



**Ćwiczenie
57**

BADANIE EFEKTU HALLA

Cel ćwiczenia: wyznaczenie charakterystyk statycznych i stałej hallotronu oraz określenie typu przewodnictwa i koncentracji swobodnych nośników ładunku.

Zagadnienia: zjawisko Halla, oddziaływanie pola magnetycznego i elektrycznego na nośniki ładunków, siła Lorentza, wektory: indukcji magnetycznej i natężenia pola elektrycznego, gęstości prądu; koncentracja nośników ładunku, czułość i zastosowanie hallotronów.

57.1. Wprowadzenie

1a. Teoria efektu Halla. Efekt Halla jest to zjawisko powstawania różnicy potencjałów (zwanej napięciem Halla, U_H) w płytce przewodzącej, przez którą przepływa prąd elektryczny, jeśli jest ona umieszczona w zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji B . Napięcie to wytworzy się pomiędzy przeciwległymi ściankami płytki w kierunku prostopadłym zarówno do kierunku przepływu prądu I , jak i do kierunku wektora zewnętrznego pola magnetycznego B . Nazwa tego efektu, odkrytego w 1879 roku, pochodzi od nazwiska jego odkrywcy, fizyka amerykańskiego E. H. Halla (1855 – 1938). Przyczyną zjawiska jest oddziaływanie pola magnetycznego pod postacią siły Lorentza, działającej na cząstki naładowane elektrycznie, poruszające się w polu magnetycznym. Siła ta powoduje m.in. zakrzywianie toru cząstek elektrycznych. Również nośniki ładunku q , tworzące prąd elektryczny I w przewodzących płytkach (metalowych, półprzewodnikowych), doznają w polu magnetycznym B działania siły Lorentza, powodującej odchylenie toru ruchu od linii prostej. Siła Lorentza F_L określona jest równaniem:

$$F_L = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (57.1)$$

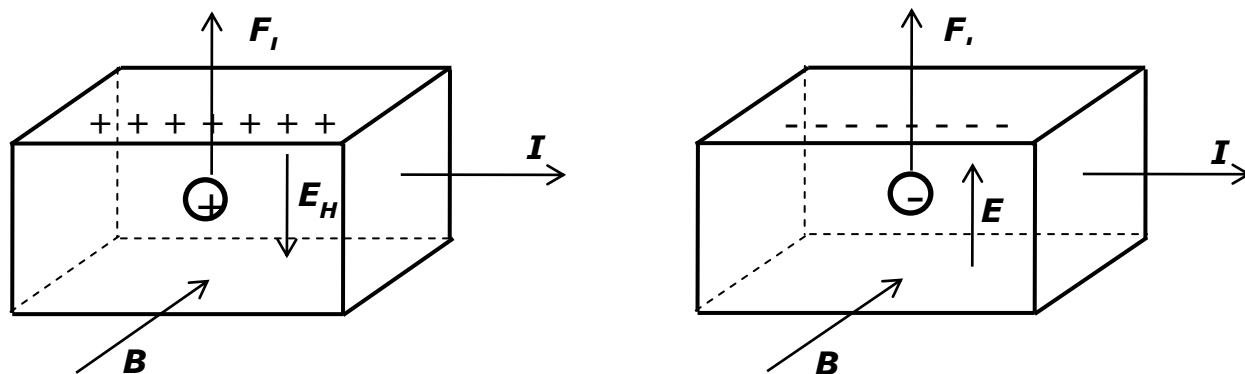
gdzie: q – ładunek elektryczny nośnika,
 \mathbf{v} – wektor średniej prędkości nośników, zwanej także prędkością dryfu albo prędkością unoszenia nośników prądu,
 B – wektor indukcji pola magnetycznego,
 \times – znak iloczynu wektorowego, w którym pogrubioną czcionką oznaczono wielkości wektorowe.

Kierunek i wartość siły Lorentza wynika z własności iloczynu wektorowego: siła działa w kierunku prostopadłym do wektorów \mathbf{v} i B (tj. w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyznaczonej przez wektory \mathbf{v} i B), a jej wartość obliczamy na podstawie zależności $F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\mathbf{v}, \mathbf{B})$. Widać, że gdy $\sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) = 1$, tzn. gdy kąt pomiędzy wektorami \mathbf{v} i B jest równy 90° (wektory \mathbf{v} i B są wzajemnie prostopadłe), to siła F_L jest maksymalna i osiąga wartość $F_{Lmax} = q \cdot v \cdot B$. Przy takiej konfiguracji wektorów uzyskuje się więc najsilniejsze odchylenie nośników ładunku w płytce przewodzącej. Jeżeli nośnikami większościowymi w płytce są elektrony ($q = -e = 1,602 \times 10^{-19}$ C), to zwrot wektora prędkości \mathbf{v} jest przeciwny do kierunku przepływu prądu ($\mathbf{v} < 0$), a siła Lorentza

$$F_L = -|e|(-\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \equiv |e|(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (57.2)$$

Zatem, pod działaniem siły F_L , przy ustalonym kierunku B i kierunku przepływu prądu I , ładunki dodatnie (tzw. dziury w półprzewodniku akceptorowym, typu p – *positive*) i ładunki ujemne (elektrony w metalu i w półprzewodniku donorowym, typu n – *negative*) odchylają się ku tej samej ściance płytki. Tym samym, na ściance przeciwległej występuje niedomiar odpowiednich nośników ładunku. Powstały w ten sposób nierównomierny rozkład gęstości ładunku wytwarza w płytce dodatkowe, poprzeczne pole elektryczne o natężeniu E_H . Kierunek

tego pola jest prostopadły do kierunku działania pola \mathbf{B} oraz do kierunku przepływu prądu \mathbf{I} (rys. 57.1).



Rys.57. 1. Odchylenie nośników ładunku pod wpływem pola magnetycznego w płytce z przewodnictwem dziurowym (po lewej) i elektronowym (po prawej).

Pole elektryczne \mathbf{E}_H działa na ładunki q siłą

$$\mathbf{F}_E = q \mathbf{E}_H \quad (57.3)$$

Dla ładunków ujemnych siła $\mathbf{F}_E = -e \cdot \mathbf{E}_H$, więc jej zwrot jest przeciwny niż dla dodatnich. Siła \mathbf{F}_E przeciwdziała gromadzeniu się ładunków w obrębie ścianki (górnej ścianki na rys. 57.1). Proces dalszego przepływu ładunków ustanie, gdy przeciwnie skierowane siły (siła dodatkowego pola elektrycznego \mathbf{F}_E i siła pola magnetycznego \mathbf{F}_L) zrównoważą się co do wartości. Dla warunku równowagi sił ($|\mathbf{F}_E| = |\mathbf{F}_L|$), wykorzystując wzory (57.1) i (57.3) oraz biorąc $F_L = F_{Lmax}$, otrzymujemy zależność:

$$v B = E_H \quad (57.4)$$

Jeśli przyjmiemy, że pole elektryczne w płytce o szerokości b jest jednorodne, to związek między natężeniem pola E_H a napięciem Halla U_H jest następujący:

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (57.5)$$

Uwzględniając równanie (57.4) i (57.5) możemy wyrazić wartość napięcia Halla w postaci:

$$U_H = b v B \quad (57.6)$$

Występującą we wzorze średnią wartość prędkości v nośników, tworzących prąd elektryczny w płytce, można powiązać z wartością wektora gęstości prądu $|\mathbf{j}| \equiv j$ lub z natężeniem prądu I . Wartość wektora gęstości prądu dana jest wzorem:

$$\mathbf{j} = q n \mathbf{v}, \quad (57.7)$$

a natężenie prądu:

$$I = j S = q v n b d \quad (57.8)$$

gdzie: n – liczba nośników ładunku w jednostce objętości płytki (koncentracja ładunków),

S – pole przekroju poprzecznego płytki,

b – szerokość płytki mierzona wzdłuż kierunku pola \mathbf{E}_H ,

d – grubość płytki mierzona wzdłuż kierunku pola \mathbf{B} ,

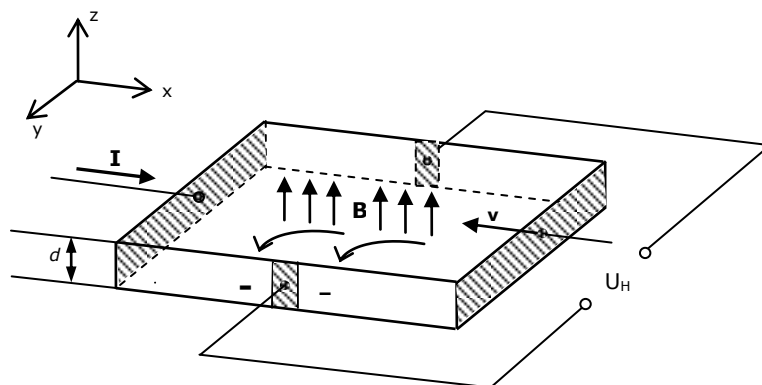
I – natężenie prądu, zwanego też prądem sterującym I_S .

Ze wzoru (57.8) wyznaczamy prędkość v i wstawiamy do równania (57.6). Otrzymamy wówczas tzw. równanie Halla:

$$U_H = \frac{BI}{n q d} = \gamma B I \quad (57.9)$$

Współczynnik proporcjonalności $\gamma = 1/(n \cdot q \cdot d)$ zależy od parametrów płytki przewodzącej oraz od rodzaju i technologii wytwarzania materiału, z którego ją wykonano. Znając jego wartość oraz mierząc natężenie prądu $I \equiv I_S$ płynącego przez płytkę i napięcie Halla U_H można, korzystając z zależności (57.9), wyznaczyć indukcję magnetyczną B . Element elektroniczny wykorzystujący efekt Halla nazywa się hallotronem lub czujnikiem Halla. Współczynnik γ , tzw. stała hallotronu, jest indywidualną cechą hallotronu, świadczącą o jego jakości.

1b. Hallotrony i ich zastosowanie. Hallotron to prostokątna płytka półprzewodnika lub metalu, na krawędziach której umieszczone są cztery elektrody: dwie zasilające i dwie pomiarowe. Elektrody zasilające, zwane też prądowymi, są odpowiedzialne za przepływ kontrolowanego prądu $I \equiv I_S$, zwanego prądem sterującym. Elektrody pomiarowe to elektrody napięciowe, które umieszczane są zwykle na dłuższych krawędziach płytki (patrz rys.57.2).



Rys. 57.2. Zilustrowanie zjawiska Halla w hallotronie z przewodnictwem elektronowym.

Hallotrony wytwarza się z materiałów przewodzących litych (mono- i polikrystalicznych) albo naparowanych na podłoże izolacyjne i tworzących cienką warstwę. Grubość litych płytek hallotronowych jest rzędu $100 \div 300 \mu\text{m}$, grubość naparowanych jest o rząd wartości mniejsza ($\sim 10 \mu\text{m}$). Miarą jakości hallotronu jest jego stała $\gamma = 1/(e \cdot n \cdot d)$, wyrażana też jako $\gamma \equiv R_H / d$. Współczynnik $R_H = 1/(n \cdot q)$ oznacza stałą Halla (stałą materiałową), wielkość głównie zależną od jakości i technologii wytwarzania materiału przewodzącego. Znak stałej Halla jest taki sam, jak znak nośników ładunku q : dla elektronów stała R_H jest ujemna, również ujemne jest napięcie Halla U_H . Stała R_H pozwala określić koncentrację nośników w próbce oraz ich znak. Ze wzoru $\gamma = 1/(e \cdot n \cdot d)$ wynika, że dla uzyskania dużej wartości stałej hallotronu wymagany jest materiał o małej koncentracji n nośników ładunku (ładunków przewodnictwa). Z kolei mała koncentracja nośników zapewnia dużą ich ruchliwość (tj. średnią prędkość w stałym polu elektrycznym do natężenia tego pola) i prędkość unoszenia (tj. prędkość nośników w kierunku pola elektrycznego). W metalach gęstość nośników jest zwykle stała i równa koncentracji atomów w kryształach (rzędu $10^{28} \div 10^{29} \text{ m}^{-3}$). W półprzewodnikach koncentracja nośników jest o wiele rzędów wartości mniejsza od koncentracji atomów. Koncentracja ładunków przewodnictwa w półprzewodnikach jest rzędu $10^{13} \div 10^{22} \text{ m}^{-3}$, a w silnie domieszkowanych półprzewodnikach $\sim 10^{26} \text{ m}^{-3}$. Oznacza to, że stała Halla $R_H = 1/(e \cdot n)$ jest rzędu $10^{10} \div 10^{11} \text{ m}^3 \text{C}^{-1}$ w metalach i rzędu $10^5 \div 10^{-4} \text{ m}^3 \text{C}^{-1}$ w półprzewodnikach (a w półprzewodnikach silnie domieszkowanych – rzędu $10^{-8} \text{ m}^3 \text{C}^{-1}$). Drugim istotnym czynnikiem decydującym o stałej hallotronu jest grubość d płytki. Reasumując, dla uzyskania dużej wartości stałej γ wykonuje się hallotrony z płasko-równoległych płytek półprzewodnikowych o przewodnictwie typu n , cienkich (rzędu ułamków mm) oraz wąskich (rzędu kilku mm). Najczęściej stosowane materiały półprzewodnikowe to Ge, Si, GaAs, InSb, InAs, HgSe, HgTe. Dla przykładu, czujniki Halla wykonane z GaAs o grubości $d = 100 \div 300 \mu\text{m}$ mają stałą $\gamma = 190 \div 260 \text{ V/A}\cdot\text{T}$. Zapewnia to, już przy niewielkim prądzie sterującym $I_S \approx 7 \text{ mA}$, relatywnie wysokie, a więc łatwo mierzalne, wartości napięcia U_H rzędu 100 mV . Należy podkreślić, że hallotrony wykonane nawet z tego samego materiału nie zawsze cechują identyczne parametry. Wpływ na to mają takie czynniki, jak technologia uzyskania materiału, sposób przygotowania płytki i jej grubość, jakość i miejsce naniesienia kontaktów elektrycznych na płytkę, symetryczność kontaktów.

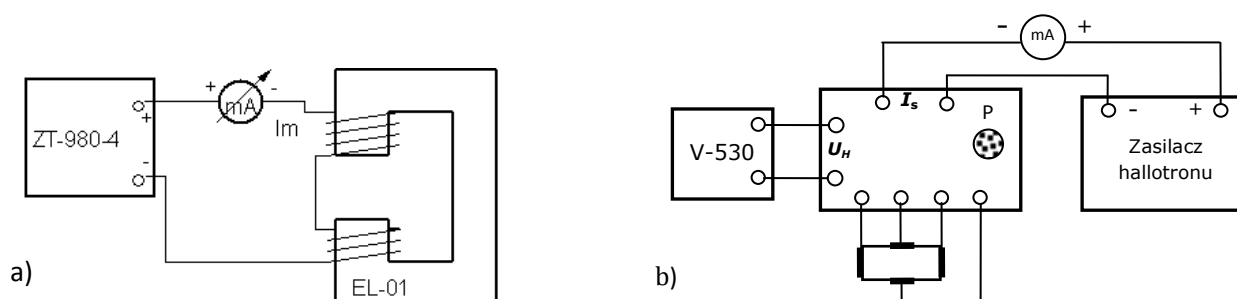
Dlatego każdy hallotron ma swoje indywidualne parametry oraz charakterystyki [$U_H = f(B)$, $U_H = f(I_S)$, $U_H = f(\alpha)$], określające jego właściwości i praktyczną przydatność. Ważną rolę w zastosowaniach czujników Halla pełni ich *czułość* S . Parametr ten wyraża zdolność hallotronu do reagowania (tj. wykazywania zmian wartości U_H , przyrostów napięcia ΔU_H) na zmiany wartości wielkości wejściowych [tj. przyrosty wartości ΔI_S , ΔB lub $\Delta \alpha$, gdy $B = f(\alpha)$], sterujących jego pracą. W związku z tym definiuje się czułość prądową $S_I = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_S}$ dla $B = \text{const}$, czułość polową $S_B = \frac{\Delta U_H}{\Delta B}$ dla $I_S = \text{const}$ oraz czułość kątową $S_\alpha = \frac{\Delta U_H}{\Delta \alpha}$ dla $I_S = \text{const}$ i $B_0 = \text{const}$ (wyjaśnienia w p. 57.2 – układ pomiarowy B). Czułość jest tym większa im większy przyrost wartości napięcia ΔU_H odpowiada jednostkowej zmianie wartości wielkości wejściowej. Jeśli jednostkowej zmianie wielkości wejściowej odpowiada zawsze taka sama zmiana ΔU_H to czułość $S = \text{const}$.

Przykładem niepoprawności wykonania kontaktów elektrycznych (elektrod hallowskich) jest występowanie dodatkowego spadku napięcia, tzw. napięcia asymetrii pierwotnej U_A . Gdy elektrody hallowskie nie leżą dokładnie naprzeciwko siebie (tzn. nie leżą na tej samej linii ekwipotencjalnej), a przez hallotron płynie prąd I_S , to nawet przy braku pola magnetycznego ($B = 0$) wytwarza się między elektrodami hallowskimi różnica potencjałów U_A . Jest to efekt niepożądany, a poprawny pomiar napięcia Halla uzyskamy po skompensowaniu napięcia asymetrii. Służy do tego specjalny układ kompensacyjny. Przy jego pomocy eliminujemy napięcie U_A tak, aby woltomierz służący do pomiaru napięcia Halla wskazał na najniższym zakresie pracy wartość $U_H = 0$, gdy $B = 0$ i $I_S \neq 0$. Inną istotną przyczyną zaburzenia poprawności pomiaru napięcia U_H może być nierównomierne nagrzewanie się hallotronu podczas przepływu prądu I_S . Wówczas charakterystyki $U_H = f(B)$ i $U_H = f(I_S)$ wykazywać będą odstępstwo od liniowości w obszarze wysokich wartości B i I_S . Z tych względów pomiary należy wykonywać dość szybko i nie przekraczać dopuszczalnych wartości natężenia prądu.

Hallotроны znajdują szerokie zastosowanie w technice, np. do pomiaru natężenia pola magnetycznego, pomiaru wielkości elektrycznych (natężenia prądu stałego lub przemiennego – nawet bardzo dużych wartości rzędu kilkudziesięciu kA, napięcia, oporu i mocy wydzielanej np. w urządzeniach). Wykorzystywane są również w elementach liczących i logicznych. Przykłady niektórych zastosowań: napęd CD – ROM, stabilizatory prędkości w video – odtwarzaczach, programatory pralek, sygnalizatory pozycji, wyłączniki bezkontaktowe, wykrywacze metali, wskaźniki i mierniki prędkości obrotowej, wskaźniki ilości gazu w instalacjach LPG, czujniki przechyłu np. statku lub urządzeń dźwigowych, czujniki bardzo słabych pól magnetycznych, tzw. kompas elektryczny, i wiele, wiele innych. Tak szerokie zastosowanie hallotronów czyni dziedzinę badania efektu Halla w różnych materiałach dziedziną bardzo interesującą. Efekt Halla spełnia również istotną rolę poznawczą w badaniach struktury półprzewodników (np. wyznaczanie koncentracji i ruchliwości nośników ładunku).

57.2. Układ pomiarowy

Klasyczny układ pomiarowy (układ A) tworzą dwa niezależne, niepołączone ze sobą obwody: obwód zasilania elektromagnesu oraz obwód zasilania hallotronu (rys. 57.3). Prąd I_m w obwodzie zasilania elektromagnes (rys 57.3 a), przepływając przez zwoje elektromagnesu, wytwarza

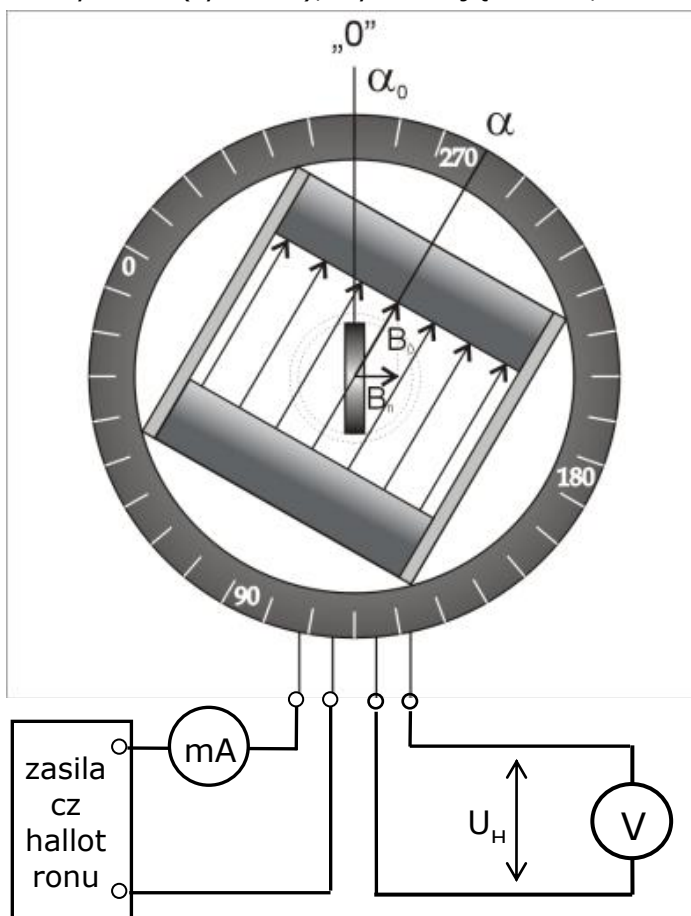


Rys.57.3. Schemat połączeń do badania efektu Halla: a) zasilanie elektromagnesu, b) układ pomiarowy hallotronu.

między nabiegunnikami pole magnetyczne o indukcji B . Wartość indukcji pola magnetycznego należy obliczyć lub odczytać z wykresu wzorcowego $B = f(I_m)$. Odpowiednie wzory oraz wykres

dołączono do instrukcji roboczej ćwiczenia. W obwodzie zasilania hallotronu (rys. 57.3 b) mierzymy napięcie Halla U_H woltomierzem o dużej rezystancji wewnętrznej. Woltomierz podłączony jest równolegle do elektrod napięciowych hallotronu. Natężenie prądu sterującego I_S mierzymy miliamperomierzem, który podłączony jest szeregowo do zasilacza hallotronu. Układ do skompensowania napięcia asymetrii U_A znajduje się w przystawce hallotronu, zaopatrzonej w potencjometr P. W celu przeprowadzenia kompensacji należy hallotron, przez który płynie prąd I_S o ustalonej wartości, usunąć z obszaru pola magnetycznego ($B = 0$). Następnie, obracając powoli pokrętkę P potencjometru (np. w lewo), doprowadzamy wskazanie woltomierza mierzącego napięcie U_H do zerowej wartości. Kompensację należy przeprowadzić na możliwie najniższym zakresie pracy woltomierza. Jeżeli hallotron ponownie wprowadzimy w obszar pola magnetycznego, to woltomierz wskaże poprawną, pozbawioną U_A , wartość napięcia Halla U_H . Opisany układ pomiarowy pozwala wyznaczyć dwie charakterystyki statyczne hallotronu: prądową – $U_H = f(I_S)$ oraz polową – $U_H = f(B)$.

W innej wersji układu (układ B) do badania efektu Halla wykorzystuje się dwa magnesy neodymowe (rys. 57.4), wytwarzające stałe, stabilne do 70°C i jednorodne pole magnetyczne



o indukcji B . Pole magnetyczne magnesów neodymowych jest bardzo silne np. płytka o rozmiarach 40x18x10 mm i masie 54 g może utrzymać masę 70,2 kg, czyli ciężar 1300 razy większy od własnego. Te cechy są istotne tam, gdzie potrzebne jest silne pole magnetyczne i ważna jest miniaturyzacja urządzeń.

Wartość indukcji magnetycznej B_0 w obszarze między magnesami w układzie B wynosi 0,5 T. Magnesy zamocowano tak, aby można nimi obracać wokół nieruchomego hallotronu. Kąt obrotu α odczytuje się z podziałki kątowej. Zmiana kąta położenia magnesów względem hallotronu powoduje zmianę wartości składowych indukcji magnetycznej B_0 , tj. składowej B_s równoległej do powierzchni hallotronu i składowej B_n prostopadłej do powierzchni hallotronu. Dla wystąpienia efektu Halla istotna jest tylko składowa prostopadła B_n . Jeśli ustawienie magnesów jest takie, że hallotron leży wzdłuż linii pola magnetycznego to $B_s = B_0$ oraz $B_n = 0$, a tym samym $U_H = 0$. Tej sytuacji odpowiada kąt $\alpha \equiv \alpha_0$. Zmieniając orientację pola B_0 , uzyskamy zmianę wartości składowej B_n .

Rys. 57.4. Schemat układu pomiarowego (zestaw z ruchomymi magnesami trwałymi) do badania efektu Halla.

Wartość B_n dla kolejnych położenia kątowych magnesów, tj. dla $\alpha \equiv \alpha_i$, można obliczyć ze wzoru $B_n = B_0 \sin(\alpha_i - \alpha_0)$. W skład obwodu zasilania hallotronu wchodzi zasilacz, warunkujący przepływ prądu sterującego I_S przez hallotron, oraz miliamperomierz do pomiaru natężenia prądu I_S . Wskaźnikiem napięcia Halla U_H jest woltomierz.

Ten układ pomiarowy pozwala wyznaczyć trzy charakterystyki statyczne hallotronu: prądową – $U_H = f(I_S)$, polową – $U_H = f(B)$, kątową – $U_H = f(\alpha)$.

57.3. Zadania do wykonania

Układ A

1. Zestawić układ elektryczny do pomiarów napięcia Halla. Skompensować napięcie asymetrii pierwotnej U_A .

2. Wyznaczyć zależność napięcia Halla od indukcji magnetycznej dla ustalonej wartości (jednej lub kilku) natężenia prądu sterującego, tj. $U_H = f(B)$, gdy $I_S = \text{const}$. Zmiany wartości B uzyskujemy poprzez zmiany wartości prądu magnesującego I_m , tj. $B = f(I_m)$. Narysować wykres punktowy (wykresy bez linii) zmierzonych zależności $U_H = f(B)$.
3. Wyznaczyć zależność napięcia Halla od natężenia prądu sterującego przy ustalonej wartości (jednej lub kilku) indukcji magnetycznej, tj. $U_H = f(I_S)$, gdy $B = \text{const}$. Narysować wykres punktowy (wykresy) zmierzonych zależności $U_H = f(I_S)$.
4. Korzystając z programu komputerowego, wyznaczyć metodą regresji liniowej równanie prostej (prostych), będącej najlepszym przybliżeniem zmierzonych zależności. Następnie nanieść tak otrzymane linie proste na wykresy punktowe $U_H = f(B)$ i $U_H = f(I_S)$.
5. Na podstawie wartości współczynników kierunkowych a tych prostych, wyznaczonych metodą regresji liniowej, obliczyć wartości: stałej hallotronu γ_B przy $I_S = \text{const}$, stałej γ_I przy $B = \text{const}$, koncentracji nośników ładunku n oraz niepewności tych wielkości.
6. Z równania Halla (wzór 57.8), dla wybranych wartości B oraz I_S , obliczyć przykładową wartość stałej hallotronu γ_B i γ_I oraz koncentrację nośników ładunku n . Oszacować niepewności tych wielkości.

Układ B

1. Połączyć układ pomiarowy według schematu zamieszczonego w instrukcji wykonawczej.
2. Wyznaczyć zależność napięcia Halla od indukcji magnetycznej przy ustalonej wartości (jednej lub kilku) natężenia prądu sterującego, tj. $U_H = f(B)$, gdy $I_S = \text{const}$. Zmiany wartości B_n uzyskujemy poprzez zmiany kąta α_i , tj. $B_n = f(\alpha_i)$. Narysować wykres punktowy (wykresy bez linii) zmierzonych zależności $U_H = f(B)$ oraz $U_H = f(\alpha)$.
3. Wykorzystując wykres zależności $U_H = f(\alpha)$ wyznaczyć maksymalną czułość kątową hallotronu $S_\alpha = \frac{\Delta U_H}{\Delta \alpha}$, stałą hallotronu $\gamma_\alpha = S_\alpha / I_S B_0$ oraz koncentrację n nośników ładunku.
4. Wyznaczyć zależność napięcia Halla od natężenia prądu sterującego przy ustalonej wartości (jednej lub kilku) indukcji magnetycznej, tj. $U_H = f(I_S)$, gdy $B = \text{const}$. Narysować wykres punktowy (wykresy bez linii) zależności $U_H = f(I_S)$.
5. Korzystając z programu komputerowego (metoda regresji liniowej), wyznaczyć równanie prostej (prostych), będącej najlepszym przybliżeniem zmierzonych zależności. Następnie nanieść te proste na wykresy punktowe $U_H = f(B)$ i $U_H = f(I_S)$.
6. Na podstawie wartości współczynników kierunkowych a tych prostych (odpowiednio a_B dla prostych $U_H(B)$ i a_I dla prostych $U_H(I_S)$), wyznaczonych metodą regresji liniowej, obliczyć wartości: czułości polowej $S_B = \frac{\Delta U_H}{\Delta B} \equiv a_B$ i stałej hallotronu $\gamma_B = S_B / I_S$ przy $I_S = \text{const}$, czułości prądowej $S_I = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_S} \equiv a_I$ i stałej $\gamma_I = S_I / B_n$ przy $B_n = \text{const}$, koncentracji n nośników ładunku oraz niepewności tych wielkości.
7. Z równania Halla (wzór 57.8), dla wybranych wartości B oraz I_S , obliczyć przykładową wartość stałej hallotronu γ_B i γ_I oraz koncentrację nośników ładunku n . Oszacować niepewności tych wielkości.

57.4. Pytania

1. Jak pole magnetyczne i elektryczne działa na dodatnie i ujemne nośniki ładunku?
2. Wyjaśnić, na czym polega zjawisko Halla.
3. Jak zależy wartość i znak napięcie Halla od rodzaju materiału przewodzącego, z którego wykonano hallotron?
4. Zdefiniować stałą hallotronu, koncentrację nośników swobodnych i podać ich jednostki.
5. Omówić sposoby wyznaczania stałej hallotronu i koncentracji nośników swobodnych.
6. Co to jest czułość kątowa hallotronu, o czym świadczy i jak ją wyznaczamy?
7. Co to jest napięcie asymetrii pierwotnej?
8. Czym charakteryzuje się dobry hallotron?
9. Jakie znasz zastosowania hallotronów?
10. Podaj definicje: natężenia prądu, wektora gęstości prądu elektrycznego, wektorów indukcji pola magnetycznego i natężenia pola elektrycznego. Jakie są jednostki miar tych wielkości?
11. Za pomocą jakich metod będzie przeprowadzana analiza niepewności pomiarowych zmierzonych wielkości fizycznych?

dr Nella Mirowska