

Materiały Mikroelektroniki

Ćwiczenie 4

Pomiar ruchliwości nośników w półprzewodnikach

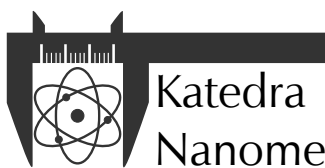
dr hab. inż. Tomasz Piasecki, prof uczelni (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Siła elektrodynamiczna
2. Nośniki mniejszościowe i większościowe w półprzewodnikach oraz podstawowe pojęcia z nimi związane
3. Zjawisko Halla
4. Metoda wyznaczania stałej Halla w strukturach prostokątnych i w strukturze Van der Pauwa
5. Pojęcia: rezystancja powierzchniowa, ruchliwość nośników
6. Typowe wartości i jednostki ruchliwości nośników oraz koncentracji nośników w domieszkowanych Si i GaAs (<http://www.ioffe.ru/SVA/NSM>)
7. Inne metody wyznaczania ruchliwości nośników w półprzewodnikach i dielektrykach (metody TOF, TVS)
8. Zadania obliczeniowe

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Pomiar przewodności elektrycznej metodą Van der Pauwa	1
1.2	Pomiar stałej Halla	2
2	Przebieg ćwiczenia	2
2.1	Wyznaczenie indukcji magnetycznej w szczelinie magnesu	3
2.2	Pomiar rezystancji powierzchniowej metodą Van der Pauwa	3
2.3	Wyznaczenie ruchliwości nośników oraz stałej Halla	4
3	Zadania obliczeniowe	5

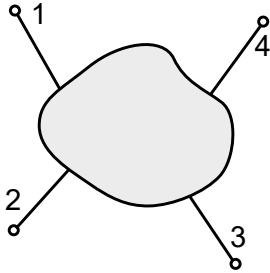


Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

Zjawisko Halla powinno być Ci znane z przedmiotu Przyrządy Półprzewodnikowe. Odśwież sobie wiedzę na jego temat i tego, jakie są jego przejawy w prostopadłościennych próbkach półprzewodnika umieszczonego w polu magnetycznym.

Zjawisko Halla wykorzystać można w różnego rodzaju półprzewodnikowych czujnikach pola magnetycznego. Oprócz tego przez to, że intensywność tego zjawiska zależy między innymi od ruchliwości nośników, przeprowadzenie eksperymentu z pomiarem efektu Halla w kontrolowanych warunkach pozwala na pośrednie wyznaczenie tego parametru półprzewodnika.



Rysunek 1: Przykładowy kształt widzianej z góry obszaru cienkowarstwowej próbki do pomiaru metodą Van der Pauwa.

Metoda van der Pauwa pozwala na pomiar szeregu parametrów elektrycznych próbki cienkowarstwowej o nieregularnym kształcie. Próbkę powinna spełniać założenia:

- próbka wytworzona jest w postaci cienkiej warstwy na nieprzewodzącym podłożu o grubości znacznie mniejszej od wymiarów planarnych,
- obszar badany może mieć dowolny obrys mający charakter kształtu wypukłego,
- 4 kontakty do próbki rozmieszczone są na obwodzie próbki i jak najbardziej zbliżone do kontaktów punktowych.

Przykładowa struktura Van der Pauwa została przedstawiona na rysunku. Jej wyprowadzenia ponumerowane są odwrotnie do ruchu wskazówek zegara.

1.1 Pomiar przewodności elektrycznej metodą Van der Pauwa

Rezystancję dwukońcówkowego elementu elektronicznego można wyznaczać poprzez pomiar proporcji napięcia i prądu. W metodzie Van der Pauwa przepływ prądu wymusza się pomiędzy dwoma osobnymi wyprowadzeniami struktury a napięcie mierzy pomiędzy dwoma pozostałymi kontaktami. Oznaczając przez a i b numery kontaktów prądowych a c i d numery kontaktów napięciowych to przez $R_{ab,cd}$ oznacza się:

$$R_{ab,cd} = \frac{U_{cd}}{I_{ab}} \quad (1)$$

gdzie U_{cd} to napięcie pomiędzy kontaktami c i d a I_{ab} to natężenie prądu płynącego pomiędzy kontaktami a i b . Przykładowo, przy pomiarze $R_{12,34}$ prąd przepuszcza się pomiędzy kontaktami 1 i 2 natomiast napięcie mierzone jest pomiędzy kontaktami 3 i 4.

Pomiar rezystancji powierzchniowej w metodzie Van der Pauwa wymaga wyznaczenia rezystancji R_{poz} i R_{pion} według poniższych wzorów:

$$R_{poz} = \frac{R_{23,41} + R_{41,23}}{2} \quad (2)$$

$$R_{pion} = \frac{R_{12,34} + R_{34,12}}{2} \quad (3)$$

a następnie zastosowanie równania Van der Pauwa:

$$e^{-\pi \frac{R_{pion}}{R_s}} + e^{-\pi \frac{R_{poz}}{R_s}} = 0 \quad (4)$$

gdzie R_s to szukana rezystancja powierzchniowa.

Równanie to nie ma ogólnego rozwiązania analitycznego. W przypadku gdy $R_{poz} = R_{pion} = R$ to (4) upraszcza się do:

$$R_s = \frac{\pi \cdot R}{\ln 2} \quad (5)$$

Podobnie można postąpić, gdy R_{poz} i R_{pion} różnią się nieznacznie. Za R podstawić można ich średnią i obliczyć R_s z niewielkim błędem.

Rezystywność ρ materiału cienkiej warstwy o grubości d czy jej przewodność σ jest powiązana z rezystancją powierzchniową tej warstwy równaniem:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R_s \cdot d \quad (6)$$

1.2 Pomiar stałej Halla

Pomiar należy zacząć od wyznaczenia napięcia Halla. Próbkę polaryzuje się zadany prąd pomiędzy parą przeciwległych kontaktów, czyli przykładowo pomiędzy kontaktami 1 i 3. Prąd ten oznaczmy I_{13}

Napięcia mierzy się dla pozostałych dwu kontaktów, w naszym przykładzie 2 i 4 dwukrotnie, za każdym razem stosując pole magnetyczne o takiej samej wartości indukcji magnetycznej B ale o przeciwnym znaku. Napięcie Halla U_H będzie połową różnicy tych dwu napięć:

$$U_H = \frac{U_{24B+} - U_{24B-}}{2} \quad (7)$$

Pomiar przeprowadzany w ten sposób powoduje wyeliminowanie wpływu braku symetrii próbki, która powoduje pojawienie się niezerowego napięcia U_{24} również przy braku pola magnetycznego.

Znając napięcie Halla można wyznaczyć stałą Halla:

$$R_H = \frac{d}{B} \cdot \frac{U_H}{I_{13}} \quad (8)$$

Znając z kolei stałą Halla wyznaczyć można koncentrację nośników:

$$N = \frac{1}{R_H \cdot q} \quad (9)$$

oraz ruchliwość nośników:

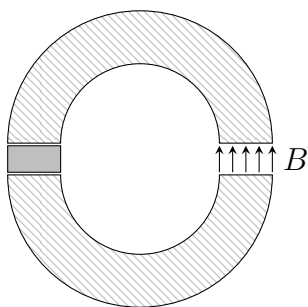
$$\mu = R_H \cdot \sigma \quad (10)$$

2 Przebieg ćwiczenia

Program ćwiczenia obejmuje:

- pomiar indukcji magnetycznej pomiędzy nabiegunnikami magnesu służącego jako źródło pola magnetycznego,
- pomiar rezystancji powierzchniowej metodą Van der Pauwa
- pomiar stałej Halla metodą Van der Pauwa

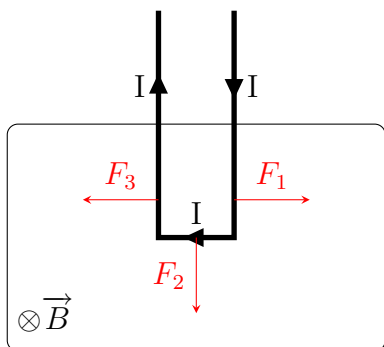
2.1 Wyznaczenie indukcji magnetycznej w szczelinie magnesu



Rysunek 2: Schematyczne przedstawienie układu magnetycznego.

W ćwiczeniu jako źródło pola magnetycznego wykorzystany jest neodymowy magnes stały z dwoma półokrągłymi nabiegownikami wykonanymi ze stopu Permaloj. Widok z góry na układ magnetyczny pokazano na rysunku 2. Układ magnetyczny zamontowany jest na podstawce z pokrywą i miejscem na obrotowe umieszczenie próbki. Otwórz pokrywę i obejrzyj układ magnetyczny. Zidentyfikuj magnes, zaznaczony na rysunku kolorem szarym, i nabiegunki, na rysunku zakreskowane. Linie sił pola magnetycznego w szczelinie pomiędzy nabiegownikami biegną poprzecznie do obwodu magnetycznego.

Indukcję magnetyczną wyznaczyć należy mierząc siłę elektrodynamiczną działającą na przewodnik, przez który płynie znany prąd. Służy do tego odpowiednio dostosowana waga szalkowa. Prawa szalka wagi została zmodyfikowana. Umieszczono pod nią uchwyt ze zwojami przewodu ukształtowanymi w formie ramki, przez który można przepuścić prąd. Siły elektrodynamiczne działające na poszczególne odcinki pojedynczego zwoju przewodnika przedstawiono na rysunku 3. Siły elektrodynamiczne F_1 i F_3 równoważą się i nie wpływają na wagę, która wrażliwa jest wyłącznie na siłę skierowaną pionowo. Siła elektrodynamiczna F_2 jest możliwa do zmierzenia jako zmiana ciężaru szalki.



Rysunek 3: Siły działające na jeden zwoj umieszczony częściowo w polu magnetycznym.

Procedura pomiarowa:

- określ liczbę zwojów nawiniętych na ramkę jak też długość poziomego odcinka każdego ze zwojów,
- umieść obwód magnetyczny bez pokrywy na wadze tak, aby ramka ze zwojami znalazła się w szczelinie magnesu i nie dotykała nabiegowników,
- upewnij się, że waga jest w równowadze przy braku przepływu prądu,
- obciąży lewą szalkę ciężarkiem o wskazanej masie,
- doprowadź ponownie wagę do równowagi regulując natężeniem prądu w zasilaczu laboratoryjnym pracującym z ograniczeniem prądowym.

Pomiar należy przeprowadzić dla obciążeń wskazanych przez prowadzącego, przykładowo 1 g, 2 g, 3 g. Ciężarki przenoś za pomocą pęsety. Dla każdego z prądów wyznaczyć siłę

oddziałującą na przewodnik. Sporządź wykres wartości siły od natężenia prądu płynącego przez przewodnik. Z nachylenia prostej dopasowanej do punktów wykresu wywnioskuj ile wynosi wartość indukcji magnetycznej¹. Trzeba pamiętać o uwzględnieniu długości odcinka na który działa mierzona siła oraz liczby zwojów drutu.

2.2 Pomiar rezystancji powierzchniowej metodą Van der Pauwa

Pomiar rezystancji powierzchniowej metodą Van der Pauwa opisano w punkcie 1.1. Procedura pomiaru rezystancji wskazanych w tej metodzie przebiega następująco:

1. Dla bezpieczeństwa próbki ustal ograniczenie prądowe w zasilaczu laboratoryjnym na wartość 1 mA.

¹Nie będzie to zależność bezpośrednia. Należy postępować podobnie jak przy analogicznych problemach rozwiązywanych na zajęciach wstępnych z obróbki danych pomiarowych.

2. Zidentyfikuj wyprowadzenia próbki, są one oznaczone liczbami, jak na rysunku 1.
3. Zestaw układ wymuszający przepływ prądu pomiędzy zaciskami prądowymi próbki. Układ ten zawierać ma zasilacz, jeden multimetr w roli amperomierza i próbkę. Użyj do jego zestawienia przewodów czerwonych. Dołączenie się do próbki może wymagać przewodów specjalnych, wskaże je prowadzący.
4. Wyreguluj napięcie na zasilaczu tak, aby przez próbkę płynął wskazany przez prowadzącego prąd, na przykład 0.2 mA, 0.5 mA czy 1 mA.
5. Zestaw układ pomiaru napięcia pomiędzy zaciskami napięciowymi próbki. Wykorzystaj do tego drugi multimetr pracujący jako woltomierz. Użyj do jego zestawienia czarnych przewodów.
6. Oblicz wartość rezystancji. Weź pod uwagę wyłącznie wartości bezwzględne mierzonych napięć i prądów, wartości ujemne wskazują jedynie na odwrotne dołączenie pary przewodów napięciowych lub prądowych.

Używając powyższej procedury zmierz rezystancje $R_{23,41}$, $R_{41,23}$, $R_{12,34}$, $R_{34,12}$. Następnie kierując się opisem metody z punktu 1.1 oblicz rezystancję powierzchniową R_s . Zapytaj prowadzącego o grubość cienkiej warstwy w próbce po czym wylicz rezystywność ρ i konduktywność σ cienkiej warstwy próbki.

2.3 Wyznaczenie ruchliwości nośników oraz stałej Halla

W pomiarach tych używany będzie obwód magnetyczny przykryty pokrywą tak, aby obrotowe łożo dla próbki znalazło się w szczelinie nabiegunników. Kąt wskazywany na skali to kąt pomiędzy liniami sił pola a płaszczyzną próbki. Gdy wynosi on 90° lub -90° wtedy pole magnetyczne zorientowane jest prostopadłe do próbki a jego indukcja wynosi tyle, ile określono na początku ćwiczenia. Dla innych kątów składowa prostopadła indukcji magnetycznej $B_\perp$ będzie odpowiednio mniejsza.

Używając układu pomiarowego bardzo podobnego jak w punkcie poprzednim. Wymuś przepływ prądu przez przeciwległe wyprowadzenia 1 i 3 a napięcie mierz na wyprowadzeniach po-przecznych do przepływu prądu, czyli 2 i 4.

Umieścić próbkę w polu magnetycznym. Zmierz wartości prądów I_{13} i napięć U_{24} dla kątów z przedziału od 90° do -90° . Wyniki zapisz w tabeli w postaci:

kąt	I_{13}	U_{24}	kąt	I_{13}	U_{24}	$B_\perp$	I	U_H	$\frac{U_H}{I}$
90			-90						
80			-80						
70			-70						
60			-60						
50			-50						
40			-40						
30			-30						
20			-20						
10			-10						
0			-						

Uzupełnij nagłówek tabeli o jednostki. Zapisuj w jednym wierszu tabeli wyniki dla dodatniego i ujemnego kąta o tej samej wartości bezwzględnej.

Następnie dla każdego wiersza tabeli:

1. oblicz wartość składowej prostopadłej indukcji magnetycznej $B_\perp$ bazując na zmierzonej wcześniej wartości B i kącie,
2. oblicz I jako średnią prądu dla dodatniego i ujemnego kąta,

3. oblicz napięcie Halla U_H zgodnie z (7),
4. oblicz $\frac{U_H}{I}$.

Następnie sporządź wykres $\frac{U_H}{I} = f(B_{\perp})$. Punkty na nim powinny utworzyć linię prostą. Bazując na parametrach prostej dopasowanej do tych punktów oraz równaniu (8) wyznacz stałą Halla². Na podstawie stałej Halla oblicz koncentrację i ruchliwość nośników w próbce z zależności (9) i (10).

3 Zadania obliczeniowe

1. Wyznaczyć rezystywność półprzewodnika typu n o ruchliwości elektronów $1200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}$ i koncentracji nośników większościowych $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.
2. Jaka jest ruchliwość dziur w półprzewodniku, który dla koncentracji dziur wynoszącej $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ma przewodność 16 S cm^{-1} ?
3. Jaka siła działa na przewodnik o długości 15 cm, w którym płynie prąd 2 A, a indukcja magnetyczna wynosi 0.3 T?

Literatura

- [1] M. Kowtoniuk, A. Koncewoj, Pomiary parametrów materiałów półprzewodnikowych, Warszawa 1973
- [2] W. Marciniak, Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Pauw_method
- [4] D.K. Schroeder., Semiconductor material and device characterization, 2nd ed. Wiley&Sons, Inc., New York, 1998
- [5] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM>

²Znowu powiązanie R_H z parametrami prostej nie jest bezpośrednie i potrzebna będzie umiejętność ćwiczona na zajęciach wstępnych. Przekształć (8) tak, aby utworzyło ono równanie w postaci $Y = \text{slope} \cdot X + \text{intercept}$, gdzie Y oraz X to wielkości na osiach wykresu.