

**ZADANIE CS2**  
**WYZNACZANIE ENERGII AKTYWACJI NOŚNIKÓW**  
**W PÓLPRZEWODNIKU**

**I. Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest zbadanie zależności temperaturowej przewodnictwa oraz wyznaczenie energii aktywacji badanego półprzewodnika.

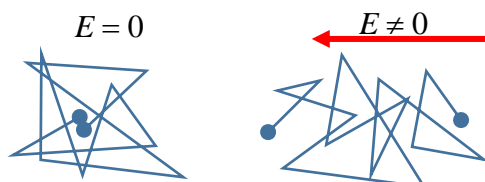
**II. Wprowadzenie**

**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 wektora 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

$$V_d = \frac{|q|}{q} \mu E, \tag{1}$$

gdzie iloraz  $|q|/q$  pokazuje, że zwrot prędkości w danym polu jest zależny od znaku poruszających się nośników. Duża ruchliwość oznacza stosunkowo małe rozpraszanie, zatem większe przewodnictwo.



Rysunek 1. Pogładowe przedstawienie ruchu ładunku w polu elektrycznym.

Wielkością, która opisuje zdolność materiału do przewodzenia ładunku jest konduktywność (przewodność właściwa)  $\sigma$ . Związek przewodności właściwej z parametrami materiału dany jest przez:

$$\sigma = |q|n\mu, \tag{2}$$

gdzie  $n$  jest koncentracją nośników – czyli ich liczbą w jednostce objętości (typowo stosujemy jednostki szt./cm<sup>3</sup>, w uproszczeniu cm<sup>-3</sup>). Im więcej jest nośników ładunku, tym lepsze przewodzenie prądu. Odwrotnością przewodności właściwej jest rezystywność (opór właściwy)  $\rho$ . Duża rozpiętość wartości przewodności właściwej posłużyła do stworzenia klasyfikacji różnych materiałów na:

- przewodniki dla których  $\sigma > 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  (np.  $\sim 60 \cdot 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  dla srebra)
- dielektryki dla których  $\sigma < 10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  (np.  $\sim 10^{-12} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  dla szafiru)
- półprzewodniki – z wartościami pośrednimi.

## II.2. Wielkości dostępne w eksperymencie

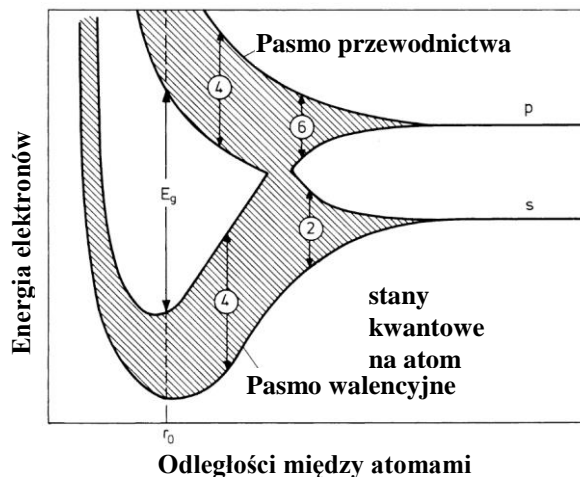
Gdy do próbki przyłożymy różnicę potencjałów (napięcie  $U$ ), popłynie prąd  $I$ . Zależność między nimi dana jest przez prawo Ohma:  $U = RI$ . Wartość oporu  $R$  zależy od oporu właściwego  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  oraz od jej geometrii:  $R = \rho \frac{l}{S}$ , gdzie  $S$  jest przekrojem próbki 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 przewodność właściwą. Jej wartość zawiera informacje o iloczynie  $n$  i  $\mu$ .

## II.3. Półprzewodniki

Wiemy, że elektrony w pojedynczym atomie mogą przyjmować określone *stany kwantowe*. Każdemu ze stanów odpowiada ściśle określona energia (*poziomy 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  $\text{cm}^3$  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 (widoczne z prawej strony na rys. 2) zmieniają swoje energie tworząc pasma (zakreskowane pola na rys. 2.). Dla położenia równowagi ( $r = r_0$ ) 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 energetyczne.



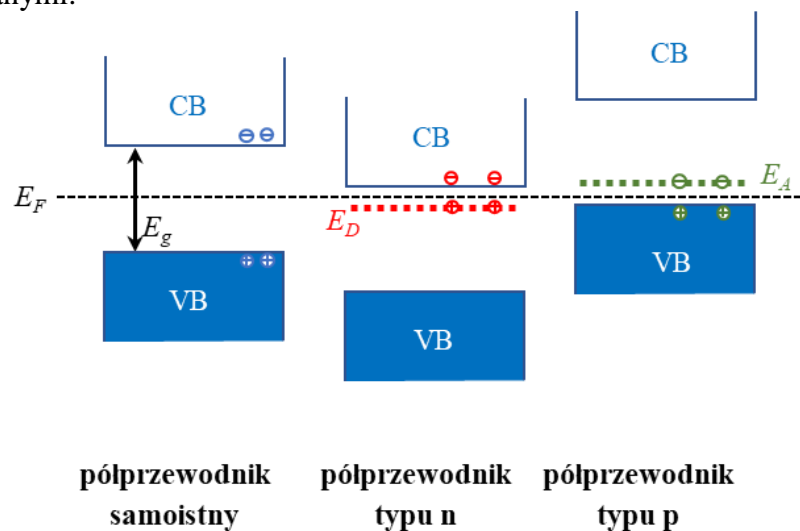
Rysunek 2. Zależność energii elektronów od odległości między atomami. Widać że dla  $r \sim r_0$  mamy minimum energii elektronów - i dla takiej odległości kryształ jest stabilny (może istnieć). Liczby w kółeczkach odpowiadają degeneracji poziomów.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Na podstawie H. Ibach, H. Luth, Fizyka Ciała Stałego.

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 pasmo (patrz rys. 3 oraz  $E_g$  na rys. 2). Tę przerwę nazywamy czasem *fundamentalną przerwą energetyczną*, ponieważ jej wartość determinuje wszystkie własności fizyczne półprzewodników.

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<sup>-3</sup> w porównaniu do ok.  $10^{24}$  cm<sup>-3</sup> w metalach).

Rysunek 3 przedstawia podstawowe różnice półprzewodnikami samoistnymi i domieszkowanymi.



Rysunek 3. Podział półprzewodników 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

Zależność przewodnictwa od temperatury jest determinowana zmianami temperaturowymi zarówno koncentracji jak i ruchliwości nośników. Zmiany temperaturowe koncentracji wynikają z aktywacji kolejnych nośników w wyniku jonizacji

atomów i wyrażają się zależnością  $n \propto \exp\left(-\frac{E_{akt.}}{kT}\right)$ , gdzie  $k$  jest stałą Boltzmana, zaś  $E_{akt.}$  jest energią aktywacji nośników. Zmiany temperaturowe ruchliwości wynikają ze zwiększonych rozprożeń z rosnącą temperaturą i wyrażają się potęgową zależnością  $\mu \propto T^\alpha$ , gdzie  $\alpha$  zależy od procesu odpowiedzialnego za rozpraszania, przy czym  $\alpha = -3/2$  dla rozpraszania na fononach, natomiast dla rozpraszania na zjonizowanych domieszkach  $\alpha = 3/2$ . Przewodnictwo półprzewodników silnie zależy od temperatury, 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, w którym niewielkie drgania termiczne mogą wystarczyć aby zjonizować atomy domieszek (uwolnić elektrony z donorów lub obsadzić akceptory). Wzrost koncentracji nośników wpływa na wzrost przewodnictwa opisywany jako

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_{akt.}}{kT}\right), \quad (4)$$

gdzie  $E_{akt.}$  jest energią aktywacji domieszek (patrz rys. 3)

- reżim temperatur średnich, w którym wszystkie domieszki oddały swoje nośniki prądu i koncentracja nośników praktycznie się nie zmienia. Wówczas zmiana przewodnictwa związana jest z temperaturową zależnością ruchliwości. W tym obszarze przewodność właściwa maleje ze wzrostem temperatury, choć zmiany te są stosunkowo niewielkie.
- reżim temperatur wysokich, w których zaczyna wzrastać koncentracja nośników samoistnych dostarczanych w procesie jonizacji atomów pierwiastków macierzystych materiału i obserwuje się wzrost koncentracji nośników wpływający na wzrost przewodnictwa. Ponownie przewodność właściwa wyraża się jako

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_{akt.}}{kT}\right), \quad (5)$$

gdzie  $E_{akt.}$  jest energią aktywacji nośników samoistnych. W przypadku, gdy mamy do czynienia z półprzewodnikiem, w którym poziom Fermiego leży dość głęboko wewnątrz przerwy energetycznej (przynajmniej  $2kT$  poniżej pasma przewodnictwa i powyżej pasma walencyjnego) energia aktywacji wynosi  $E_g/2$ , w ogólności może ona przybierać wartości pomiędzy  $E_g$  a  $E_g/2$ .

### III. Pomiary

#### III.1. Wyposażenie

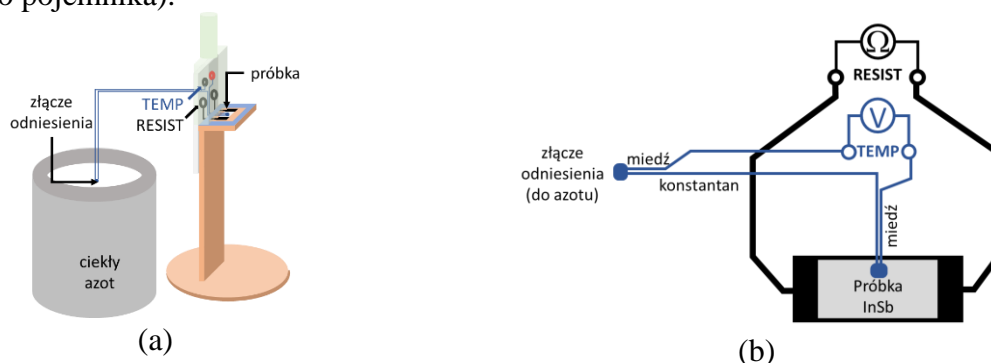
Masz do dyspozycji:

- próbkę półprzewodnika **Ge** o wymiarach  $20 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ , w uchwycie z zamocowaną grzałką oraz czujnikiem temperatury PT100
- próbkę półprzewodnika **InSb** o grubości  $2,76 \text{ }\mu\text{m}$  oraz powierzchni o wymiarach  $5 \times 10 \text{ mm}^2$ , w uchwycie umożliwiającym chłodzenie próbki przy użyciu ciekłego azotu, z zamocowaną termoparą miedź-konstantan
- zasilacz laboratoryjny
- sterowane komputerowo dwa woltomierze cyfrowe Rigol DM3058 wraz z oprogramowaniem.

### III.2. Próbkki i układ pomiarowy

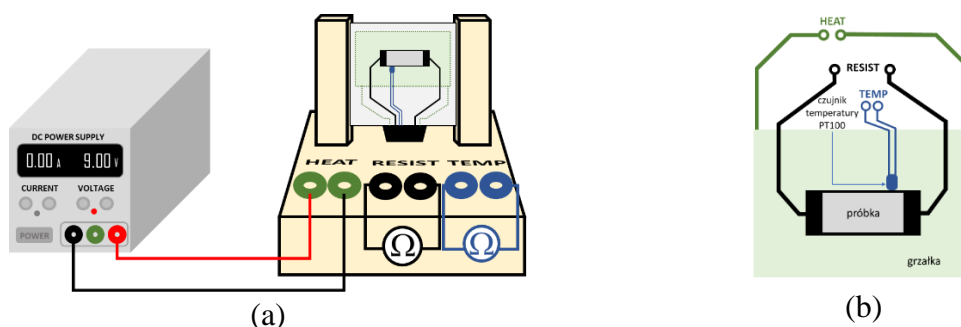
Badane próbki półprzewodnika to Ge, który w temperaturze pokojowej ma przerwę energetyczną  $0,66 \text{ eV}^1$ , oraz InSb, który w temperaturze pokojowej ma przerwę energetyczną równą  $0,17 \text{ eV}^1$ . Do próbki podłączone są dwa kontakty o charakterystyce omowej. Próbkki zamieszone są na uchwycie pomiarowym. Ze względu na różny zakres temperaturowy zmian oporu, próbka Ge została zamontowana w uchwycie pozwalającym na grzanie próbki do ok.  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , natomiast próbka InSb w uchwycie pozwalającym na chłodzenie próbki z użyciem ciekłego azotu. **Podczas pracy należy obchodzić się z próbkami wyjątkowo ostrożnie. W szczególności nie należy ich powierzchni dotykać palcami oraz w jakikolwiek sposób wyginać płytki na której są zamontowana.**

Schemat układu pomiarowego w przypadku próbki InSb przedstawia rysunek 4. Do kontaktów na próbce podłączamy omomierz. Termoparę podłączamy do woltomierza. Jeden z końców termopary dotyka powierzchni próbki. Drugą końcówkę termopary należy zanurzyć w ciekłym azocie ( $77 \text{ K}$ ), aby mieć stabilną temperaturę odniesienia (można użyć osobnego pojemnika).




Rysunek 4. (a) Schemat układu pomiarowego dla próbki InSb. (b) Schemat podłączenia próbki z oznaczonymi wyprowadzeniami analogicznie jak w uchwycie pomiarowym.

Schemat układu pomiarowego w przypadku próbki Ge przedstawia rysunek 5. Do kontaktów na próbce oraz czujnika temperatury podłączamy omomierz. Temperaturę próbki zmienia się poprzez zmianę napięcia przyłożonego do grzałki podłączonej do źródła napięcia. Grzałka powinna być zasilana w trybie źródła napięciowego (stabilizacja napięcia). **UWAGA! Napięcie na grzałce nie powinno przekroczyć  $9 \text{ V}$ , a maksymalna dopuszczalna temperatura próbki to  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .**



Rysunek 5. (a) Schemat układu pomiarowego dla próbki Ge. (b) Schemat płytki pomiarowej z oznaczonymi wyprowadzeniami analogicznie jak w uchwycie pomiarowym.

<sup>1</sup> C. Kittel, Wstęp do Fizyki Ciała Stałego, PWN, 1999, str. 223.

W trakcie tego doświadczenia pomiary są wykonywane przy pomocy programu CS2 współpracującego z dostępnymi na stanowisku pomiarowym multimetrami. Po uruchomieniu programu (przycisk  - Run Continuously), należy wybrać rodzaj czujnika temperatury (termopara dla próbki InSb lub PT100 dla próbki Ge), a następnie zainicjalizować urządzenia, zwracając uwagę, które z nich jest podłączone do kontaktów na próbce, a które do czujnika temperatury. Urządzenia wtedy ustawią się automatycznie w odpowiednim trybie pomiarowym tzn. jako omomierz do pomiaru oporu próbek oraz woltomierz lub omomierz do pomiaru temperatury (woltomierz dla termopary i omomierz dla PT100). W programie w panelu odczytu danych z miernika, wskazania z czujnika termopary są przeliczane automatycznie na temperaturę próbki w kelwinach, zaś wykres, dla wygody użytkownika, jest rysowany w skali logarytmicznej oporu próbki w funkcji odwrotności temperatury. W pliku pomiarowym są natomiast zapisywane jedynie bezpośrednie odczyty z mierników, tzn. opór lub napięcie mierzone przez czujnik temperatury oraz opór próbki. Charakterystyka pozwalająca przeliczyć napięcie zmierzone na termoparze oraz opór elementu PT100 na temperaturę znajduje się odpowiednio w tabelach S1 i A2 oraz na rysunkach S1 i S2 w suplemencie do tej instrukcji. Szczegółowa instrukcja obsługi programu pomiarowego jest dostępna na stanowisku pomiarowym i na stronie [www](#) zajęć.

### III.3 Pomiar zależności temperaturowej oporu próbki InSb

Po zmierzeniu oporu próbki i wskazań termopary w temperaturze pokojowej uruchom program do zapisu wskazań mierników, a następnie wstaw uchwyt pomiarowy do styropianowego pojemnika i stopniowo dolewaj ciekłego azotu do pojemnika.

**Podczas pracy z ciekłym azotem zachowaj szczególną ostrożność. W szczególności nie wolno dopuścić do zetknięcia się ciekłego azotu lub par gwałtownie parującego azotu z ciałem lub oczami, dlatego podczas pracy z ciekłym azotem noś rękawice i okulary ochronne. Ze względu na intensywne parowanie ciekłego azotu, pojemniki z ciekłym azotem nie mogą być szczelnie zamknięte, gdyż grozi to znacznym zwiększeniem ciśnienia w pojemniku i jego gwałtownym uszkodzeniem połączonym z niekontrolowanym wyciekami azotu i jego par.**

Po zmierzeniu oporu i wskazań termopary w trakcie schładzania próbki **bardzo ostrożnie** wyjmij cały układ z ciekłego azotu. Uważaj, aby przy tym nie rozlać ciekłego azotu. Miedziany uchwyt ma pewną pojemność cieplną, więc powrót do temperatury pokojowej zajmie pewien czas. Podczas ogrzewania próbki przeprowadź drugą serię pomiarów (druga końcówka termopary powinna być cały czas zanurzona w azocie).

Serię podczas chłodzenia i ogrzewania próbki powtórz przynajmniej jednokrotnie, zwracając uwagę, aby proces chłodzenia i grzania był na tyle powolny, aby zapewnić powtarzalność pomiarów i jak najmniejszą histerezę podczas pomiarów.

### III.4 Pomiar zależności temperaturowej oporu próbki Ge

Pomiary wykonujemy w trakcie powolnego grzania próbki, które realizujemy poprzez przykładanie coraz to większego napięcia na grzałkę. Grzałka powinna być zasilana z zasilacza w trybie źródła napięciowego (stabilizacja napięcia), a napięcie na grzałce nie powinno przekroczyć 9 V. Maksymalna dopuszczalna temperatura próbki to 150 °C. Następnie powoli zmniejszamy grzanie próbki i wykonujemy analogiczne pomiary podczas powolnego stygnięcia próbki. Serię podczas chłodzenia i ogrzewania próbki powtórz przynajmniej jednokrotnie, zwracając uwagę, aby proces chłodzenia i grzania był na tyle powolny, aby zapewnić powtarzalność pomiarów i jak najmniejszą histerezę podczas pomiarów.

#### IV. Analiza wyników pomiarów

Analiza danych pomiarowych powinna zawierać

- Dla każdej z próbek wykresy oporu próbki w zależności od jej temperatury wspólnie dla wszystkich serii pomiarowych z dyskusją powtarzalności pomiarów.
- W przypadku próbki Ge wykres logarytmu naturalnego przewodności od odwrotności temperatury wraz z dopasowaniem zależności modelowej osobno dla każdej serii pomiarowej, wyznaczeniem energii aktywacji nośników oraz porównaniem jej z tablicową wartością przerwy energetycznej Ge.
- W przypadku próbki InSb wykres logarytmu naturalnego przewodności od odwrotności temperatury wraz z dopasowaniem zależności modelowej osobno dla wysokich i niskich temperatur dla każdej serii pomiarowej (również osobno), wyznaczeniem energii aktywacji domieszek oraz porównaniem jej z energią termiczną  $kT$ , wyznaczeniem energii aktywacji nośników samoistnych oraz porównaniem jej z tablicową wartością przerwy energetycznej InSb.

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 Twojego 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 wspomaganą komputerem, Warszawa 2003.
- S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz. III, PWN 1966.
- H. Halliday, R Resnick, Podstawy fizyki 3, PWN 2006.

## VII. Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

1. W drucie chromonikielinowym (czyli wykonanym ze stopu nikiel-chrom-żelazo używanego powszechnie w elementach grzejnych) o długości 1 m i polu przekroju poprzecznego  $1 \text{ mm}^2$  przy różnicy potencjałów 2 V przyłożonej do jego końców płynie prąd o natężeniu 4 A. Oblicz przewodność właściwą  $\sigma$  chromonikieliny.
2. Prostopadłościenny klocek ma pole przekroju  $3,5 \text{ cm}^2$ , długość 15,8 cm i opór  $935 \Omega$ . Materiał, z którego wykonano klocek, ma  $5,33 \cdot 10^{22}$  elektronów przewodnictwa na  $\text{m}^3$ . Między przednią i tylną ścianą utrzymywana jest różnica potencjałów 35,8 V. a) Ile wynosi natężenie prądu w klocku? b) Ile wynosi prędkość unoszenia elektronów przewodnictwa?
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  $0,02 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

*Opracowały: Marta Borysiewicz, Aneta Drabińska, 2024 r.*



## SUPLEMENT

Tabela S1. Charakterystyka termopary MIEDŹ-KONSTANTAN ze złączem odniesienia w ciekłym azocie

U [mV]	T [K]
-0.1	68.79971
0	76.15773
0.1	82.90597
0.2	89.18296
0.3	95.08207
0.4	100.6697
0.5	105.9952
0.6	111.0963
0.7	116.00259
0.8	120.73773
0.9	125.32119
1	129.76903
1.1	134.09474
1.2	138.3098
1.3	142.4240
1.4	146.4458
1.5	150.38284
1.6	154.24137
1.7	158.02721
1.8	161.74548
1.9	165.40073
2	168.99704
2.1	172.53811
2.2	176.02727
2.3	179.46755
2.4	182.8617
2.5	186.2122
2.6	189.5215

2.7	192.7916
2.8	196.02449
2.9	199.22199
3	202.38577
3.1	205.5174
3.2	208.6183
3.3	211.68987
3.4	214.73332
3.5	217.74986
3.6	220.74057
3.7	223.7065
3.8	226.64863
3.9	229.56785
4	232.46505
4.1	235.34103
4.2	238.19656
4.3	241.03236
4.4	243.84913
4.5	246.64752
4.6	249.42815
4.7	252.19159
4.8	254.93842
4.9	257.66917
5	260.38433
5.1	263.0844
5.2	265.7698
5.3	268.4410
5.4	271.0985
5.5	273.7425
5.6	276.3736

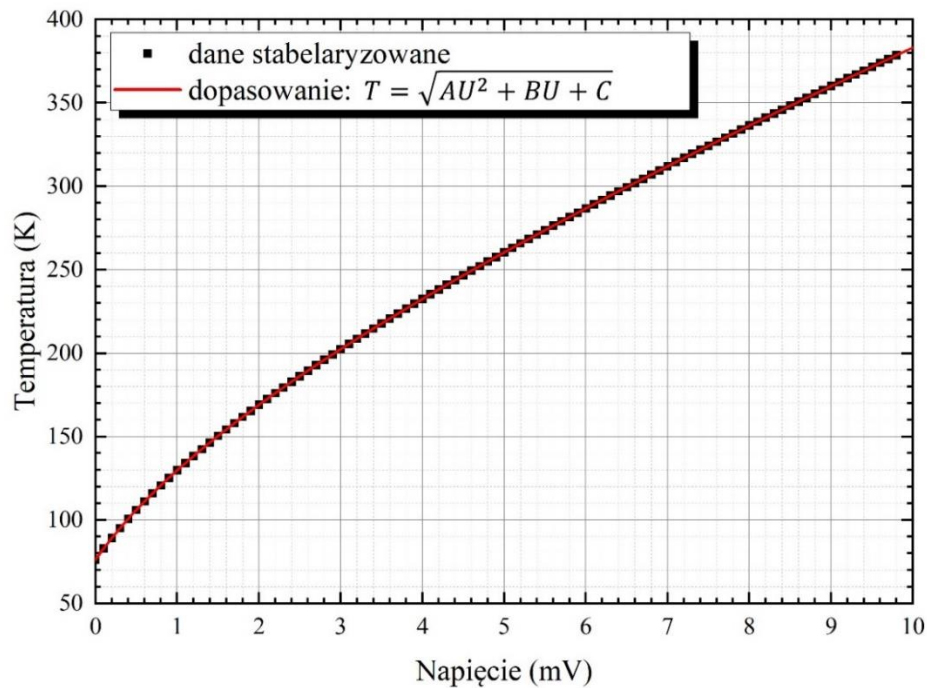
5.7	278.9921
5.8	281.5983
5.9	284.1925
6	286.7751
6.1	289.3465
6.2	291.9068
6.3	294.4564
6.4	296.9956
6.5	299.5246
6.6	302.0437
6.7	304.5531
6.8	307.0530
6.9	309.5438
7	312.0256
7.1	314.4986
7.2	316.9630
7.3	319.4191
7.4	321.8670
7.5	324.3069
7.6	326.7390
7.7	329.1634
7.8	331.5804
7.9	333.9901
8	336.3926
8.1	338.7881
8.2	341.1767
8.3	343.5587
8.4	345.9341
8.5	348.3030
8.6	350.6656

8.7	353.0221
8.8	355.3724
8.9	357.7169
9	360.0555
9.1	362.3884
9.2	364.7157
9.3	367.0376
9.4	369.3540
9.5	371.6651
9.6	373.9711
9.7	376.2719
9.8	378.5678

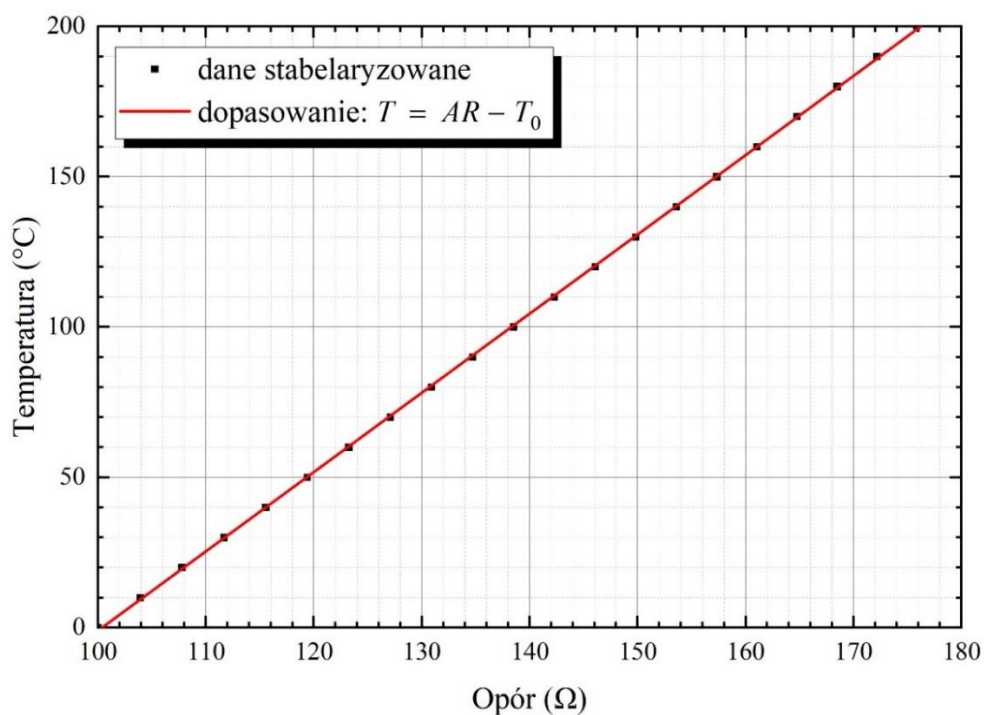
Tabela S2. Charakterystyka czujnika temperatury PT100

REZYSTOR Pt 100						
T (°C)	R (Ω)		T (°C)	R (Ω)		
-200	18,52		160	161,05	520	287,62
-190	22,83		170	164,77	530	290,92
-180	27,10		180	168,48	540	294,21
-170	31,34		190	172,17	550	297,49
-160	35,54		200	175,86	560	300,75
-150	39,72		210	179,53	570	304,01
-140	43,88		220	183,19	580	307,25
-130	48,00		230	186,84	590	310,49
-120	52,11		240	190,47	600	313,71
-110	56,19		250	194,10	610	316,92
-100	60,26		260	197,71	620	320,12
- 90	64,30		270	201,31	630	323,30
- 80	68,33		280	204,90	640	326,48
- 70	72,33		290	208,48	650	329,64
- 60	76,33		300	212,05	660	332,79
- 50	80,31		310	215,61	670	335,93
- 40	84,27		320	219,15	680	339,06
- 30	88,22		330	222,68	690	342,18
- 20	92,16		340	226,21	700	345,28
- 10	96,09		350	229,72	710	348,38
0	100,00		360	233,21	720	351,46
10	103,90		370	236,70	730	354,53
20	107,79		380	240,18	740	357,59
30	111,67		390	243,64	750	360,64
40	115,54		400	247,09	760	363,67
50	119,40		410	250,53	770	366,70
60	123,24		420	253,96	780	369,71
70	127,08		430	257,38	790	372,71
80	130,90		440	260,78	800	375,70
90	134,71		450	264,18	810	378,68
100	138,51		460	267,56	820	381,65
110	142,29		470	270,93	830	384,60
120	146,07		480	274,29	840	387,55
130	149,83		490	277,64	850	390,48
140	153,58		500	280,98		
150	157,33		510	284,30		

wg PN-EN 60751:2009



Rysunek S1. Charakterystyka termopary MIEDŹ-KONSTANTAN ze złączem odniesienia w ciekłym azocie wraz z dopasowaniem zależności  $T = \sqrt{AU^2 + BU + C}$ , z parametrami najlepszego dopasowania równymi  $A = 0,034 \cdot 10^4 \frac{K^2}{mV^2}$ ,  $B = 1,07 \cdot 10^4 \frac{K^2}{mV}$  oraz  $C = 0,58 \cdot 10^4 K^2$ .



Rysunek S2. Charakterystyka czujnika temperatury PT100 wraz z dopasowaniem zależności  $T = A \cdot R - T_0$ , z parametrami najlepszego dopasowania równymi  $A = 2,636 \frac{°C}{\Omega}$  oraz  $T_0 = 264,6 °C$ .