

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Marysia Nazarczuk

Nr albumu: 417755

WYZNACZANIE RUCHLIWOŚCI I KONCENTRACJI NOŚNIKÓW W PÓŁPRZEWODNIKU

Streszczenie

Celem doświadczenia było zbadanie charakterystyki prądowo-napięciowej oraz zbadanie efektu Halla. Na podstawie pomiarów zebranych w dwóch doświadczeniach otrzymaliśmy wartość przewodnictwa materiału $\sigma = (41.69 \pm 4.31) \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right]$, stałą Halla $R_H = -(5.89 \pm 0.59) \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{C}} \right]$, koncentrację nośników $n = (1.06 \pm 0.08) \times 10^{21} \left[\frac{1}{\text{m}^3} \right]$ oraz ruchliwość nośnika $\mu = (0.246 \pm 0.031) \left[\frac{\text{m}^2}{\Omega \cdot \text{C}} \right]$. Praca została przygotowana zgodnie z instrukcją [1].

Warszawa, Czerwiec 2024

Spis treści

1. Wstęp teoretyczny	5
2. Charakterystyka prądowo-napięciowa	7
2.1 Układ doświadczalny	7
2.2 Przeprowadzenie doświadczenia	8
2.3 Analiza pomiarów	8
2.4 Wyniki, niepewności, wnioski	9
2.4.1 Wyniki	9
2.4.2 Niepewności	9
2.4.3 Wnioski	9
3. Efekt Halla	11
3.1 Układ doświadczalny	11
3.2 Przeprowadzenie doświadczenia	12
3.3 Analiza pomiarów	13
3.4 Wyniki, niepewności, wnioski	14
3.4.1 Wyniki	14
3.4.2 Niepewności	14
3.4.3 Wnioski	14
4. Podsumowanie	15
Bibliografia	17

1. Wstęp teoretyczny

Zależność pomiędzy przyłożonym napięciem U a prądem I , opisuje prawo Ohma: $U = RI$. Wartość oporu R zależy od oporu właściwego materiału ρ oraz jego geometrii: $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ gdzie S to przekrój próbki, a l to jej długość. Znając wartość prądu, spadek napięcia i geometrię próbki, można wyznaczyć przewodnictwo materiału

$$\sigma = \frac{Il}{US} \quad (1.1)$$

Efekt Halla jest kluczowym zjawiskiem pozwalającym na wyznaczenie koncentracji nośników ładunku w półprzewodniku. Polega on na pojawieniu się poprzecznego napięcia U_H w próbce umieszczonej w polu magnetycznym B , gdy przez próbkę płynie prąd. Jest to wynikiem działania siły Lorentza na poruszające się nośniki ładunku

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.2)$$

Gromadzenie się ładunków na jednej z powierzchni próbki prowadzi do powstania poprzecznego pola elektrycznego E_y , które równoważy siłę Lorentza w stanie stacjonarnym $qE_y = q(v_x B_z)$. Różnica potencjałów wynikająca z tego pola to napięcie Halla U_H , które pozwala na wyznaczenie koncentracji nośników n za pomocą zależności

$$U_H = \frac{IB}{nqh} \quad (1.3)$$

gdzie n to koncentracja nośników, zaś h to grubość płytki – wymiar w kierunku pola magnetycznego. Wielkość $R_H = \frac{1}{nq}$ definiuje się jako stałą Halla i jest ona zgodna ze znakiem nośników ładunku. Koncentracja nośników dana jest wzorem:

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{6.24}{|R_H|} \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{m}^3} \quad (1.4)$$

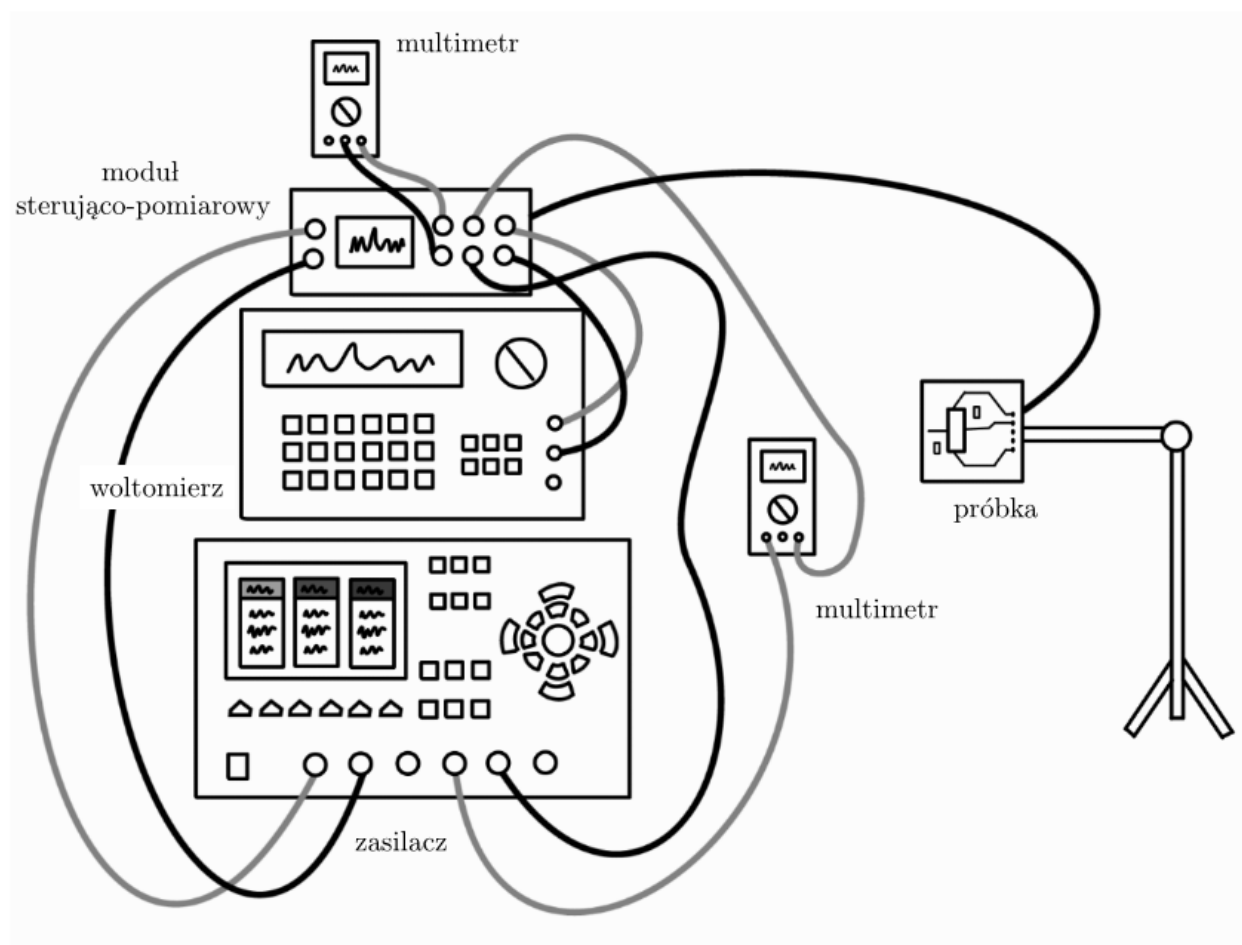
Półprzewodniki to materiały, których właściwości elektryczne można kontrolować poprzez domieszkowanie, czyli wprowadzanie do sieci krystalicznej atomów o innej liczbie elektronów walencyjnych niż atomy bazowe. Elektrony w kryształach półprzewodnika mogą przechodzić pomiędzy dyskretnymi poziomami energetycznymi tworzącymi pasma, przy czym kluczową rolę odgrywa przerwa energetyczna pomiędzy nimi. W półprzewodnikach domieszkowanych, obecność donorów i akceptorów wpływa na koncentrację i ruchliwość nośników ładunku, co bezpośrednio przekłada się na ich przewodnictwo.

2. Charakterystyka prądowo-napięciowa

Wykonaliśmy dwa układy doświadczalne. Pierwszym z nich będzie doświadczenie o nazwie "Charakterystyka prądowo-napięciowa". Jego celem będzie zbadanie zależności napięcia na kontaktach podłużnych od prądu oraz określenie optymalnego prądu dla pomiaru efektu Halla.

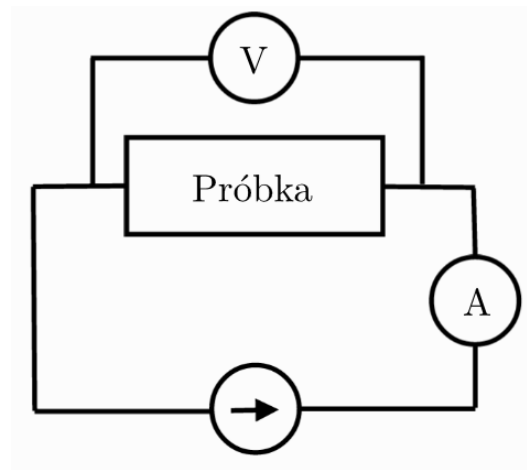
2.1. Układ doświadczalny

Poniżej znajduje się układ doświadczalny dla danego eksperymentu. Próbkę domieszkowanego półprzewodnika **Ge** zamocowano w uchwycie wyposażonym w grzałkę i czujnik temperatury. Próbka podłączona jest do modułu sterująco-pomiarowego, który z kolei podłączony jest do woltomierza, multimetru (mierzącego napięcie) oraz zasilacza z jednej strony zawierającego multimetr (mierzący natężenie).



Rysunek 2.1: Układ pomiarowy do pomiaru napięcia i natężenia.

Aby zmierzyć napięcie na próbce oraz natężenie prądu, użyjemy obwodu elektrycznego, którego schemat znajduje się na rysunku 2.2. Strzałka wskazuje kierunek przepływu prądu.



Rysunek 2.2: Schemat obwodu elektrycznego

2.2. Przeprowadzenie doświadczenia

Wykonaliśmy 18 pomiarów natężenia prądu i napięcia na próbce. Niepewność pomiaru natężenia wynosi $u(I) = 0.05$ mA, zaś niepewność pomiaru napięcia wynosi $u(U) = 0.1$ mV.

Tabela 2.1

Napięcie [mV]	Natężenie [mA]
30.6	0.64
73.3	1.63
124.0	2.62
174.1	3.64
207.1	4.70
225.2	4.71
317.8	6.72
369.8	7.74
414.0	8.67
500.0	10.60
559.0	11.70
649.0	13.59
751.0	15.72
843.0	17.65
939.0	19.65
1029.0	21.57
1126.0	23.58
1268.0	26.47

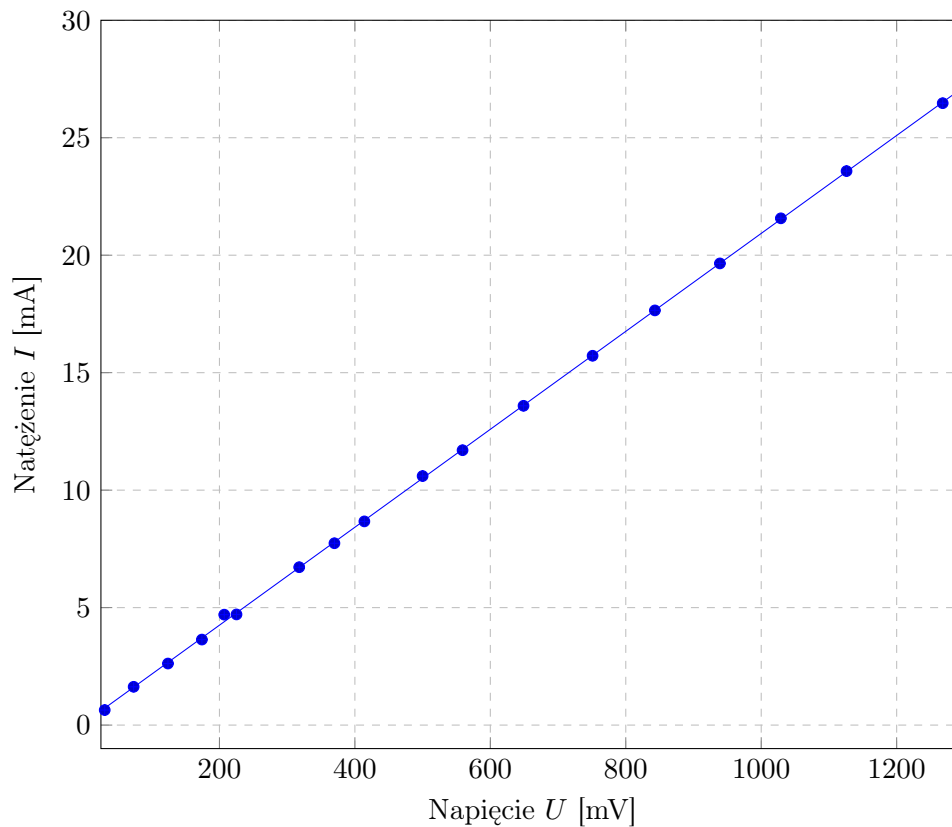
Badana próbka miała wymiary $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, przy czym jej długość to $l = 20$ mm.

2.3. Analiza pomiarów

Charakterystykę prądowo-napięciową próbki zbadamy dopasowując zależność liniową natężenia od napięcia

$$I = a \cdot V + b \quad (2.1)$$

Wartość współczynników a oraz b wyznaczono przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.



Rysunek 2.3: Wykres zależności natężenia od napięcia dla próbki

W celu wyznaczenia przewodnictwa materiału, skorzystamy ze wzoru 1.1 otrzymując

$$\sigma = (41.69 \pm 4.31) \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right] \quad (2.2)$$

2.4. Wyniki, niepewności, wnioski

2.4.1. Wyniki

Uzyskaliśmy wartość przewodnictwa materiału

$$\sigma = (41.69 \pm 4.31) \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right] \quad (2.3)$$

2.4.2. Niepewności

Głównym źródłem niepewności wyniku jest dokładność zebranych danych. Na niepewności mogło też wpłynąć to, że gęstość prądu mogła podlegać fluktuacjom. Współczynnik b w zależności liniowej 2.1 różny jest od zera i jest to stała fenomenologiczna.

2.4.3. Wnioski

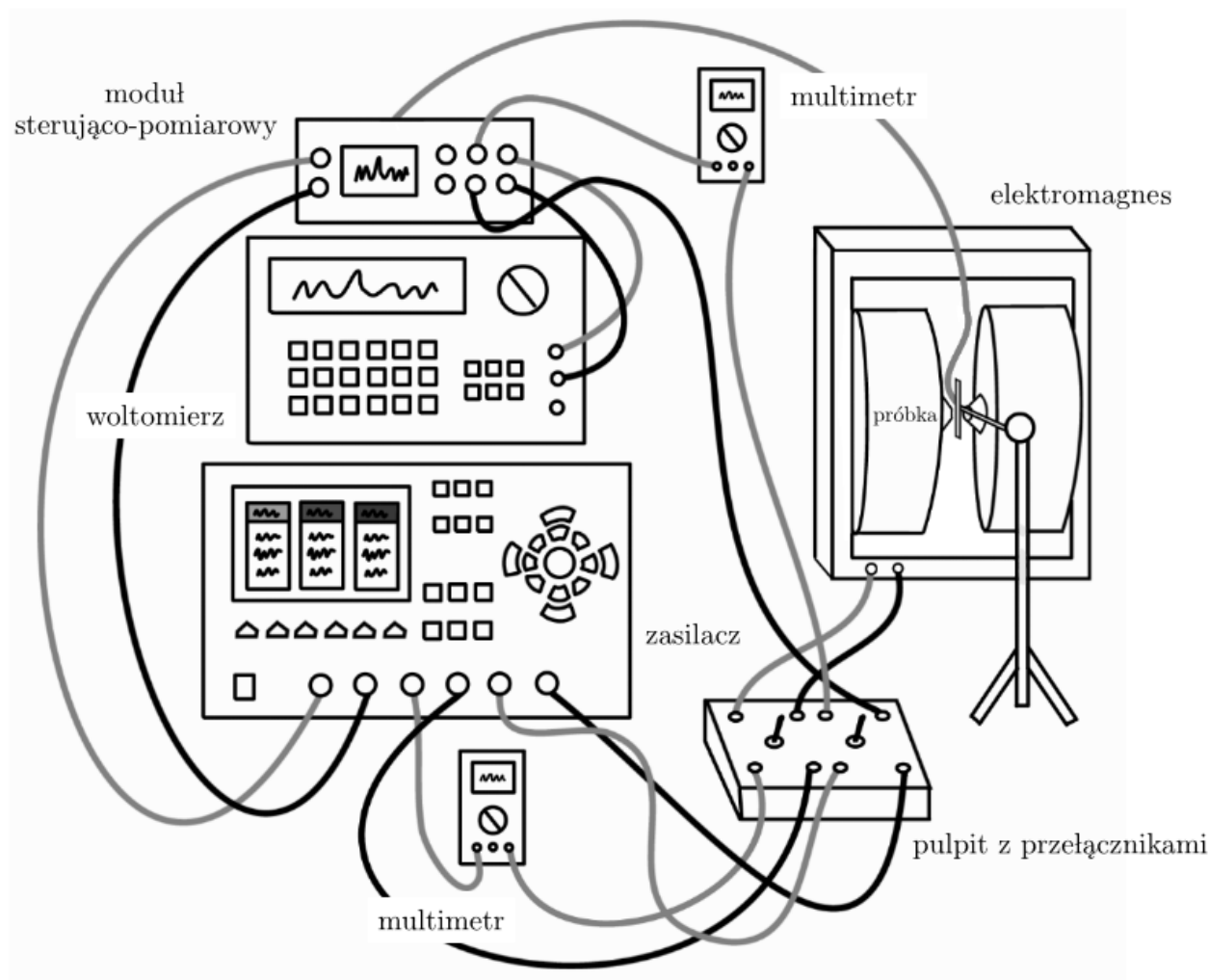
Zgodnie z modelem teoretycznym, uzyskana zależność natężenia od napięcia jest liniowa. Ponadto wyznaczoną wartość uzyskanego przewodnictwa materiału można uznać za poprawną.

3. Efekt Halla

Drugie doświadczenie ma nazwę "Efekt Halla". Jego celem będzie wyznaczenia stałej Halla R_H , a także koncentrację n i ruchliwość μ nośników.

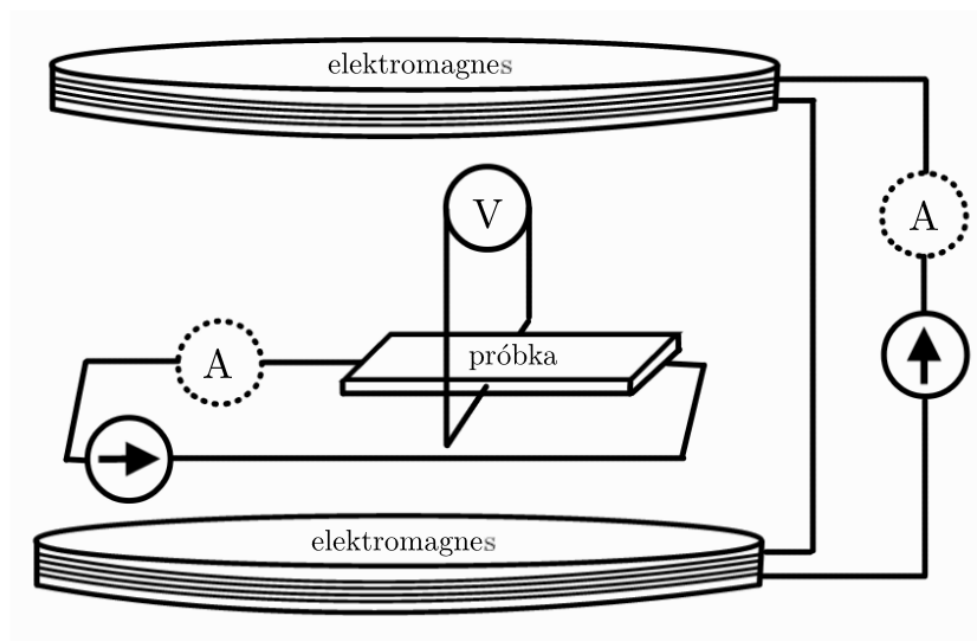
3.1. Układ doświadczalny

Poniżej znajduje się układ doświadczalny dla danego eksperymentu. Próbkę domieszkowanego półprzewodnika Ge zamocowano w uchwycie wyposażonym w grzałkę i czujnik temperatury. Następnie ustawiono próbkę pomiędzy talerze elektromagnesu. Próbka podłączona jest do modułu sterująco-pomiarowego, który z kolei podłączony jest do woltomierza, zasilacza oraz, przechodząc przez multimetr (mierzący natężenie), połączony jest pulpitu z przełącznikami. Elektromagnes połączony jest do pulpitu z przełącznikami, który przechodząc przez multimetr (mierzący natężenie), połączony jest z zasilaczem.



Rysunek 3.1: Układ pomiarowy do pomiaru napięcia na próbce oraz natężenia w dwóch obwodach.

Aby zmierzyć napięcie na próbce oraz natężenia prądu w układzie z próbką oraz w układzie z elektromagnesem, użyjemy dwóch obwodów elektrycznych, których schemat znajduje się na rysunku 3.2. Strzałki wskazują kierunek przepływu prądu, który można zmieniać w trakcie doświadczenia.



Rysunek 3.2: Schemat obwodu elektrycznego

3.2. Przeprowadzenie doświadczenia

Przeprowadzono trzy serie pomiarów, z których każda składała się z dziesięciu punktów pomiarowych. W pierwszej serii przez próbkę przepływał prąd o natężeniu 10 mA, zaś w drugiej o natężeniu 5 mA. W trzeciej serii prąd płynący przez elektromagnes był stały i wynosił 0.5 A, natomiast prąd przepływający przez próbkę zmieniał się w zakresie od 0 do 15 mA. Kierunek indukcji pola magnetycznego sprawdzano za pomocą igły magnetycznej. Dla każdej serii pomiarów, aby wydzielić jedynie napięcie U_H , pomiary przeprowadzono dla różnych konfiguracji zwrotów prądu i pola magnetycznego. Napięcie Halla jest równe wówczas średniej arytmetycznej z wartości bezwzględnej uzyskanych napięć. Zebrane wyniki dla każdej serii zostały umieszczone w tabelach 3.1, 3.2 oraz 3.3.

Tabela 3.1: Seria 1

U [mV]	I [mA]
2.528	64
3.102	100
4.275	149
6.104	199
7.760	249
9.173	295
10.643	348
12.344	402
13.706	448
15.193	498

Tabela 3.2: Seria 2

U [mV]	I [mA]
0.892	51
1.411	80
2.744	171
3.677	248
4.401	298
4.943	326
5.610	373
6.571	448
7.133	489
7.307	496

Tabela 3.3: Seria 3

U [mV]	I [mA]
2.324	1.46
5.896	3.52
7.312	4.54
8.769	5.43
10.605	6.57
13.756	8.53
15.374	9.55
18.635	11.53
21.721	13.44
23.347	14.46

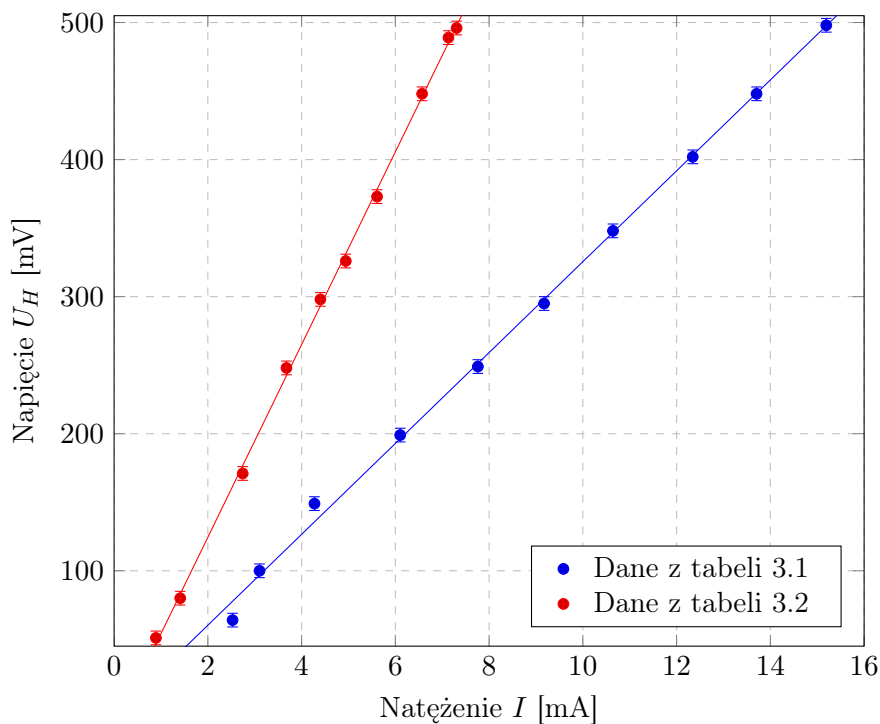
Niepewność pomiaru natężenia wynosi $u(I) = 5$ mA dla pierwszych dwóch serii oraz 0.05 mA dla trzeciej serii. Niepewność pomiaru napięcia wynosi $u(U) = 0.015$ mV. Badana próbka miała wymiary 20 mm \times 10 mm \times 1 mm, przy czym jej długość to $l = 20$ mm.

3.3. Analiza pomiarów

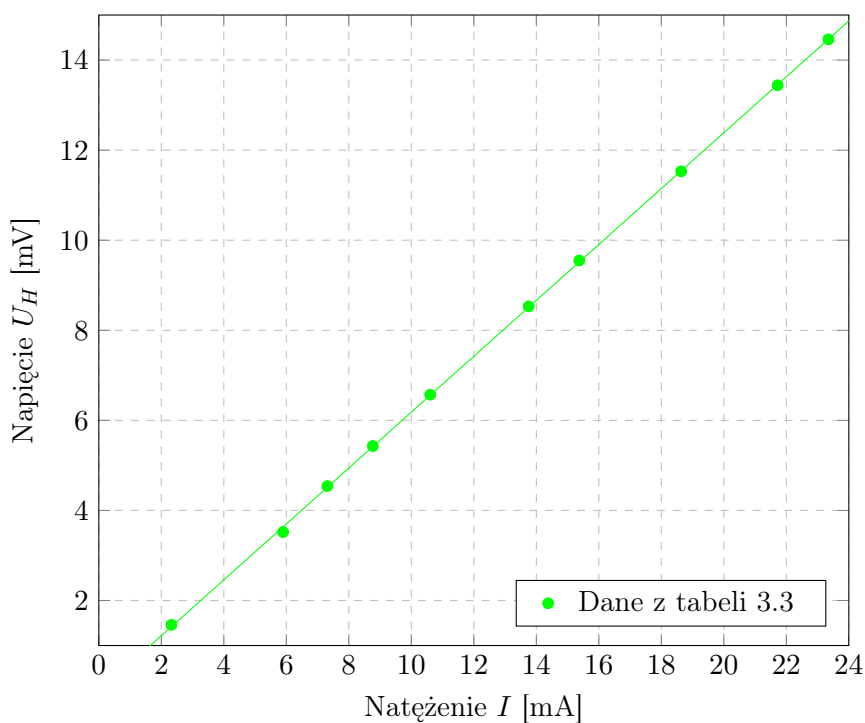
Na podstawie zebranych danych z tabel 3.1 i 3.2 oraz 3.3 sporządzamy wykresy liniowej zależności napięcia U_H od natężenia I

$$U_H = a \cdot I + b \quad (3.1)$$

Współczynniki prostych wyznaczamy używając metody najmniejszych kwadratów.



Rysunek 3.3: Wykres zależności napięcia od natężenia dla próbki dla pierwszej i drugiej serii pomiarów.



Rysunek 3.4: Wykres zależności napięcia od natężenia dla próbki dla trzeciej serii pomiarów

Przekształcając wzór 1.3, możemy uzyskać wzór na wartość stałej Halla $R_H = \frac{U_H \cdot h}{IB}$. Wartość indukcji magnetycznej B wyznaczymy korzystając ze wzoru $B = A \cdot I$, gdzie A jest stałą zależną od rodzaju elektromagnesu $A = 0.547 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. Otrzymujemy

$$R_H = -(5.89 \pm 0.59) \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{C}} \right] \quad (3.2)$$

Koncentrację nośników wyliczymy używając wzoru 1.4. Otrzymujemy

$$n = (1.06 \pm 0.08) \times 10^{21} \left[\frac{1}{\text{m}^3} \right] \quad (3.3)$$

Wyliczona wartość przewodnictwa materiału $\sigma = (41.69 \pm 4.31) \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right]$ zawiera informacje o iloczynie μ oraz n . Zależność ta opisana jest wzorem $\sigma = \mu \cdot n \cdot |q|$, zatem wartość ruchliwości wynosi

$$\mu = (0.246 \pm 0.031) \left[\frac{\text{m}^2}{\Omega \cdot \text{C}} \right] \quad (3.4)$$

3.4. Wyniki, niepewności, wnioski

3.4.1. Wyniki

Uzyskaliśmy wyniki:

- Stała Halla $R_H = -(5.89 \pm 0.59) \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{C}} \right]$
- Koncentracja nośników $n = (1.06 \pm 0.08) \times 10^{21} \left[\frac{1}{\text{m}^3} \right]$
- Ruchliwość nośnika $\mu = (0.246 \pm 0.031) \left[\frac{\text{m}^2}{\Omega \cdot \text{C}} \right]$

3.4.2. Niepewności

Głównym źródłem niepewności wyniku jest dokładność zebranych danych. Na niepewności mogło też wpłynąć to, że gęstość prądu mogła podlegać fluktuacjom oraz zakłócenia pola magnetycznego elektromagnesu przez inne urządzenia elektryczne znajdujące się w pobliżu. Współczynnik b w zależności liniowej 3.1 różny jest od zera i jest to stała fenomenologiczna.

3.4.3. Wnioski

Analizując wyniki oraz badając znak napięcia U_H możemy wywnioskować, że półprzewodnik był typu n . Wykonano test χ^2 dla dopasowania prostych do wykresów z rysunków 3.3 oraz 3.4. Otrzymano odpowiednio $\chi^2=0.02$, $\chi^2=0.004$ oraz $\chi^2=0.08$, co przy poziomie istotności 0.05 i 2 stopniach swobody nie pozwala nam odrzucić hipotezy.

4. Podsumowanie

W eksperymencie zbadano charakterystykę prądowo-napięciową. Stwierdzono, że zgodnie z modelem teoretycznym, zależność ta jest liniowa. Ustalono również zależność liniową napięcia od natężenia przy badaniu efektu Halla. Wyzaczyliśmy wartość przewodnictwa materiału $\sigma = (41.69 \pm 4.31) \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right]$, stałą Halla $R_H = -(5.89 \pm 0.59) \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{C}} \right]$, koncentrację nośników $n = (1.06 \pm 0.08) \times 10^{21} \left[\frac{1}{\text{m}^3} \right]$ oraz ruchliwość nośnika $\mu = (0.246 \pm 0.031) \left[\frac{\text{m}^2}{\Omega \cdot \text{C}} \right]$. Badana próbka jest półprzewodnikiem typu n , zatem nośnikami są elektrony.

Głównymi źródłami niepewności były zakłócenia wynikające ze zmieniających się warunków w pomieszczeniu.

Wszelkie rachunki przeprowadziłam ręcznie, posługując się jedynie kalkulatorem prostym oraz arkuszem kalkulacyjnym Google. Na każdym etapie obliczeń zaokrąślałam wynik do dwóch miejsc znaczących. Ostateczne wyniki sprawdziłam przy użyciu programów napisanych w Pythonie i na podstawie tych wyników dopasowałam krzywą do danych na wykresach. Do szacowania niepewności pomiarowych użyłam metody obliczania niepewności pomiarowej za pomocą pierwiastków elementów na diagonalu macierzy kowariancji, a także oszacowałam błędy za pomocą propagacji małych błędów.

Bibliografia

- [1] Aneta Drabińska i Marta Borysiewicz. Instrukcja do zadania cs1 - wyznaczanie ruchliwości i koncentracji nośników w półprzewodniku, 2023.