

Ćwiczenie 13

Wyznaczanie ruchliwości i koncentracji nośników prądu w półprzewodnikach metodą efektu Halla

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem Halla, stałoprądowa metoda badania efektu Halla, wyznaczenie ruchliwości nośników prądu i ich koncentracji w półprzewodnikach.

Wymagane wiadomości teoretyczne

Zjawisko Halla, stała Halla, elektromagnes, zależności między gęstością prądu, przewodnością właściwą i ruchliwością nośników, metoda stałoprądowa pomiaru ruchliwości nośników.

Wyposażenie stanowiska

Elektromagnes, moduł pomiarowy, krzywa cechowania elektromagnesu, próbka do pomiaru.

Wykonanie ćwiczenia

1. Włączyć do sieci moduł pomiarowy.
2. Ustawić wartość U_R na module pomiarowym przy pomocy pokrętła dolnego (U_R jest spadkiem napięcia na oporniku R ; wartości U_R podaje prowadzący ćwiczenia).
3. Włączyć elektromagnes (**transformator zasilający elektromagnes musi być ustawiony w pozycji zero!**).
4. Włączyć przycisk U_H na module pomiarowym i wyzerować pokrętłem górnym wartość napięcia U_H .
5. Włączyć przycisk U_C na module pomiarowym i zmierzyć wartość napięcia U_C , które jest spadkiem napięcia na próbce.
6. Przełącznikiem ze strzałką na obudowie elektromagnesu ustawić kierunek przepływu prądu przez elektromagnes.

6. Ustawiać za pomocą pokręta transformatora zadane przez prowadzącego wartości prądu płynącego przez uzwojenia elektromagnesu i za każdym razem odczytywać na module pomiarowym wartości napięcia U_H i U_C .
7. Po dokonaniu pomiarów przy zadanym kierunku przepływu prądu przez elektromagnes, **ustawić transformator w pozycji zero** i zmienić przełącznikiem ze strzałką kierunek przepływu prądu na przeciwny.
8. Powtórzyć pomiary z punktu 7.

Opracowanie wyników

1. Wykreślić zależności $U_H = f(U_C)$; $U_H = f(U_R)$ dla danych wartości indukcji magnetycznej B_z oraz zależność $U_R = f(U_C)$.
2. Wyznaczyć nachylenia prostych będących wykresami powyższych zależności.
3. Obliczyć ruchliwość μ , stałą Halla R_H oraz przewodność właściwą σ w oparciu o zależności:

$$U_H = \mu B_z \frac{b}{l} U_C,$$

$$U_H = R_H \frac{B_z}{R h} U_R,$$

$$U_R = \sigma \frac{R b h}{l} U_C,$$

gdzie:

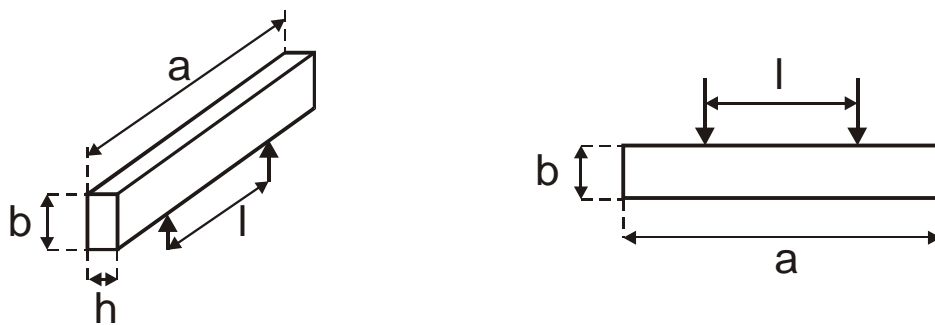
$$R = 1000 \, \Omega,$$

b, l, h – wymiary geometryczne próbki: $b = (3,7 \pm 0,1) \times 10^{-3} \, \text{m}$,

$$l = (11,5 \pm 0,2) \times 10^{-3} \, \text{m},$$

$$h = (1,7 \pm 0,1) \times 10^{-3} \, \text{m},$$

$$a = (22,4 \pm 0,2) \times 10^{-3} \, \text{m}.$$



Rys. 1. Wymiary geometryczne próbki

4. W oparciu o stałą Halla R_H wyznaczyć koncentrację n nośników w próbce.
5. Przeprowadzić rachunek błędów.

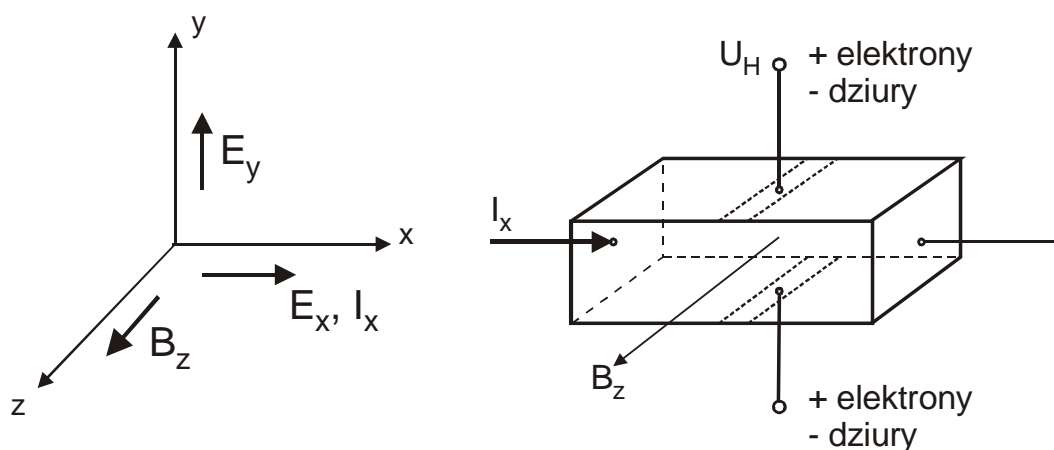
Zjawisko Halla

Efekt Halla jest źródłem informacji o podstawowych właściwościach fizycznych, które charakteryzują badany materiał pod względem elektrycznym. Efekt ten odkrył E.H. Hall w 1879 roku podczas badań nad naturą sił działających na nośniki prądu w polu magnetycznym.

Jeżeli przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny, znajduje się w polu magnetycznym o kierunku prostopadłym do kierunku przepływu prądu, to w przewodniku powstaje pole elektryczne, prostopadłe zarówno do kierunku przepływu prądu, jak i do kierunku pola magnetycznego.

Badanie zjawiska Halla, przeprowadzone w szerokim zakresie temperatur i połączone z pomiarem przewodności właściwej, pozwala określać ruchliwość nośników prądu, ich koncentrację, znak, typ rozpraszania, szerokość przerwy wzbronionej oraz położenie poziomu akceptorowego lub donorowego.

Prąd płynący w próbce można traktować jako ruch nośników o średniej prędkości unoszenia v_x w kierunku pola elektrycznego E_x (rysunek 1). W polu magnetycznym o indukcji B_z , prostopadłym do kierunku prądu, nośniki są odchylane w kierunku prostopadłym do B_z i v_x .



Rys. 1. Kierunki prądu, pola magnetycznego i pola Halla w próbce prostopadłościennej

Zgromadzony ładunek wytwarza pole elektryczne E_y , zwane również polem Halla. Gromadzenie się ładunku na jednej ze ścian bocznych próbki trwa dotąd, dopóki siła działająca na nośniki, pochodząca od pola elektrycznego E_y , nie zrównoważy siły

pochođzącej od pola magnetycznego. Ma to miejsce wtedy, gdy składowa siły Lorentza w kierunku osi y jest równa zeru:

$$F_y = e(E_y - v_x B_z) = 0. \quad (1)$$

Stąd

$$E_y = v_x B_z \quad (2)$$

Ponieważ gęstość prądu w kierunku osi x, $j_x = nev_x$, to

$$E_y = \frac{1}{ne} j_x B_z = R_H j_x B_z \quad (3)$$

gdzie

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (4)$$

nazywamy stałą Halla. Stała Halla pozwala określać koncentrację nośników w próbce n oraz ich znak. Dla elektronów stała ta jest ujemna, natomiast dla dziur dodatnia.

Wzór (4) został wyprowadzony przy założeniu, że prędkość dryfu nośników jest jednakowa dla wszystkich nośników prądu.

Z prawa Ohma wynika, że

$$j_x = \sigma E_x = ne\mu_d E_x \quad (5)$$

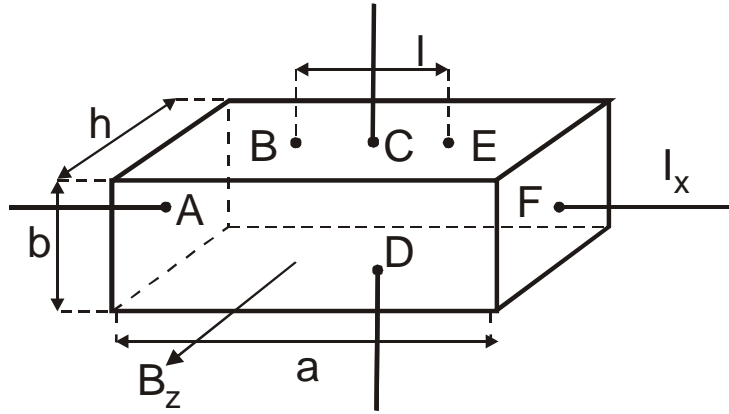
gdzie: σ jest przewodnością właściwą próbki, a μ_d jest ruchliwością nośników, zwaną ruchliwością dryfu. Podstawiając wyrażenie (5) do równania (3) otrzymamy:

$$E_y = R_H \sigma E_x B_z = A\mu_d E_x B_z. \quad (6)$$

Iloczyn $A\mu_d = \mu$ nazywany jest ruchliwością Halla. Ruchliwość tę można wyznaczyć z zależności:

$$\mu = \frac{E_y}{E_x} \frac{1}{B_z}. \quad (7)$$

Najczęściej stosowaną metodą pomiaru ruchliwości jest metoda klasyczna. W metodzie tej stosuje się próbkę w kształcie prostopadłościennym (rysunek 2).



Rys. 2. Prostopadłościenna płytka do pomiaru ruchliwości metodą klasyczną

Elektrody prądowe A i F są podłączone do zewnętrznego źródła zasilania. Ze względu na to, że w pobliżu elektrod prądowych pole elektryczne może być niejednorodne, jak również ze względu na możliwość powstania złączy prostujących, do pomiaru spadku napięcia wzdłuż próbki stosuje się elektrody napięciowe B i E umieszczone w odległości l od siebie.

Po włączeniu pola magnetycznego o indukcji B_z , prostopadłego do powierzchni próbki i do kierunku przepływu pola elektrycznego, pomiędzy elektrodami C i D ustali się napięcie Halla U_H . Jest ono proporcjonalne do ruchliwości Halla μ . Ruchliwość μ , stała Halla R_H i przewodność właściwą σ obliczamy ze wzorów:

$$\mu = \frac{U_H}{U_c} \frac{l}{b} \frac{1}{B_z} = R_H \sigma, \quad (8)$$

$$R_H = \frac{U_H}{J_x} \frac{h}{B_z}, \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{J_x}{U_c} \frac{1}{bh}, \quad (10)$$

gdzie:

U_H – napięcie Halla między sondami C i D,

U_c – spadek napięcia między sondami napięciowymi B i E,

l, b, h – wymiary zaznaczone na rysunku 2,

J_x – natężenie prądu elektrycznego przepływającego przez próbkę.

Przy wyprowadzeniu tych wzorów założono, że pole magnetyczne jest słabe, to znaczy

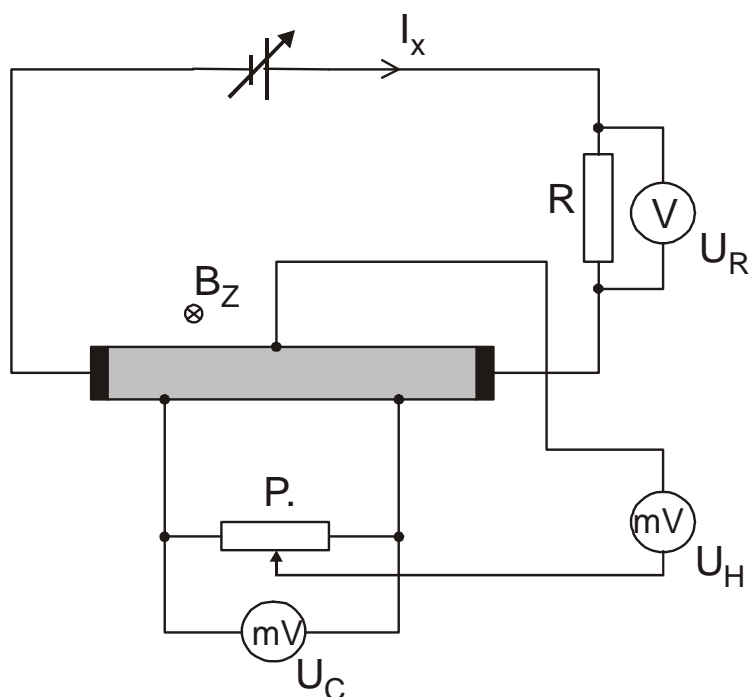
$$(\mu B_z)^2 \ll 1 \quad (11)$$

i gęstość prądu w całej próbce jest jednakowa. Aby ostatni warunek był spełniony, elektrody prądowe powinny mieć dużą powierzchnię, natomiast elektrody napięciowe powinny być punktowe.

Sondy Halla C i D powinny być ustawione na jednej linii ekwipotencjalnej tak, aby różnica potencjałów między nimi była równa zero, gdy $B_z = 0$. W przeciwnym przypadku, oprócz napięcia Halla, będzie istniało napięcie wynikające z nieekwipotencjalnego ustawienia sond. Napięcie to trzeba kompensować przy użyciu specjalnego układu elektrycznego.

Efekt Halla w półprzewodnikach można badać stosując stałoprądową technikę pomiarową. Przy pomiarze stałoprądowym napięcie Halla jest napięciem stałym, co uzyskuje się przez zastosowanie stałego pola elektrycznego i magnetycznego.

Zastosowany w ćwiczeniu układ pomiarowy metodą stałego pola magnetycznego i stałego prądu przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Schemat układu pomiarowego

W układzie tym zastosowano stały prąd sterujący płynący przez próbkę I_x i stałe pole magnetyczne B . Do wyznaczenia ruchliwości, stałej Halla i przewodności właściwej konieczny jest pomiar: spadku napięcia U_c między sondami napięciowymi, napięcia Halla U_H oraz natężenia prądu I_x przepływającego przez próbkę. Spadek napięcia U_c odczytuje się bezpośrednio na mierniku napięcia. Natężenie prądu przepływającego przez próbkę nie jest wyznaczane w sposób bezpośredni, lecz przez pomiar spadku napięcia U_R na oporniku R , który jest szeregowo połączony z próbką – wtedy $I_x = U_R/R$.

Krzywa cechowania elektromagnesu

