

ZADANIE CS1

WYZNACZANIE RUCHLIWOŚCI I KONCENTRACJI NOŚNIKÓW W PÓŁPRZEWODNIKU

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie koncentracji i ruchliwości nośników oraz określenie typu półprzewodnika na podstawie pomiaru przewodnictwa i stałej Halla dla próbki półprzewodnika.

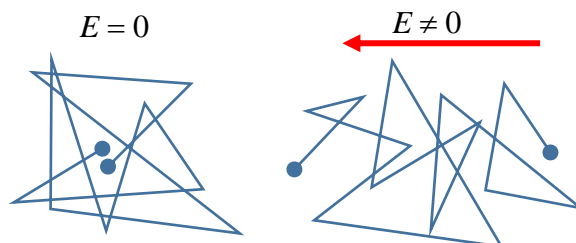
II. Wprowadzenie

II.1. Przewodnictwo – obraz mikroskopowy

Prąd to uporządkowany ruch nośników ładunku wywołany polem elektrycznym. Na nośnik o ładunku q (w półprzewodnikach to mogą być dodatnio naładowane dziury i ujemnie naładowane elektrony) w polu elektrycznym E działa siła $F = qE$, która nadaje nośnikom przyspieszenie. Ruch nośników jest zaburzony przez drgania sieci krystalicznej, przez obecność potencjałów atomów domieszek i niedoskonałości sieci krystalicznej. Nośniki ulegają rozproszeniom, w których zwrot i wartość ich prędkości zmienia się (patrz rys. 1). Sumarycznie jednak obserwuje się podążanie nośników zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego ze średnią prędkością V_d (zwaną prędkością unoszenia lub dryfu). Oczywiście, prędkość ta jest związana z wartością pola elektrycznego, im pole jest większe, tym prędkość jest większa. Parametrem łączącym te dwie wielkości jest ruchliwość

$$V_d = \frac{|q|}{q} \mu E, \quad (1)$$

gdzie iloraz $|q|/q$ pokazuje, że zwrot prędkości w danym polu jest zależny od znaku poruszających się nośników. Duża ruchliwość oznacza stosunkowo małe rozpraszanie, co (między innymi¹) świadczy o dobrej jakości próbki. Ruchliwość wyraża się w cm^2/Vs . Gdy jest na poziomie 10 tys. cm^2/Vs na przewodnictwo zaczynają mieć wpływ efekty kwantowe.



Rysunek 1. Poglądowe przedstawienie ruchu ładunku w polu elektrycznym.

Wielkością, która opisuje zdolność materiału do przewodzenia ładunku jest przewodność elektryczna σ . Im większa ruchliwość próbki tym wyższa jej przewodność. Związek przewodności z parametrami materiału dany jest przez:

$$\sigma = |q|n\mu, \quad (2)$$

gdzie n jest koncentracją nośników – czyli ich liczbą w jednostce objętości (typowo stosujemy jednostki szt./ cm^3 , w uproszczeniu cm^{-3}). Im więcej jest nośników ładunku, tym przewodność lepsza. Odwrotnością przewodności jest rezystywność (opór właściwy) ρ . Duża rozpiętość wartości przewodnictwa posłużyła do stworzenia klasyfikacji różnych materiałów na:
przewodniki dla których $\sigma > 10^6 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ (np. $\sim 60 \cdot 10^6 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ dla srebra)
dielektryki dla których $\sigma < 10^{-4} \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ (np. $\sim 10^{-12} \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ dla szafiru)
półprzewodniki – z wartościami pośrednimi.

¹ Ruchliwość jest zależna od temperatury, w niskich temperaturach jest wyższa

II.2. Wielkości dostępne w eksperymencie

Gdy do próbki przyłożymy różnicę potencjałów (napiecie U), popłynie prąd I . Zależność między nimi dana jest przez prawo Ohma: $U = RI$. Wartość oporu R zależy od oporu właściwego $\rho = \frac{1}{\sigma}$ oraz od jej geometrii: $R = \rho \frac{l}{S}$, gdzie S jest przekrojem próbki przez którą płynie prąd (zakreskowany obszar na rys. 2), a l długością próbki. Prawo Ohma można wyrazić więc jako

$$U = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} I. \quad (3)$$

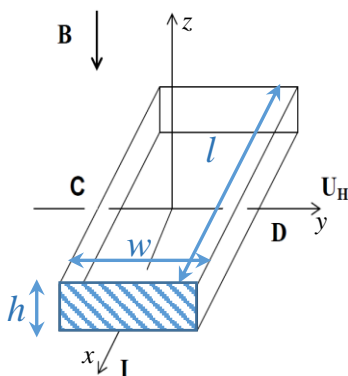
Znając wartość prądu, spadek napięcia i geometrię próbki można wyznaczyć przewodnictwo. Jego wartość zawiera informacje o iloczynie n i μ . Aby wyznaczyć je osobno potrzebujemy niezależnego eksperymentu, który dostarczy nam informację o jednej z tych wielkości. Najczęściej korzystamy ze zjawiska Halla², dzięki któremu możemy wyznaczyć koncentrację.

II.3. Efekt Halla

Gdy próbka, przez którą płynie prąd, zostanie umieszczona w polu magnetycznym B prostopadłym do kierunku prądu (patrz rys. 2.) obserwujemy ciekawe zjawisko: pojawiania się napięcia poprzecznego (w stosunku do kierunku przepływu prądu – między ściankami C i D) związanego z działaniem siły Lorentza na poruszające się nośniki:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (4)$$

gdzie \vec{v} – wektor prędkości nośników, \vec{B} – wektor indukcji pola magnetycznego.



Rysunek 2. Próbka w zjawisku Halla.

Pod wpływem tej siły następuje zakrzywienie torów ruchu nośników (w kierunku powierzchni C), co prowadzi do gromadzenia się ich na jednej powierzchni (C lub D, w zależności od znaku ładunku). Gromadzące się ładunki stają się jednocześnie źródłem poprzecznego pola elektrycznego E_y , które działa na nośniki siłą $F = qE_y$, skierowaną przeciwnie do siły Lorentza. W stanie stacjonarnym wypadkowa siła w kierunku y będzie zerowa (nośniki nie będą odchylane w tym kierunku). Wtedy $qE_y = q(v_x B_z)$. Pole elektryczne E_y na ściankach oddległych o w da różnicę potencjałów $U_H = w \cdot E_y$, zwaną napięciem Halla. Biorąc pod uwagę kształt próbki oraz fakt, że prąd I związany jest z prędkością nośników V_x , można pokazać że:

$$U_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{h} \quad (5)$$

Wielkość $R_H = 1/nq$ nazywa się stałą Halla. Zależność napięcia Halla od pola magnetycznego jest liniowa, a współczynnik proporcjonalności pozwala wyznaczyć koncentrację nośników. Jeżeli natężenie prądu I wyrażone jest w amperach [A], indukcja magnetyczna B w teslach [$T = \text{Wb/m}^2$],

² Edwin Hall, „On a new action of the magnet on electric current” Am. J. Math. 2, 287 92 (1879)

grubość płytki d w metrach [m], a napięcie Halla U_H w woltach [V] to współczynnik Halla R_H wyraża się w $[\text{m}^3\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}] \equiv [\text{m}^3/\text{C}]$.

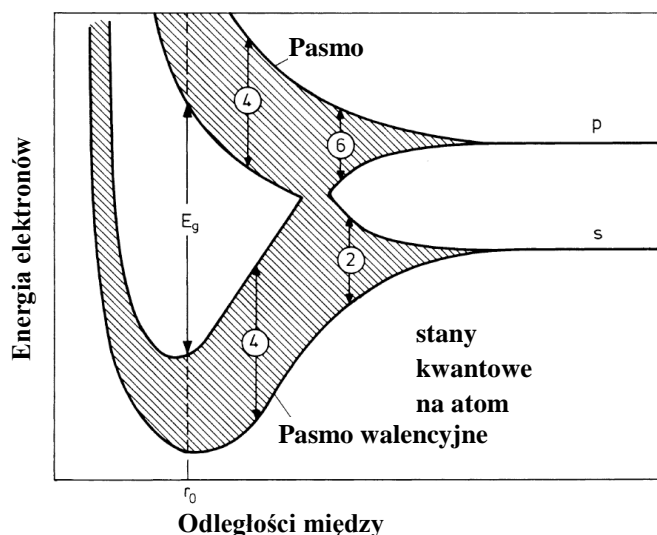
Koncentracja nośników zgodnie z zależnością dana jest wzorem:

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{6,24}{|R_H|} \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}. \quad (6)$$

Znak napięcia Halla pozwala określić znak ładunków nośników. Badanie zjawiska Halla jest ważną, rutynowo stosowaną metodą pozwalającą określić rolę wprowadzonych do półprzewodnika domieszek i jakość półprzewodnika.

II.4. Półprzewodniki

Wiemy, że elektrony w pojedynczym atomie mogą przyjmować określone *stany kwantowe*. Każdemu ze stanów odpowiada *ściśle* określona energia (*poziom energetyczny*). Energia elektronu w atomie nie zmienia się w sposób ciągły (innymi słowy poziomy energetyczne w atomach są dyskretne). Kryształ jest obiektem w którym w jednym cm^3 znajduje się bardzo wiele atomów $\sim 10^{23}$, a odległości między atomami są porównywalne z orbitami elektronów (\sim kilka 10^{-10} m). Dlatego nie można już uznać atomów za izolowane i zakładać, że elektrony podlegają oddziaływaniu wyłącznie "swojego" atomu. W konsekwencji gęstego upakowania atomów w kryształ, dyskretne poziomy energetyczne (z prawej strony na rys. 3) zmieniają swoje energie tworząc pasma (zakreskowane pola na rys. 3.). Dla położenia równowagi widzimy dwie grupy stanów, tworzące pasma (które zawierają nadal dyskretne poziomy, ale bardzo gęste, więc pasma w dobrym przybliżeniu można uznać za ciągłe). Pomiędzy pasmami mamy przedziały, w których nie ma żadnych stanów, tzw. przerwy. O ile elektron w paśmie może łatwo zmienić swoją energię, o tyle, aby przejść do stanów powyżej przerwy energetycznej, musi zyskać energię równą co najmniej energii przerwy. Najważniejsza w całej strukturze jest ta przerwa, która oddziela najwyżej położone (w skali energii elektronu) obsadzone pasmo od najbliższego mu pustego pasma (patrz rys. 4). Tę przerwę nazywamy czasem *fundamentalną przerwą energetyczną*, ponieważ jej wartość determinuje wszystkie własności fizyczne ciał stałych.



Rysunek 3. Zależność energii elektronów od odległości między atomami. Widać że dla $r \sim r_0$ mamy minimum energii elektronów - i dla takiej odległości kryształ jest stabilny (może istnieć). Liczby w kółeczkach odpowiadają degeneracji poziomów.³

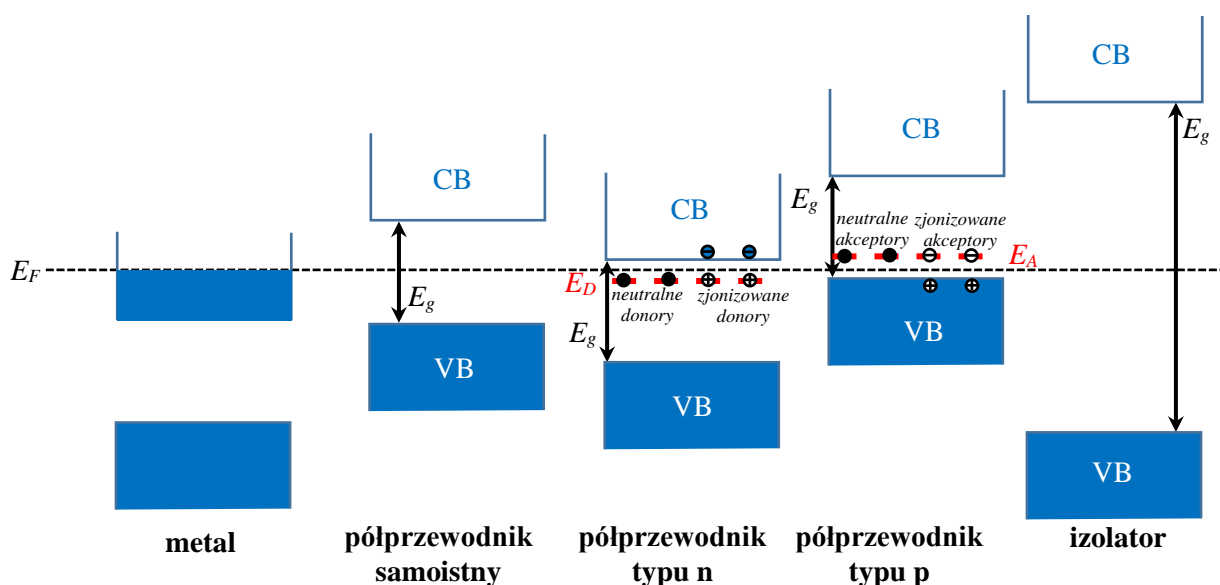
Elektrony w kryształach są cały czas w ruchu, ale wypadkowe przemieszczenie ładunku jest zerowe, ponieważ w danej chwili statystycznie tyle samo elektronów podróżuje we różne strony.

³ Na podstawie H. Ibach, H. Luth, Fizyka Ciała Stałego. Polecamy też: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/band2.html#c1>

Gdy jednak do próbki przykładamy napięcie, elektrony w paśmie przegrupowują się tak by obsadzić stany, które pozwalają na ruch pod wpływem pola - wtedy płynie prąd. Jeśli jednak pasmo jest *całkowicie* wypełnione, nie ma takich stanów i przyłożenie napięcia do próbki nie wywoła żadnego efektu. Elektrony mogą pozamieniać się ze sobą miejscami, ale wypadkowy ruch ładunku i tak będzie zerowy. Materiał taki nie przewodzi (jest izolatorem). Gdyby jednak przenieść nawet niewielką liczbę elektronów z tego całkowicie wypełnionego pasma do pustego pasma o wyższej energii, popłynąłby prąd. Potrzeba jednak dostarczyć energii niezbędnej na pokonanie przerwy energetycznej.

W przypadku półprzewodników przerwa energetyczna (0,1 eV – 3 eV) jest większa niż energia termiczna w temperaturze pokojowej (~26 meV dla 300 K), więc wzbudzenia termiczne są mało efektywne. Nośniki mogą być wzbudzone do pasma przewodnictwa na przykład poprzez oświetlenie światłem (zakres widzialny to 1,6 eV – 3,2 eV). Innym sposobem dostarczenia nośników do pasm w półprzewodnikach jest domieszkowanie. Polega ono na wprowadzeniu do sieci krystalicznej atomu o innej liczbie elektronów walencyjnych niż oryginalny atom. Taką domieszką może być na przykład atom fosforu w sieci krzemu: mając więcej elektronów walencyjnych może dostarczyć elektron do pasma przewodnictwa; nazywamy go donorem (z fr. *donner* – dawać). Akceptor to domieszka, która ma mniej elektronów walencyjnych niż atom, który podstawia, przez co elektrony z pasma walencyjnego zapełniają poziomy akceptorów, pozostawiając w paśmie walencyjnym dodatnie nieobsadzone stany elektronowe – dziury. Domieszki dobierane są tak, by energia ich jonizacji była na tyle mała, aby w temperaturze pokojowej pasmo walencyjne (przewodnictwa) zapełniało się dziurami (elektronami), jednak liczba elektronów/dziur biorących udział w przewodnictwie jest kilka rzędów wielkości mniejsza niż w przypadku metali (ok. 10^{17} - 10^{19} cm⁻³ w porównaniu do ok. 10^{24} cm⁻³ w metalach).

Rysunek 4 przedstawia podstawowe różnice pomiędzy izolatorami, półprzewodnikami i metalami.



Rysunek 4. Podział ciał stałych ze względu na wzajemne położenie pasm z zaznaczonym pasmem walencyjnym (VB), pasmem przewodnictwa (CB), poziomem Fermiego (E_F), przerwą energetyczną (E_g), poziomami donorów (E_D) i akceptorów (E_A).

II.5. Zależność temperaturowa przewodnictwa

Przewodnictwo półprzewodników samoistnych bardzo szybko zmienia się z temperaturą, przy czym zmiany te są uwarunkowane głównie zmianą koncentracji. Jest to dość istotna różnica pomiędzy półprzewodnikami a metalami, w których koncentracja nośników jest stała, a temperaturowa zależność przewodnictwa jest spowodowana tylko temperaturową zależnością ruchliwości nośników. W przypadku półprzewodników domieszkowanych można wyróżnić trzy różne reżimy zależności temperaturowej przewodnictwa.

- reżim temperatur niskich – do około 100 K, w którym energia drgań termicznych atomów sieci powoduje, że atomy domieszek zaczynają dostarczać właściwych sobie nośników prądu i koncentracja nośników wzrasta. Głównym czynnikiem wpływającym na przewodnictwo jest silny wzrost koncentracji nośników i wyraża się ono jako

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_{Ad}}{2kT}\right) \quad (7)$$

gdzie E_{Ad} jest energią aktywacji domieszek

- reżim temperatur średnich – od około 100 K do 350-400 K w zależności od materiału, w którym wszystkie domieszki oddały swoje nośniki prądu i koncentracja nośników praktycznie się nie zmienia. W tym obszarze temperatur o ruchliwości decyduje już właściwie rozproszenie na fononach. Oznacza to, że przewodnictwo maleje ze wzrostem temperatury zgodnie z zależnością

$$\sigma = AT^{-3/2} \quad (8)$$

choć zmiany te są stosunkowo niewielkie.

- reżim temperatur wysokich – powyżej 350-400 K, w zakresie których zaczyna wzrastać koncentracja nośników samoistnych – dostarczanych przez atomy pierwiastków macierzystych materiału i ponownie obserwuje się gwałtowny wzrost koncentracji nośników. Znowu głównym czynnikiem wpływającym na przewodnictwo jest silny wzrost koncentracji nośników i wyraża się ono jako

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_{As}}{2kT}\right) \quad (9)$$

gdzie E_{As} jest energią aktywacji nośników samoistnych.

III. Pomiary

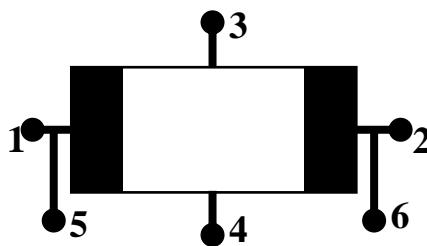
III.1. Wyposażenie

Masz do dyspozycji:

- próbkę domieszkowanego półprzewodnika **Ge** o wymiarach 20 x 10 x 1 mm³ w uchwycie z zamocowaną grzałką oraz czujnikiem temperatury PT100
- elektromagnes
- zasilacz stabilizowany Rigol DP832 z trzema wyjściami (do elektromagnesu, próbki, grzałki)
- moduł sterująco-pomiarowy Hall controller pozwalającym na odczyt temperatury próbki z dokładnością 0,1% wskazania miernika ± 1 °C
- pulpit z przełącznikami
- woltomierz cyfrowy Rigol DM3058
- mierniki cyfrowe Brymen BM 805 do pomiaru napięcia przewodnictwa i natężenia prądu elektromagnesu/próbki.

III.2. Próbką i układ pomiarowy

Badany półprzewodnik to Ge domieszkowany na typ p lub n, który w temperaturze pokojowej ma przerwę energetyczną $E_g = 0,67$ eV⁴. Do próbki podłączone są kontakty (rys. 5) o charakterystyce omowej.



Rysunek 5. Szkic próbki i układ kontaktów.

⁴ <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/bandstr.html>

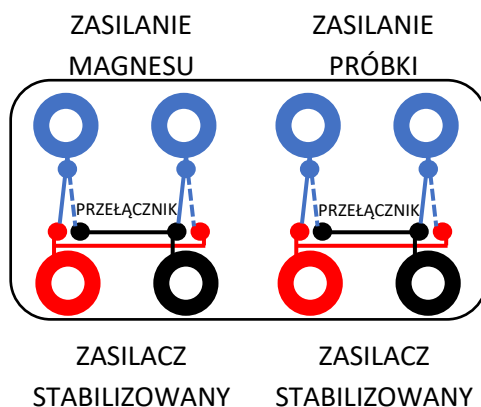
Kontakty 1 i 2 służą do doprowadzenia prądu. Pary kontaktów 3 i 4 służą do pomiaru napięcia Halla, a 5 i 6 do pomiaru napięcia przewodnictwa. Próbkę zamieszona jest na uchwycie pomiarowym i podłączona do modułu pomiarowo-sterującego, pozwalającego na odczyt temperatury, podłączenia zasilania grzałki i próbki oraz gniazdami pomiarowymi napięcia przewodzenia i napięcia Halla. **Podczas pracy należy obchodzić się z próbką wyjątkowo ostrożnie. W szczególności nie należy jej powierzchni dotykać palcami oraz w jakikolwiek sposób wyginać płytki na której jest zamontowana.**

Wielkość indukcji pola magnetycznego B zależy w przybliżeniu liniowo od płynącego prądu I_B w elektromagnesie zgodnie ze wzorem $B = AI_B$. Wartości stałych A dla elektromagnesów dostępnych na pracowni zostały umieszczone w Tabeli 1. Kierunek wektora indukcji pola magnetycznego zadany jest przez geometrię elektromagnesu, a jego zwrot zależy od kierunku przepływu prądu. Zwrot ten można sprawdzić używając igły magnetycznej, dostępnej w układzie pomiarowym. Elektromagnes w czasie pracy może się grzać (co zmienia jego opór), z tego powodu **nie zaleca się przekraczania natężenia prądu płynącego przez elektromagnes powyżej 0,5 A. Elektromagnes powinien być zasilany z gniazda 1 lub 2 (30V/3A) zasilacza w trybie źródła prądowego (stabilizacji prądu).**

Tabela 1. Stała proporcjonalności zależności indukcji magnetycznej od natężenia prądu ($B = AI_B$) dla elektromagnesów dostępnych na pracowni.

	A (T/A)
Zestaw A	0,547
Zestaw B	0,626
Zestaw C	0,452
Zestaw D	0,631

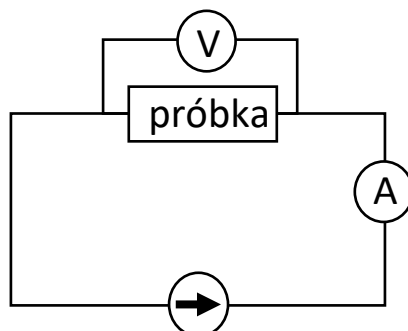
Do zmiany kierunku prądu płynącego przez próbkę i elektromagnes służy pulpit z przełącznikami, którego schemat został przedstawiony na rysunku 6.



Rysunek 6. Schemat pulpitu z przełącznikami do zmiany kierunków prądu.

III.3 Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej

Celem tego etapu jest zbadanie, czy zależność napięcia na kontaktach podłużnych od prądu jest liniowa (co posłuży do wyznaczenia przewodnictwa) oraz określenia optymalnego prądu dla pomiaru efektu Halla - prąd ten powinien być dość duży, ale nie na tyle, by grzał próbkę. Schemat podłączenia próbki został przedstawiony na rysunku 7.



Rysunek 7. Schemat układu do pomiaru napięcia przewodnictwa.

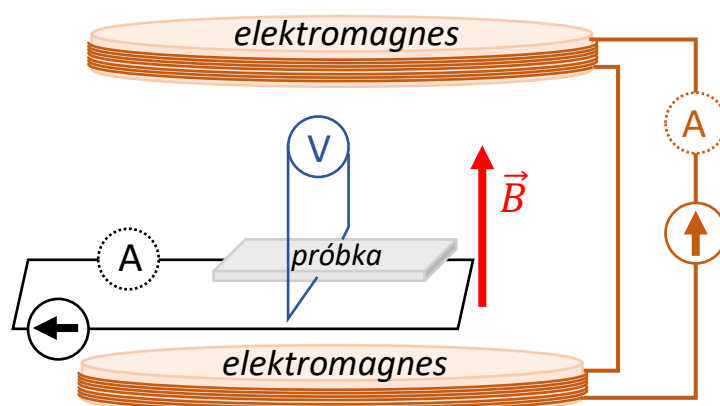
Próbka powinna być zasilana z gniazda 3 (5V/3A) zasilacza w trybie źródła prądowego (stabilizacji prądu). Maksymalny prąd płynący przez próbkę nie może być większy niż 30 mA. Charakterystykę należy zmierzyć dla dwóch zwrotów prądu dla pary kontaktów 5 i 6. Próbkę należy podłączyć korzystając z gniazd w module kontrolno-sterującym.

III.4. Pomiar efektu Halla

Pomiar efektu Halla wykonujemy w dwóch konfiguracjach:

- dla ustalonej wartości prądu płynącego przez próbkę badamy zależność napięcia Halla od pola magnetycznego, którego wartość pola kontrolujemy mierząc wartość prądu I_B płynącego przez elektromagnes.
- dla ustalonej wartości pola magnetycznego (prądu płynącego przez elektromagnes) badamy zależność napięcia Halla od natężenia prądu płynącego przez próbkę.

Schemat podłączeń układu został przedstawiony na rysunku 8. W zależności od potrzeb amperomierz kontrolujący wartość przepływającego prądu należy podpiąć do układu zasilającego elektromagnes (część a) lub do układu zasilającego próbkę (część b).



Rysunek 8. Schemat układu do pomiaru efektu Halla.

Pomiar napięcia Halla przeprowadzamy przy użyciu woltomierza cyfrowego o bardzo dużym oporze wewnętrznym (wówczas natężenie prądu przepływającego przez kontakty jest małe, do zaniedbania).

Pary sond hallowskich (3 i 4) mierzą różnicę potencjałów U pochodzącą nie tylko od efektu Halla lecz także od „efektów towarzyszących”. Wynikać one mogą na przykład z nieekwipotencjalności elektrod (różne właściwości przewodzące kontaktów, sondy nie leżą dokładnie naprzeciw siebie), czy też z gradientu temperatury wzdłuż i w poprzek próbki (napięcia termoelektryczne). Mierzone napięcie na sondach poprzecznych U jest sumą napięcia Halla oraz napięć towarzyszących $U = U_H + U_z$

gdzie: U_H – napięcie Halla, U_z – napięcie efektów towarzyszących. Aby wydzielić jedynie interesujące nas napięcie U_H , pomiary przeprowadza się dla różnych konfiguracji zwrotów prądu i pola magnetycznego: $U_1: (+I, +B)$; $U_2: (-I, +B)$; $U_3: (-I, -B)$; $U_4: (+I, -B)$. Napięcie Halla jest równe:

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4}. \quad (10)$$

Należy zwrócić uwagę jak podłączony jest woltomierz, aby móc określić która strona próbki (C czy D na rys. 2) ma niższy potencjał.

III.5. Pomiar przewodnictwa i efektu Halla w zależności od temperatury.

W pomiarze przewodnictwa dla ustalonego prądu próbki i pola magnetycznego mierzymy jednocześnie spadek napięcia wzdłuż próbki (kontakty 5 i 6) oraz napięcie Halla (kontakty 3 i 4) w zależności od temperatury próbki. Pomiar wykonujemy odczytując temperaturę próbki na module sterująco-pomiarowym w trakcie powolnego grzania próbki, które realizujemy poprzez przykładanie coraz to większego napięcia na grzałkę. **Grzałka powinna być zasilana z gniazda 1 lub 2 (30V/3A) zasilacza w trybie źródła napięciowego (stabilizacja napięcia). UWAGA! Temperaturę zmienia się tylko poprzez zmianę napięcia przyłożonego do grzałki (napięcie na grzałce nie powinno przekroczyć 9 V). Nie należy zmieniać ustawień kontrolera temperatury w module sterująco-pomiarowym! Maksymalna dopuszczalna temperatura próbki to 150 °C.** W przypadku problemów z odczytaniem trzech wartości jednocześnie, zaleca się użycie funkcji HOLD na miernikach. Następnie wyłączamy grzanie próbki i wykonujemy analogiczne pomiary podczas powolnego stygnięcia próbki.

W zależności od wolnego czasu pomiar można powtórzyć zmieniając kierunek przepływu prądu i kierunek pola magnetycznego.

IV. Analiza wyników pomiarów

IV.1 Pomiar przewodnictwa i efektu Halla dla temperatury pokojowej

Na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej znajdujemy wartość oporu próbki, który przeliczamy na opór właściwy, a potem na przewodność, zatem mamy informację na temat iloczynu ruchliwości i koncentracji. Charakterystykę należy przedstawić na wykresie, skomentować, zrobić dopasowanie zależności liniowej w odpowiednim zakresie prądów.

Wartość koncentracji znajdujemy na podstawie zależności napięcia Halla od pola magnetycznego $U_H(B)$, znając wartość prądu płynącego przez półprzewodnik, oraz na podstawie zależności napięcia Halla od natężenia prądu płynącego przez próbkę $U_H(I)$, znając wartość natężenia pola magnetycznego w którym umieszczona była próbka. Napięcie Halla wyznaczamy zgodnie z przepisem z instrukcji dla każdego pola (natężenia prądu) niezależnie, a następnie rysujemy zależność $U_H(B)$ ($U_H(I)$). Obie zależności należy przedstawić na wykresie, skomentować, zrobić dopasowanie zależności liniowej, na podstawie której znajdujemy współczynnik Halla, a następnie koncentrację nośników. Ostatecznie koncentrację wyznaczamy jako wartość średnią z obu pomiarów. Na podstawie znaku napięcia Halla wyznaczamy typ nośników.

Znając koncentrację nośników oraz przewodność, wyznaczamy wartość ruchliwości nośników.

IV.2. Pomiar przewodnictwa i efektu Halla w zależności od temperatury.

Na jednym wykresie przedstawiamy zależność napięcia przewodnictwa i napięcia Halla od temperatury wyrażonej w kelwinach zarówno dla grzania jak i chłodzenia próbki. Następnie, należy wyznaczyć dla każdej temperatury przewodność, przedstawić na wykresie zależność $\ln(\sigma)$ od $1/T$ oraz wyznaczyć energię aktywacji nośników. Analogiczne wykresy należy wykonać dla koncentracji i ruchliwości nośników i odpowiednio skomentować.

Jeśli został wykonany pomiar dla różnych kierunków prądu płynącego przez próbkę lub kierunków pola magnetycznego, dla każdej serii należy wykonać dla nich osobne wykresy.

W każdym przypadku należy przeprowadzić stosowny rachunek niepewności. Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisanej więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów, a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.**

V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku bardzo dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

VI. Literatura uzupełniająca

- H. Szydłowski, Pracownia fizyczna, PWN 1994, 2003.
- H. Szydłowski, Pracownia fizyczna wspomagana komputerem, Warszawa 2003.
- S. Szczęniowski, Fizyka doświadczalna, cz. III, PWN 1966.
- H. Halliday, R. Resnick, Podstawy fizyki 3, PWN 2006.

VII. Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

1. Na czym polega efekt Halla. Zaznacz kierunek i zwrot siły, jeśli nośniki mają dodatni ładunek i poruszają się w kierunku zgodnym z osią x , a pole magnetyczne jest skierowane przeciwnie do osi z .
2. Przeprowadź tę analizę dla nośników o ładunku ujemnym – uzasadnij, że znak mierzonego napięcia daje informację o znaku ładunku.
3. Przez próbkę półprzewodnika płynie prąd o stałym natężeniu $I = 10 \mu\text{A}$. Spadek napięcia na niej wynosi $U = 10 \text{ mV}$. Pod wpływem przepływu prądu (efekt Joule'a) próbka ta nagrzała się i jej opór zmienił się o 20%. Jakie będzie napięcie na tej próbce po nagrzaniu się i ile wyniesie jej opór.
4. Koncentracja dziur w GaAs domieszkowanym Mn wynosi $1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. Jaka jest ruchliwość dziur w temperaturze pokojowej jeśli wartość przewodności wynosi $0,02 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.
5. Oszacuj jakiego napięcia Halla oczekujemy dla powyższego materiału w polu $B = 1 \text{ T}$, gdy grubość wykonanej z niego próbki wynosi 20 nm i płynie przez nią prąd o natężeniu $1 \mu\text{A}$.

Opracowały: Marta Borysiewicz, Aneta Drabińska, 2023 r.