbki przy danej wartości pola magnetycznego,  $R_0$  – opór elektryczny próbki przy braku pola magnetycznego;  $\gamma$  – stały współczynnik,  $\mu$  – ruchliwość nośników. Można więc zauważyć, że dla małych pól magnetycznych magnetoopór rośnie proporcjonalnie do  $B^2$ , a w dużych polach jest niezależny od pola, a jedynie od ruchliwości nośników ładunku.

#### Zjawisko Halla

Efekt Halla polega na powstaniu różnicy potencjałów, zwanej napięciem Halla  $U_H$ , w płytce przewodzącej umieszczonej w polu magnetycznym. Zgodnie z rys. 35.1, jeżeli kierunek przepływu prądu o natężeniu  $I$ , jest prostopadły do kierunku pola magnetycznego  $B$ , napięcie Halla powstaje między dwoma przeciwległymi punktami próbki w kierunku prostopadłym do pola magnetycznego i kierunku przepływu prądu.



Rysunek 35.1. Mechanizm generacji napięcia Halla

Przyczyną tego zjawiska jest pojawienie się siły Lorentza  $F_L$ , powodującej odchylenie nośników ładunku  $q$  w kierunku prostopadłym do płaszczyzny utworzonej przez wektory prędkości cząstki i pola magnetycznego:

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (35.2)$$

Jeżeli nośnikami większościowymi w płycie są elektrony,  $q=-e$  gdzie  $e$  oznacza ładunek elementarny ( $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ) i wówczas zwrot wektora prędkości jest przeciwny do kierunku przepływu prądu, a siła Lorentza:

$$\vec{F}_L = -e(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (35.3)$$

Zgodnie z rys. 35.1. siła ta powoduje gromadzenie się nośników większościowych w pobliżu frontowej ścianki próbki i powstanie nierównomiernego rozkładu gęstości ładunku w próbce, czego skutkiem jest powstanie pola elektrycznego o natężeniu  $E_H$  w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu prądu i pola magnetycznego. Pole elektryczne działa na ładunki siłą  $F_e$ :

$$\vec{F}_e = q\vec{E}_H, \quad (35.4)$$

która przeciwdziała dalszemu gromadzeniu się ładunków w obrębie ścianki. W stanie równowagi siły te się równoważą, co prowadzi do równania:

$$vB = E_H. \quad (35.5)$$

Przyjmując natężenie pola:

$$E_H = \frac{U_H}{b}, \quad (35.6)$$

gdzie  $b$  jest szerokością próbki, oraz przekształcając wzór na natężenie prądu:  $I = nevS$  (gdzie  $n$  – koncentracja nośników ładunku w próbce;  $S$  – pole przekroju poprzecznego próbki,  $S=bd$ ;  $v$  – prędkość dryfu ładunków) otrzymujemy:

$$U_H = \frac{1}{ne} \frac{IB}{d} = R_H \frac{IB}{d} \quad (35.7)$$

Współczynnik  $R_H = \frac{1}{ne}$  nosi nazwę stałej Halla. Ponieważ dodatnie i ujemne

nośniki ładunku w półprzewodnikach (dziury i elektrony) poruszają się w przeciwnych kierunkach, siła Lorentza odchyła je w tym samym kierunku, powodując jednak przeciwną polaryzację napięcia Halla. Zatem znając kierunek przepływu prądu i pola magnetycznego możliwe jest określenie znaku nośników większościowych w próbce. Zależność napięcia Halla od natężenia prądu oraz indukcji pola magnetycznego badana jest w punktach 2 i 3 ćwiczenia.

Ze stałą Halla można w prosty sposób powiązać koncentrację nośników ładunku w próbce  $n$  oraz ich ruchliwość  $\mu_H$ :

$$n = \frac{1}{R_H e}, \quad (35.8)$$

$$\mu_H = R_H \sigma_0 \quad (35.9)$$

gdzie  $\sigma_0$  oznacza przewodność właściwą materiału próbki w temperaturze pokojowej. Powyższa zależność zakłada jednakową wartość prędkości wszystkich nośników, co jest słuszne w przypadku metali. W półprzewodnikach rozkład prędkości nośników ładunku opisywany jest rozkładem Maxwella. Ponadto w półprzewodnikach o mieszanym elektronowo-dziurowym typie przewodnictwa napięcie Halla i stała Halla są mniejsze niż w półprzewodnikach zawierających nośniki jednego rodzaju. Wówczas stała Halla wyraża się wzorem:

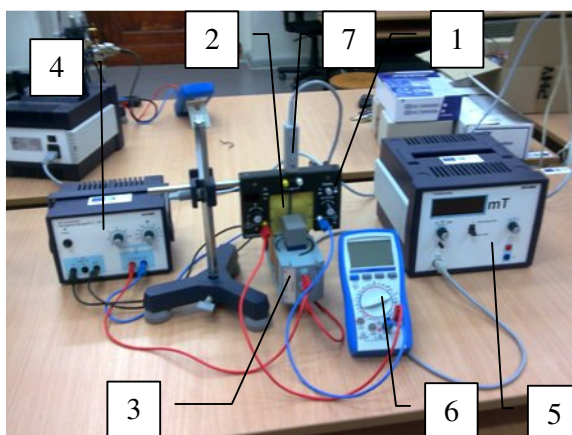
$$R_H = \frac{A}{e} \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)^2}, \quad (35.10)$$

gdzie  $A$  – stała z przedziału 0.99-1.93 zależna od mechanizmu rozpraszania nośników w kryształach. Gdy koncentracje elektronów i dziur są jednakowe ( $n=p$ ), co ma miejsce w półprzewodnikach samoistnych lub w obszarze przewodnictwa samoistnego półprzewodników domieszkowych:

$$R_H = \frac{A}{ne} \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}, \quad (35.11)$$

Widać więc, że znak stałej Halla zależy od tego, które nośniki wykazują większą ruchliwość. Ponieważ są nimi zwykle elektrony, w obszarze wyższych temperatur i przejścia w stan przewodzenia samoistnego w półprzewodnikach typu p stała Halla zmienia znak na ujemny. Zależność ta badana jest w punkcie 4 ćwiczenia.

### 35.3. Aparatura pomiarowa



1. Moduł pomiarowy;
2. Płytkę półprzewodnika typu n;
3. Elektromagnes;
4. Zasilacz;
5. Teslomierz cyfrowy;
6. Multimetr cyfrowy;
7. Sonda Hallotronowa.

Rysunek 35.2. Widok aparatury pomiarowej

### 35.4. Zadania

1. Zmierzyć zależność napięcia  $U$  w próbce od indukcji pola magnetycznego  $B$  w temperaturze pokojowej przy stałej wartości natężenia prądu.
2. Zmierzyć zależność napięcia Halla  $U_H$  od natężenia prądu  $I$  w temperaturze pokojowej przy stałej wartości pola magnetycznego.
3. Zmierzyć zależność napięcia Halla  $U_H$  od pola magnetycznego  $B$  w temperaturze pokojowej.
4. Zmierzyć zależność napięcia Halla  $U_H$  w funkcji temperatury  $T$  przy stałej wartości pola magnetycznego i natężenia prądu.

### 35.5. Przebieg pomiarów i opracowanie wyników

Sondę hallotronową należy umieścić w module pomiarowym w szczelinie elektromagnesu, zachowując szczególną ostrożność, aby nie uległa ona zniszczeniu lub deformacji. Pomiar napięcia Halla i napięcia wzdłuż próbki przeprowadza się przy użyciu uniwersalnego miernika cyfrowego, połączonego z modulem pomiarowym. Wartość natężenia prądu i temperatury próbki odczytywana jest z wyświetlacza wbudowanego w jednostkę pomiarową. Indukcja pola magnetycznego mierzona jest przy użyciu teslomierza bezpośrednio w szczelinie elektromagnesu, w której znajduje się próbka.

Ad zad. 1.

Ustawić wartość natężenia prądu równą 30mA. Podłączyć multimetr cyfrowy do gniazda wtykowego „U” na frontowej ściance modułu pomiarowego. Pomiar napięcia w próbce należy przeprowadzić w przedziale zmienności indukcji pola magnetycznego od 0 do 300mT z krokiem 30mT. Korzystając z prawa Ohma wyliczyć wartości oporu elektrycznego próbki oraz wykonać wykres zależności względnej zmiany oporu elektrycznego  $\Delta R/R_0 = f(B)$  w skali logarytmicznej. Korzystając z metody regresji liniowej znaleźć wartość wykładnika potęgi z zależności (35.1).

Ad zad. 2.

Ustawić wartość indukcji pola magnetycznego równą 250mT poprzez odpowiedni dobór napięcia i natężenia na zasilaczu. Podłączyć multimetr cyfrowy do gniazda wtykowego „U<sub>H</sub>” na frontowej ściance modułu pomiarowego. Wyświetlacz modułu powinien być ustawiony na tryb pomiaru charakterystyki prądowej (przycisk „Display” wciśnięty). Pomiar napięcia Halla należy przeprowadzić w zakresie zmian natężenia prądu od -30mA do 30mA z krokiem ok. 5mA. Z otrzymanych danych wykonać wykres zależności  $U_H = f(I)$ , na wykresie nanieść niepewności pomiarowe odpowiednich wielkości fizycznych. Korzystając z metody regresji liniowej wyznaczyć współczynnik proporcjonalności  $\alpha$ . Na podstawie wzoru (35.7) wyznaczyć wartość stałej Halla i jej błąd.

Ad zad. 3.

Ustawić wartość natężenia prądu równą 30mA. Podłączyć multimetr cyfrowy do gniazda wtykowego „ $U_H$ ” na frontowej ściance modułu pomiarowego. Moduł pomiarowy powinien być w trybie pomiaru charakterystyki prądowej. Przeprowadzić pomiar napięcia Halla w przedziale zmienności indukcji pola magnetycznego od -300mT do 300mT z krokiem 30mT (ujemne wartości pola magnetycznego odpowiadają przeciwnej biegunowości cewki). Wykonać wykres zależności  $U_H = f(B)$ . Na wykresie nanieść niepewności pomiarowe odpowiednich wielkości fizycznych Korzystając z metody regresji liniowej wyznaczyć wartość stałej Halla  $R_H$ , ruchliwości  $\mu_H$  i koncentracji  $n$  nośników ładunku oraz określić ich znak. Rozmiary próbki: grubość  $d=1mm$ , długość  $l =20mm$ , pole przekroju poprzecznego  $S=10^{-5}m^2$ .

Ad zad. 4.

Ustawić wartość natężenia prądu równą 30mA, a pola magnetycznego równą 300mT. Przełączyć moduł pomiarowy na tryb pomiaru charakterystyki temperaturowej (przycisk „Display” wyciśnięty) Pomiar rozpoczyna się z chwilą włączenia cewki ogrzewającej próbkę za pomocą włącznika „on/off” na tylnej ściance modułu pomiarowego. Pomiar napięcia Halla należy przeprowadzić w zakresie zmian temperatury od ok. 20<sup>0</sup>C (temperatura pokojowa) do 160<sup>0</sup>C co 20<sup>0</sup>C. Wykonać wykres zależności  $U_H = f(T)$ , na wykresie nanieść niepewności pomiarowe odpowiednich wielkości fizycznych.

### **35.6. Wymagane wiadomości.**

- model pasmowy ciał stałych,
- półprzewodniki, metale i izolatory w świetle teorii pasmowej,
- półprzewodniki samoistne i domieszkowe,
- efekt Halla, stała Halla, przewodność materiału, ruchliwość nośników ładunku.

### **35.7. Literatura.**

- [1] Zubek M., Kuczkowski A.: II Pracownia Fizyczna. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [2] Bobrowski Cz. : Fizyka - krótki kurs. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [3] Halliday D, Resnick R., Walker J.: Podstawy fizyki, t.5. PWN 2003.