

Zadanie 106 a, c

WYZNACZANIE PRZEWODNICTWA WŁAŚCIWEGO I STAŁEJ HALLA DLA PÓŁPRZEWODNIKÓW. WYZNACZANIE RUCHLIWOŚCI I KONCENTRACJI NOŚNIKÓW.

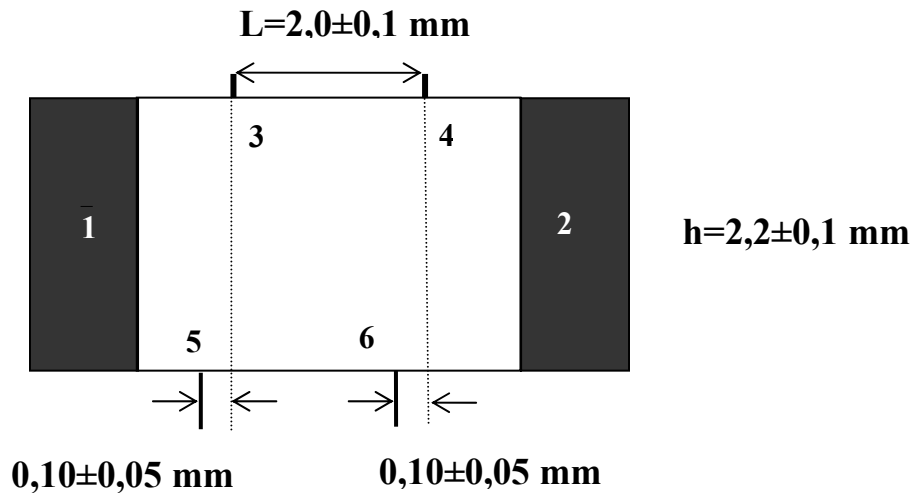
1. Elektromagnes
2. Zasilacz stabilizowany do elektromagnesu
3. Zasilacz stabilizowany próbki
4. Próbka **InAs** w uchwycie
5. Tablica z przełącznikami
6. Woltomierz cyfrowy
7. Miernik cyfrowy do pomiaru prądu elektromagnesu
8. Miernik cyfrowy do pomiaru prądu próbki

Próbka zasilana jest z zasilacza o stabilizowanym prądzie (napięcie ustawić niezbyt wysokie tak, by paliła się czerwona lampka).

Elektromagnes w czasie pracy może się grzać (co zmienia jego opór więc trzeba ciągle kontrolować prąd).

WYKONANIE ĆWICZENIA:

1. Z charakterystyki prądowo-napięciowej próbki znaleźć "optymalny" prąd próbki, tzn. dość duży, ale nie na tyle, by grzał próbkę.
2. Dla każdej pary sond hallowskich należy mierzyć napięcie dla wszystkich możliwych kombinacji kierunku B i I .
Pomiar wykonać dla prądu "optymalnego" i różnych wartości B.
3. Napięcie przewodnictwa (dla obu par sond przewodnictwa i obu kierunków prądu) wystarczy zmierzyć tylko dla "optymalnego" prądu próbki (B=0, próbkę trzeba wyjąć z elektromagnesu)
4. Przed wyłączeniem zasilaczy potencjometri **amperomierza** i **woltomierza** skrócić do **zera**.



Rys. 1. Rozmieszczenie kontaktów i wymiary próbek

grubość = $1,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$

1,2 - kontakty prądowe

3,4,5,6 - kontakty napięciowe

ZALEŻNOŚĆ INDUKCJI MAGNETYCZNEJ B OD NATĘŻNIA PRĄDU

I [A]	B [TESLA]
0,1	0,07
0,2	0,13
0,3	0,20
0,4	0,26
0,5	0,32
0,6	0,39

Literatura do zadania 106 a, c

H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna wspomagana komputerem*, Warszawa 2003. § 12.5;

INSTRUKCJA

ZADANIE 106

WYZNACZANIE STAŁEJ HALLA ORAZ WARTOŚCI PRZEWODNICTWA DLA PÓLPRZEWODNIKÓW

I WSTĘP

Przepływ prądu w danym półprzewodniku związany jest z ruchem nośników przenoszących ładunki elektryczne. W półprzewodnikach, zależnie od rodzaju domieszkowania, nośnikami ładunków mogą być ujemne elektrony lub dodatnie dziury.

Gęstość prądu w półprzewodnikach, czyli ładunek przepływający w jednostce czasu przez jednostkowy przekrój poprzeczny wynosi :

$$\vec{j} = qn \langle \vec{v} \rangle \quad (1)$$

gdzie:

- j - gęstość prądu,
- q – ładunek nośnika, q = +e – dla dziur, q = -e dla elektronów (e- ładunek elementarny),
- $\langle v \rangle$ - średnia prędkość elektronów (dziur) w kierunku pola elektrycznego, zwrot prędkości zależy od znaku ładunku,
- n - koncentracja nośników w 1m^3 .

Wartość średniej prędkości nośników jest proporcjonalna do wartości przyłożonego pola elektrycznego. Wprowadzając ruchliwość nośników zdefiniowaną jako prędkość w ruchu uporządkowanym uzyskaną pod wpływem pola elektrycznego o jednostkowym natężeniu:

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E} \quad (2)$$

gdzie:

- E - natężenie przyłożonego pola elektrycznego,
- μ - ruchliwość nośników (elektronów lub dziur),

otrzymamy

$$j = en\mu E \quad (3)$$

Z prawa Ohma wiadomo, że gęstość przepływającego prądu jest wprost proporcjonalna do natężenia przyłożonego pola elektrycznego i wynosi :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

gdzie:

σ - przewodnictwo właściwe

Z bezpośredniego porównania wzorów (3) i (4) otrzymamy:

$$\sigma = en\mu \quad (5)$$

Uzyskany związek wskazuje, że przewodnictwo właściwe półprzewodnika jest funkcją dwóch wielkości: **koncentracji nośników** i ich **ruchliwości**.

Wielkość przewodnictwa właściwego zależy przede wszystkim od koncentracji nośników, gdyż ruchliwości nośników dla różnych substancji nie różnią się zbyt znacznie. Obie te wielkości: koncentracja i ruchliwość nośników są funkcją temperatury.

W zależności od wielkości przewodnictwa tradycyjnie rozróżniamy:

przewodniki $\sigma > 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$,

dielektryki $\sigma < 10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$,

a ciała o σ zawarte pomiędzy $10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ a $10^{+6}\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ zaliczamy do półprzewodników. (Dla półprzewodników wartość przewodnictwa może ulegać zmianom wykraczającym poza podany powyżej zakres np. w zależności od domieszkowania i temperatury.)

Wielkość przewodnictwa właściwego można wyznaczyć bezpośrednio z prawa Ohma, natomiast koncentrację nośników jak również określenie, jaki rodzaj nośników bierze udział w przewodnictwie w danym materiale, można uzyskać poprzez pomiar współczynnika Halla.

Wyznaczanie wielkości przewodnictwa

Dla danej próbki półprzewodnika (są to na ogół monokryształy nie zawsze o dużych wymiarach) podobnie jak dla metali, znając rozmiary geometryczne próbki, można uzyskać wielkości przewodnictwa korzystając z prawa Ohma. Wówczas z definicji gęstości prądu

$$j = \frac{I}{S} \quad (6)$$

I - natężenie prądu płynącego przez próbkę,
S - przekrój poprzeczny próbki,

i wiedząc, że:

$$E = \frac{U}{l} \quad (7)$$

gdzie:

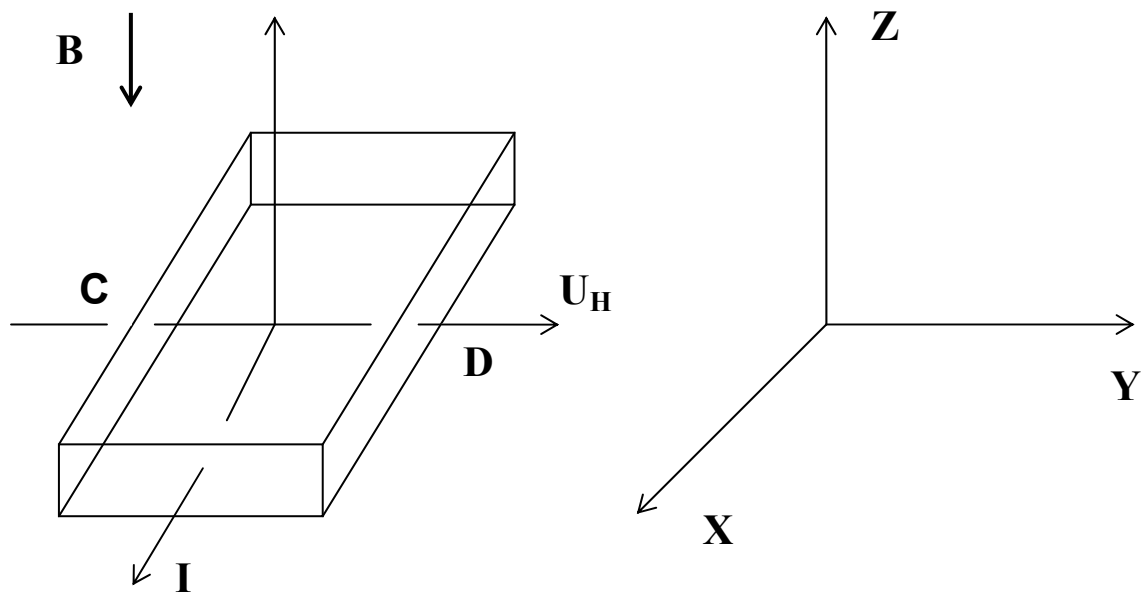
U – spadek napięcia wzdłuż próbki,
l - długość próbki (odległość między kontaktami),

oraz podstawiając (6) i (7) do (4) otrzymamy

$$\sigma = \frac{Il}{SU} \quad (8)$$

Efekt Halla

Płytkę o grubości d, wyciętą z badanego materiału umieszczamy w polu magnetycznym \vec{B} tak, by jej płaszczyzna była prostopadła do wektora indukcji magnetycznej \vec{B} .



Rys.1. Jeżeli przez płytkę wzdłuż jej długości przepuścić prąd elektryczny o natężeniu I , to między punktami C i D powstanie różnica potencjałów U_H - napięcie Halla. Znak tego napięcia zależy od znaku ładunku nośników.

Założmy że nośnikami prądu są dodatnie dziury. W polu elektrycznym E poruszają się one w kierunku zgodnym z kierunkiem pola. Na poruszające się w polu magnetycznym ładunki działa siła Lorentza:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (9)$$

gdzie:

q - ładunek nośnika,

\vec{v} - wektor prędkości nośników,

\vec{B} - wektor indukcji pola magnetycznego,

Pod wpływem tej siły następuje zakrzywienie torów dziur (w kierunku powierzchni z punktem C) co prowadzi do gromadzenia się ich na jednej powierzchni kryształu. Gromadzące się ładunki stają się źródłem poprzecznego pola elektrycznego. Proces ten trwa tak długo, aż powstałe pole elektryczne

$$E_y = \frac{U_H}{b} \quad (10)$$

gdzie:

U_H - napięcie Halla,

b - szerokość płytki,

spowoduje powstanie siły działającej na ładunek, która zrówna się z siłą Lorentza. Wówczas w stanie równowagi zgodnie z oznaczeniami na rys. 1 można napisać:

$$qE_y = q(v_x B_z) \quad (11)$$

W przypadku gdy nośnikami prądu są ujemne elektrony, we wzorze (9) zmianie ulegają znaki ładunku i prędkości poruszających się nośników (w polu elektrycznym E poruszają się one w kierunku przeciwnym do kierunku 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. Znak napięcia Halla (różnica potencjałów pomiędzy punktami C i D – rys. 1) jest zgodny ze znakiem nośników.

Korzystając z wprowadzonych poprzednio definicji natężenia i gęstości prądu (6) i (1) oraz z zależności (10) i wiedząc, że przekrój płytki, przez który płynie prąd I wynosi:

$$S = bd$$

gdzie:

b - szerokość płytki,

d - grubość płytki.

Otrzymamy związek między wielkością napięcia Halla a natężeniem płynącego prądu (I) i wielkością przyłożonego pola magnetycznego (B_z):

$$U_H = \frac{1}{qn} \frac{IB_z}{d} = R \frac{IB_z}{d} \quad (12)$$

gdzie współczynnik Halla:

$$R = \frac{1}{qn} \quad (13)$$

Pomiar wartości napięcia Halla pozwala wyznaczyć współczynnik Halla:

$$R = \frac{U_H d}{IB_z} \quad (14)$$

Jeżeli natężenie prądu I wyrażone jest w amperach [A] indukcja magnetyczna B w teslach [Wb/m²], grubość płytki d w metrach [m], a napięcia Halla U_H w woltach [V] to R współczynnik Halla wyraża się w [m³/A s] \equiv [m³/C].

Koncentracja nośników zgodnie z zależnością wynikającą z (13) dana jest wzorem:

$$n = \frac{1}{qR} = \frac{6.24}{|R|} 10^{18} [m^{-3}] \quad (15)$$

Podane wzory są słuszne wtedy, gdy w badanym materiale występują nośniki tylko jednego rodzaju (dziury lub elektrony). W przypadku mieszanego przewodnictwa wzór ten jest bardziej skomplikowany.

Znak napięcia Halla pozwala określić rodzaj nośników prądu. Znak U_H jest różny w zależności od tego, czy nośniki prądu są ujemne czy dodatnie. Półprzewodniki, w których prąd przewodzą ujemne elektrony ($R < 0$) zaliczamy do typu "n", te zaś w których prąd przewodzą dodatnie dziury ($R > 0$) - do typu "p".

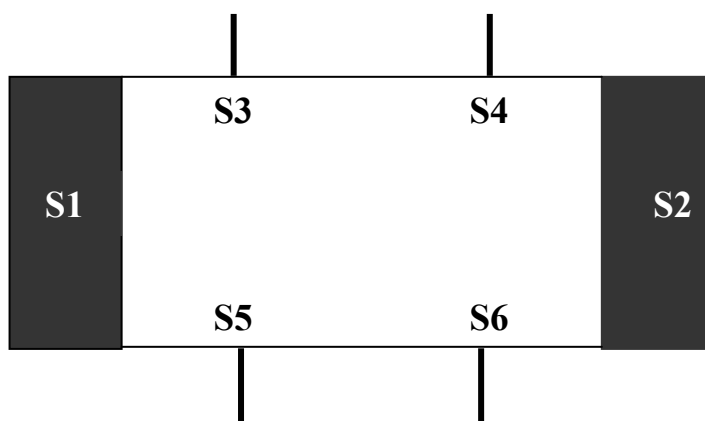
Znajomość przewodnictwa i stałej Halla pozwala określić ruchliwość nośników. Korzystając z zależności (5) otrzymamy

$$\mu_n = \frac{\sigma}{en} = \sigma |R| \quad (16)$$

II Wykonanie ćwiczenia

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

Do próbki półprzewodnika umieszczonej w uchwycie pomiarowym dociśnięte są sondy o bardzo małych wymiarach i o kontaktach omowych (rys.2).



Rys 2. Układ sond na próbce.

Sondy S_1 i S_2 służą do doprowadzenia prądu.

Pary sond S_3 i S_5 lub S_4 i S_6 służą do pomiaru napięcia Halla, a S_3 i S_4 lub S_5 i S_6 do pomiaru napięcia przewodnictwa.

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

Określenie optymalnych warunków pomiaru

Z charakterystyki prądowo-napięciowej próbki znaleźć "optymalny" prąd próbki tzn. dość duży, ale nie na tyle by grzał próbkę.

Pomiar efektu Halla

Wielkość napięcia Halla zależy m.in. od geometrii próbek. W celu zwiększenia napięcia Halla dąży się, aby grubość płytki d była jak najmniejsza. Na pozostałe wymiary płytki narzuca ograniczenia zaburzający wpływ kontaktów prądowych.

Sondy hallowskie (S_3 S_5 lub S_4 S_6) mierzą różnicę potencjałów U pochodzącą nie tylko od efektu Halla lecz także od efektów towarzyszących. Wynikać one mogą z nieekwipotencjalności elektrod (różne właściwości przewodzące kontaktów, sondy nie leżą dokładnie naprzeciw siebie) i z gradientu temperatury wzdłuż i w poprzek próbki (napięcia termoelektryczne).

Mierzone napięcie:

$$U = U_H + U_z \quad (17)$$

gdzie:

U_H - napięcie Halla,

U_z - napięcie efektów towarzyszących.

Aby wyeliminować błędy, pomiary przeprowadza się przy wszystkich możliwych kombinacjach kierunków prądu "I" oraz wartości pola magnetycznego B:

$$U_1 (+I, +B); \quad U_2 (-I, +B); \quad U_3 (-I, -B); \quad U_4 (+I, -B)$$

Należy zwrócić uwagę na prawidłowe podłączenie woltomierza mierzącego napięcie Halla, takie dla którego znak mierzonego napięcia U_1 będzie zgodny ze znakiem nośników.

Wypadkowe napięcie z tych czterech pomiarów da nam szukane napięcie Halla:

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} \quad (18)$$

Pomiar przewodnictwa właściwego

W pomiarze przewodnictwa mierzymy spadek napięcia wzdłuż próbki (sondy S3 S4, lub S5 S6) przepuszczając prąd pomiędzy sondami S1 i S2. Pomiar wykonujemy dla $B=0$ (próbkę trzeba wyjąć z elektromagnesu). W celu wyeliminowania dodatkowych napięć termoelektrycznych pomiar napięcia przewodnictwa wykonujemy dwukrotnie dla każdej pary sond, zmieniając kierunek przepływu prądu. Dla każdego pomiaru obliczamy wartość przewodnictwa właściwego korzystając ze wzoru (8), a następnie obliczamy wartość średnią.

Uwaga: Do pomiaru napięcia przewodnictwa nie wykorzystujemy sond S1 i S2 gdyż na nich, ze względu na przepływający przez nie prąd, występują dodatkowe spadki napięcia.

Literatura do zadania 106

H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna*, PWN 1994, 2003.

S. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna*, cz. III, PWN 1966.

H. Holliday, R Resnick, *Fizyka 2*, PWN 2001.