



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
www.kueitwn.pollub.pl

LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 6**

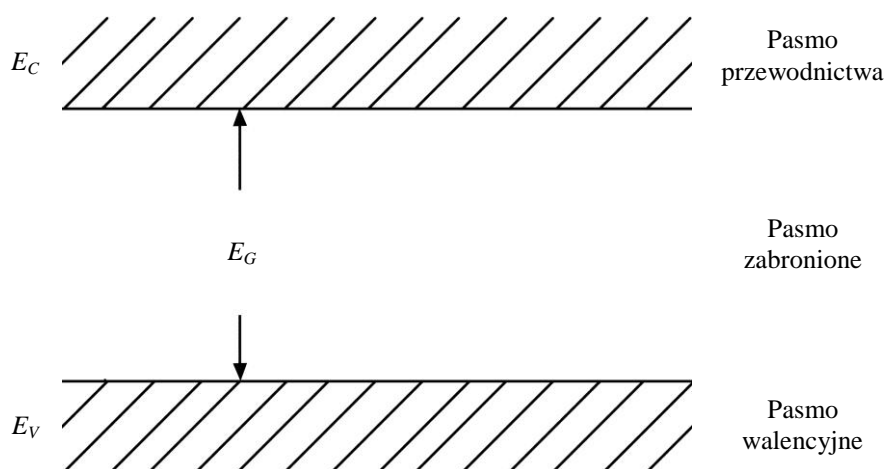
Pomiar podstawowych właściwości
materiałów półprzewodnikowych

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie i analiza podstawowych właściwości półprzewodników, ze szczególnym uwzględnieniem ich zależności temperaturowych.

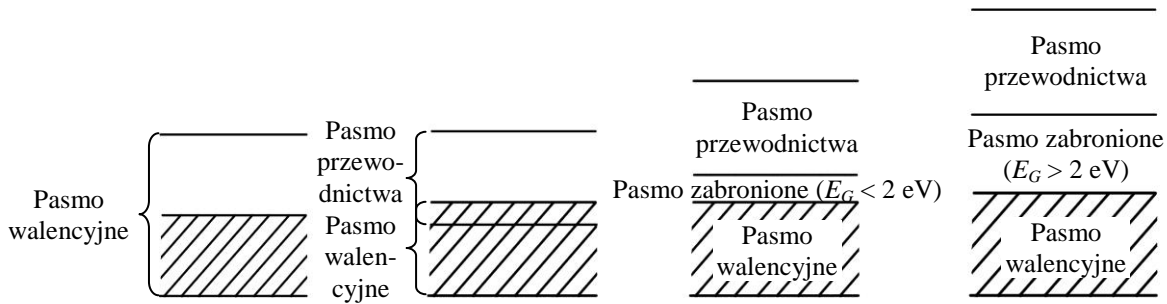
2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

Na rezystywność półprzewodników duży wpływ ma różnego rodzaju promieniowanie zewnętrzne. Temperaturowy współczynnik rezystancji ma duże ujemne wartości w półprzewodnikach (ze wzrostem temperatury rezystywność maleje o około $(5 \div 10)$ % na 1°C) podczas, gdy w przewodnikach ma małe i na ogół dodatnie wartości (ze wzrostem temperatury rezystywność zwiększa się o około $(0,3 \div 0,6)$ % na 1°C).



Rys. 1. Uproszczony model energetyczny ciała stałego

Odstęp E_G między wierzchołkiem pasma walencyjnego E_V a dnem pasma przewodnictwa E_C jest nazywany *przerwą energetyczną* lub *pasmem zabronionym*. W temperaturze zbliżonej do zera bezwzględnej pasmo walencyjne jest całkowicie wypełnione elektronami, co odpowiada efektywnie ośmioelektronowej strukturze poziomu walencyjnego w atomie związanym kowalencyjnie z innymi atomami w sieci krystalicznej. Pasma przewodnictwa natomiast jest w tych warunkach całkowicie puste. W miarę wzrostu temperatury część elektronów z pasma walencyjnego „przeskakuje” do pasma przewodnictwa, pozostawiając w paśmie walencyjnym wolne miejsca nazywane *dziurami*. Taki proces jest nazywany *generacją* par elektron-dziura. Szerokość pasma zabronionego jest wartością energii, jaką trzeba dostarczyć do sieci krystalicznej dla uwolnienia elektronu z wiązania kowalencyjnego. Dielektryki różnią się od półprzewodników tylko większą szerokością pasma zabronionego ($E_G > 2 \text{ eV}$).

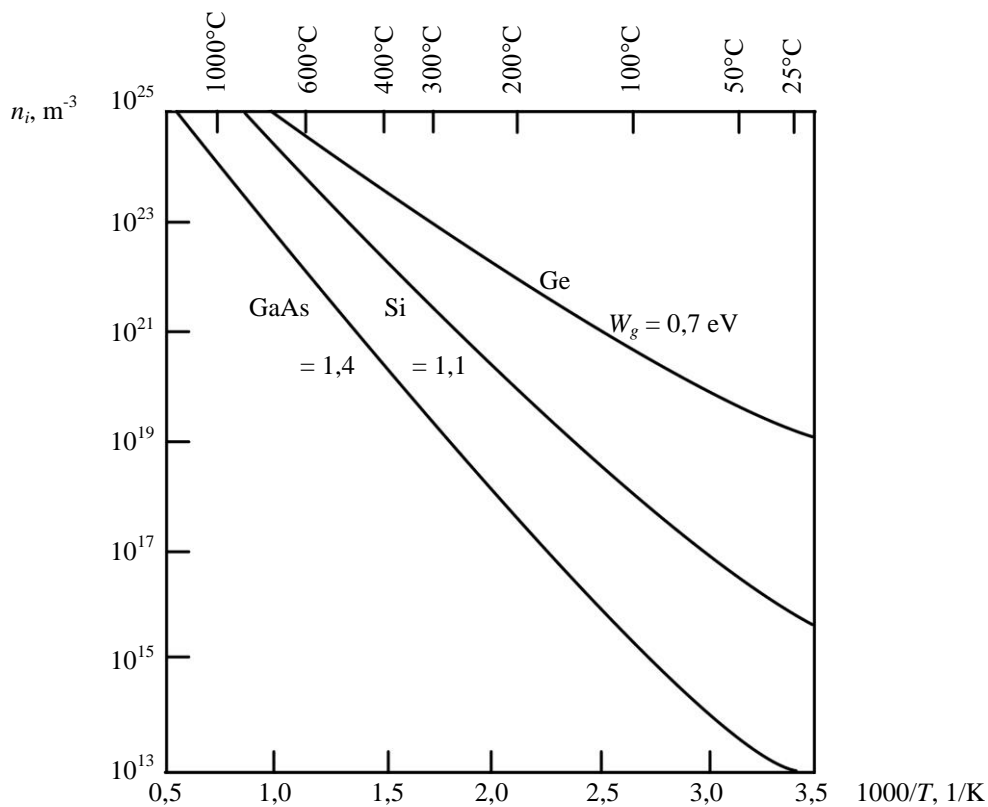


Rys. 2. Porównanie energetycznego modelu pasmowego dla metalu (a), półprzewodnika (b) i dielektryka (c)

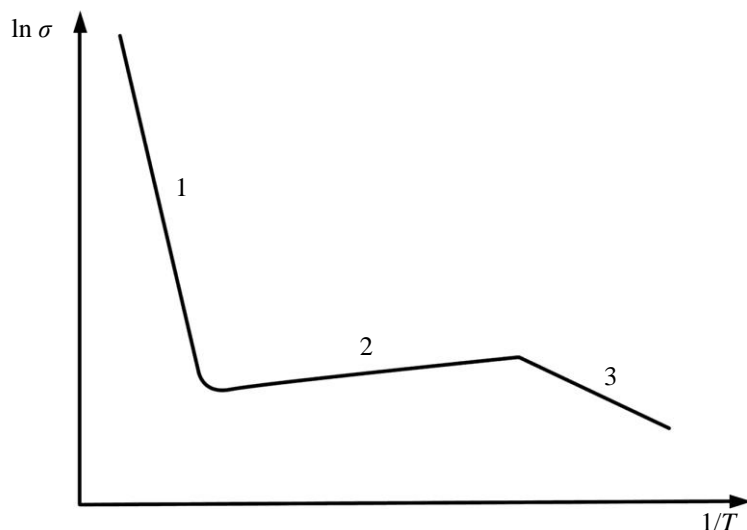
2.1. Półprzewodniki samoistne

Idealny kryształ półprzewodnikowy nie zawierający domieszek i defektów sieci nazywany jest *półprzewodnikiem samoistnym*. Ze wzrostem temperatury zachodzi generacja par elektron-dziura, które są jedynymi nośnikami ładunku w półprzewodniku samoistnym. Koncentracja elektronów i dziur związana jest zależnością:

$$p_i = n_i \sim \exp \frac{-E_g}{2kT} \quad (1)$$



Rys. 3. Wykres zależności $\lg n_i = f(1000/T)$ dla trzech półprzewodników: krzemu, germanu i arsenku galu



Rys. 4. Zależność konduktywności od temperatury, gdzie: 1 - zakres generacji samoistnej, 2 - zakres stałej koncentracji nośników, 3 - zakres jonizacji domieszek

2.2. Półprzewodniki domieszkowane

Oprócz samoistnych nośników generowanych termicznie w półprzewodnikach można wytworzyć nośniki poprzez celowe wprowadzenie domieszek do kryształu. Proces ten, zwany *domieszkowaniem*, jest najpowszechniejszą metodą kształtowania przewodności półprzewodników. Mamy zatem dwa typy półprzewodników: typ *n* (większość elektronów) i typ *p* (większość dziur).

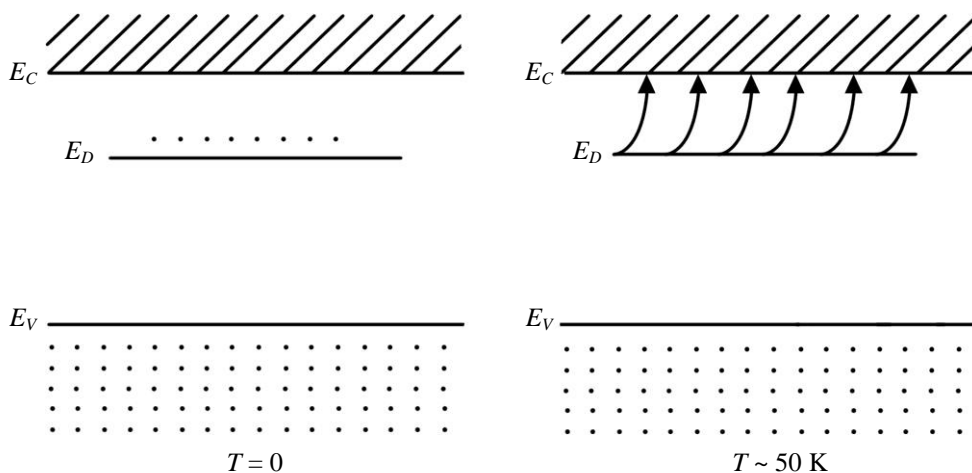
Wprowadzenie domieszek lub defektów sieci do idealnego kryształu powoduje powstanie dodatkowych poziomów w strukturze pasmowej, zwykle w obszarze pasma zabronionego. Na przykład domieszki z grupy V układu okresowego (P, As i Sb) wprowadzają poziomy energetyczne bardzo bliskie pasma przewodnictwa Ge i Si.

Poziomy te są w temperaturze zbliżonej do 0 K wypełnione elektronami. Niewielka energia cieplna wystarcza, aby przeszły one do pasma przewodnictwa (rysunek 5). Zatem w temperaturze (50 ÷ 100) K praktycznie wszystkie elektrony z poziomów domieszkowych przechodzą do pasma przewodnictwa. Takie poziomy domieszkowe nazywają się poziomami *donorowymi*, a domieszki w Ge i Si z grupy V są nazywane *donorami*. Półprzewodnik domieszkowany dużą ilością atomów donorowych ma $n \gg (n_i, p)$ w temperaturze pokojowej. Jest to materiał typu *n*.

Energia przejścia z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa jest dużo mniejsza niż energia pasma zabronionego ($E_D \ll E_G$). Wartości energii E_D dla poszczególnych domieszek donorowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości energii E_D oraz E_G dla poszczególnych domieszek donorowych

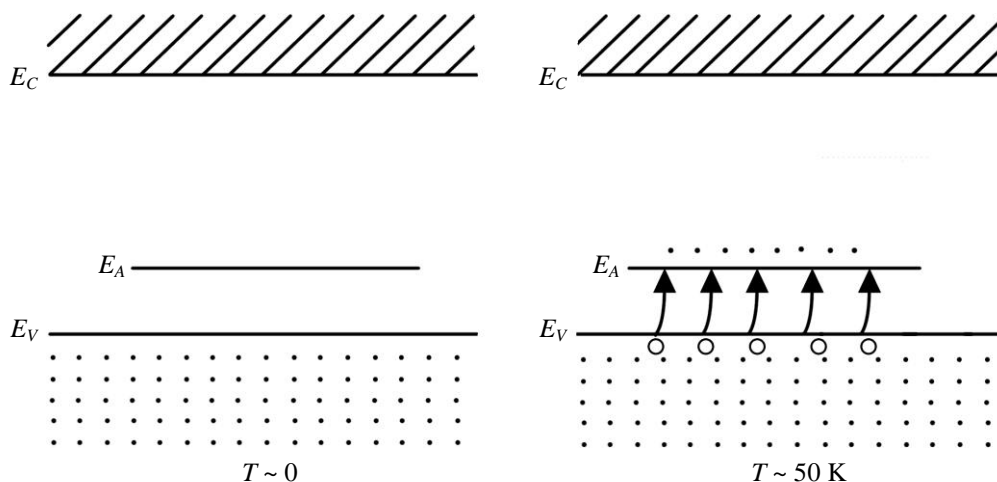
| | E_D, eV | | | E_G, eV | |
|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----|
| | P | As | Sb | | |
| Si | 0,045 | 0,049 | 0,039 | Si | 1,1 |
| Ge | 0,012 | 0,013 | 0,0096 | Ge | 0,7 |



Rys. 5. Przechodzenie elektronów z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa

Atomy z grupy III (B, Al, Ga i In) wprowadzają do Ge i Si poziomy domieszki leżące blisko pasma walencyjnego. W niskich temperaturach energia cieplna wystarcza do pobudzenia elektronów z pasma walencyjnego do przejścia na poziomy domieszki i pozostawienia za sobą dziur w paśmie walencyjnym. Ponieważ te poziomy przyjmują (akceptują) elektrony z pasma walencyjnego, nazywane są poziomami *akceptorowymi*, a domieszki grupy III są dla Ge i Si domieszkami akceptorowymi.

Jak wynika z rysunku 6, domieszkowanie *akceptorami* tworzy półprzewodnik, w którym gęstość dziur *p* jest znacznie większa niż gęstość elektronów w paśmie przewodnictwa. Jest to materiał typu *p*.



Rys. 6. Wychwytywanie elektronów z pasma walencyjnego przez poziom akceptorowy, powodujący powstawanie dziur w paśmie podstawowym

Wartości energii E_A dla poszczególnych domieszek akceptorowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości energii E_A dla poszczególnych domieszek akceptorowych

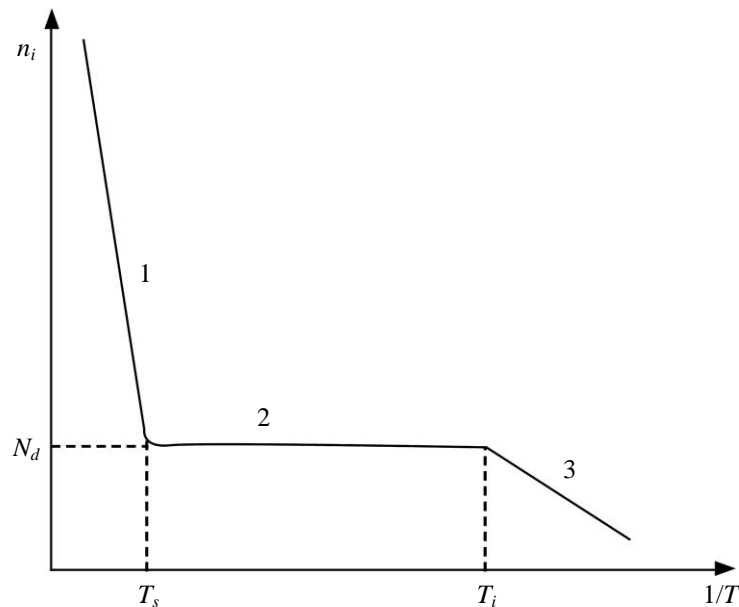
| | | E_A , eV | | | |
|-----------|--|------------|-----------|-----------|-----------|
| | | B | Al | Ga | In |
| Si | | 0,045 | 0,057 | 0,065 | 0,16 |
| Ge | | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,011 |

Dla półprzewodników domieszkowanych koncentrację nośników wyrażają równania:

$$p \cong B(T)\sqrt{N_A}e^{\left(-\frac{E_A}{2kT}\right)}, \quad (2)$$

$$n \cong B(T)\sqrt{N_D}e^{\left(-\frac{E_D}{2kT}\right)} \quad (3)$$

Samoistna gęstość nośników n_i w Si w temperaturze pokojowej jest równa około 10^{10} cm^{-3} . Jeśli domieszkujemy Si atomami Sb w ilości 10^{15} cm^{-3} , gęstość elektronów przewodnictwa zmieni się o pięć rzędów wielkości. Rezystywność Si zmieni się w wyniku takiego domieszkowania od $2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ do $5 \Omega \cdot \text{cm}$.



Rys. 7. Zależność $n_i = f(1/T)$

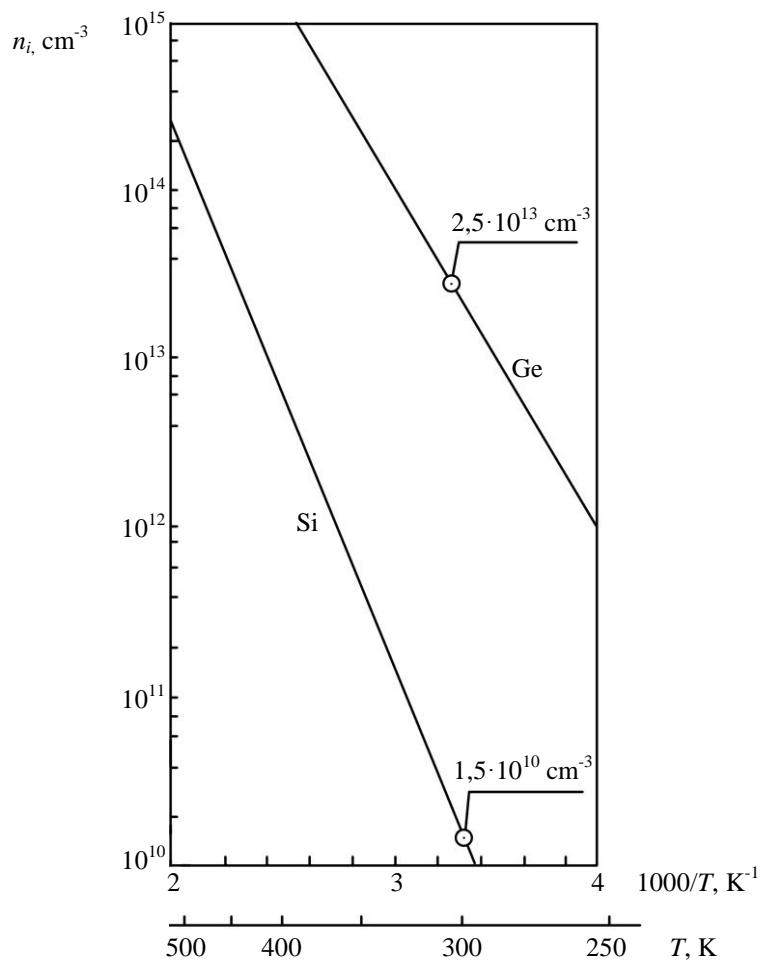
Wykres pokazuje zachowanie się koncentracji nośników w zależności od temperatury. Część 1 przypada na zakres generacji samoistnej nośników, część 2 jest to obszar nośników domieszkowanych, natomiast odcinek 3 jest obszarem jonizacji domieszek.

W półprzewodniku domieszkowanym przeważają nośniki jednego typu. W powyższym przykładzie elektrony przewodnictwa przewyższają pod względem ilości dziury w paśmie walencyjnym o wiele rzędów wielkości. W materiale typu n niewielkie ilości dziur nazywamy *nośnikami mniejszościowymi*, a stosunkowo duże ilości elektronów przewodnictwa *nośnikami większościowymi*. Podobnie, elektrony będą nośnikami mniejszościowymi, a dziury większościowymi, w materiale typu p . Równania opisujące koncentrację elektronów i dziur:

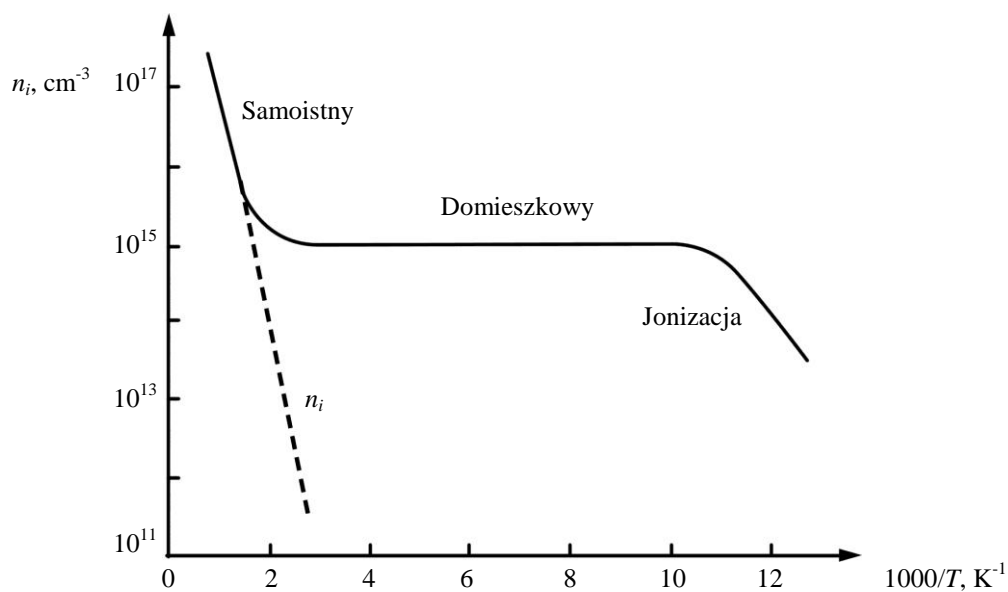
$$n \cong N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}, \quad (4)$$

$$p \cong N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad (5)$$

Koncentracje elektronów i dziur wyznaczone z równań (4) i (5) są prawidłowe, niezależnie od tego czy materiał jest samoistny, czy domieszkowany przy założeniu, że jest zachowana równowaga termiczna.



Rys. 8. Przybliżona zależność koncentracji nośników samoistnych w Ge i Si w funkcji odwrotności temperatury; dla porównania zaznaczono odpowiednie wartości w temperaturze pokojowej

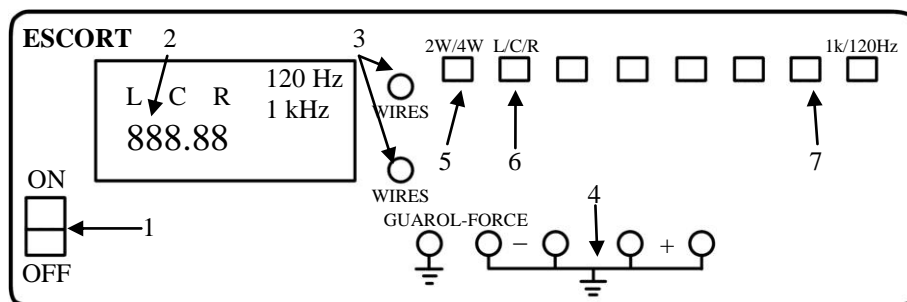


Rys. 9. Zmiana koncentracji nośników w funkcji odwrotności temperatury dla Si zawierającego 10^{15} donorów/cm³

3. PROGRAM ĆWICZENIA

3.1. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne składa się z urządzenia do pomiaru rezystancji, współpracującego z mostkiem RLC ESCORT. Urządzenie to składa się z kadzi wypełnionej olejem, który jest podgrzewany przez grzałkę oraz cylindrycznego pojemnika z próbkami zanurzonego w oleju. Do próbek przymocowane są elektrody, których wyprowadzenia dołączone są do dodatkowych zacisków, dzięki czemu ułatwione jest dołączanie mostka ESCORT. Pomiar temperatury realizowany jest przez cyfrowy termometr z dołączoną termoparą zanurzoną w oleju.

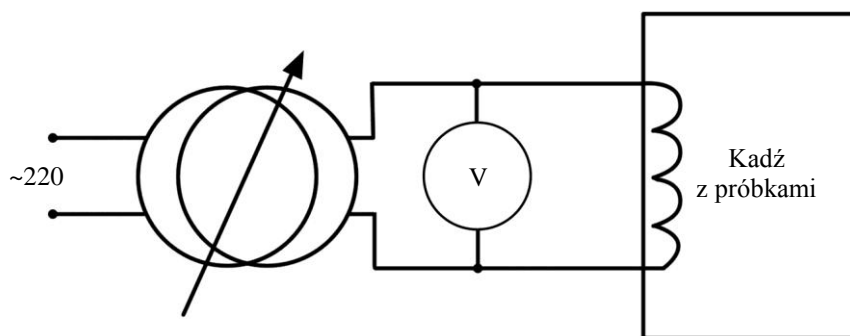


Rys. 10. Wygląd płyty czołowej miernika ESCORT, wraz z przełącznikami wykorzystywanymi podczas pomiarów

Oznaczenia do rysunku 10:

- 1 - zasilanie,
- 2 - wyświetlacz,
- 3 - wskaźniki przełączników przewodów zasilających urządzenie,
- 4 - gniazda przewodów,
- 5 - przełącznik zmiany przewodów zasilających (2 prądowe, 2 napięciowe),
- 6 - przełącznik badanej wielkości (indukcyjność, pojemność, rezystancja),
- 7 - przełącznik zmiany częstotliwości próbkowania 1 kHz/120 Hz.

Bardzo ważną podczas tego ćwiczenia jest szybkość nagrzewania próbek (możliwie wolno), dlatego grzałka zasilana jest przez autotransformator, dzięki czemu mamy możliwość regulacji napięcia zasilania, a więc i mocy grzałki.



Rys. 11. Schemat zasilania grzałki

3.2. Próbki do badań

Do badań konduktywności wykorzystano trzy pierwiastki takie jak krzem (Si), german (Ge) oraz arsenek galu (GaAs). Próbki Si i GaAs są płytkami o grubości $d = 0,5$ mm, natomiast próbka Ge ma kształt prostopadłościanu o długości $d = 14,2$ mm. Powierzchnie próbek, na które naniesiono elektrody zostały wypolerowane, a następnie umyte acetonem. Elektrody zostały wykonane z pasty srebrnej o powierzchni S (tabela 3), która po zaschnięciu ma konsystencję ciała stałego i wykazuje właściwości przewodzące zbliżone do srebra, a więc nie ma wpływu na pomiary rezystancji próbek. Próbki zostały połączone z zaciskami, do których podłączamy mostek RLC ESCORT.

Tabela 3. Zestawienie wymiarów próbek istotnych do opracowania wyników badań

| | S, cm^2 | d, cm |
|-------------|------------------|----------------|
| Si | 0,001 | 0,5 |
| Ge | 0,0756 | 1,42 |
| GaAs | 0,07069 | 0,05 |

4. PRZEPROWADZENIE POMIARÓW

4.1. Pomiar rezystancji półprzewodników

Pomiary rezystancji próbek półprzewodników przeprowadza się w następujący sposób:

- podłączyć grzałkę kadzi do autotransformatora (rysunek 11),
- umieścić sondę termometru w kadzi w taki sposób, aby nie dotykała dna, a następnie przełączyć termometr na pomiar w $^{\circ}\text{C}$,
- podłączyć miernik do zacisków tak, aby jeden przewód był połączony z zaciskiem N, natomiast drugi umożliwiał przełączanie na zaciski Si, Ge i GaAs, co umożliwi łatwy pomiar rezystancji trzech półprzewodników (krzem, german i arsenek galu),
- podłączyć oba przewody do miernika, do gniazd wyjściowych (+) oraz (-), oznaczonych numerem 4 (rysunek 10),
- przełącznikiem 5 (rysunek 10) przełączyć na pomiar dwoma przewodami (wskaźniki oznaczone numerem 3, rysunek 10),
- przełącznikiem 6 (rysunek 10) ustawić miernik na pomiar rezystancji, na wyświetlaczu LCD zaświeci się „R”,
- pomiary wykonać przy częstotliwości próbkowania 1 kHz, a następnie przełącznikiem 7 (rysunek 10) zmienić częstotliwość na 120 Hz, co zostanie zasygnalizowane informacją na wyświetlaczu miernika i ponownie wykonać pomiary.

Multimetr ESCORT sam dobiera zakres pomiarowy, w związku z czym po przełączeniu próbki należy chwilę poczekać. Przed przystąpieniem do pomiaru rezystancji (przed włączeniem grzałki) należy połączyć układ oraz ustawić wszystkie parametry na przyrządach.

Pierwszy pomiar rezystancji wykonujemy w temperaturze otoczenia, następnie autotransformatorem regulujemy napięcie w taki sposób, aby próbki półprzewodników nagrzewały się w miarę wolno, umożliwiając równomierne ich nagrzewanie oraz odczyt wartości rezystancji, a z drugiej strony, aby zdążyć wykonać ćwiczenie w przewidzianym czasie.

Wartości napięcia zasilania grzałki wyznaczono doświadczalnie. Dla temperatury $t < 80^{\circ}\text{C}$ $U = 90\text{ V}$, natomiast po przekroczeniu 80°C napięcie należy podnieść do $U = 110\text{ V}$.

Wyniki pomiarów i obliczeń należy zanotować w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów rezystancji próbek półprzewodników

| T | T | $1000/T$ | R_{Si} | R_{Ge} | R_{GaAs} | σ_{Si} | σ_{Ge} | σ_{GaAs} |
|--------------------|-----|----------|----------|----------|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $^{\circ}\text{C}$ | K | 1/K | Ω | Ω | Ω | $1/\Omega \cdot \text{cm}$ | $1/\Omega \cdot \text{cm}$ | $1/\Omega \cdot \text{cm}$ |
| 20 | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| 160 | | | | | | | | |

4.2. Opracowanie wyników pomiarów

Tabelę 4 należy uzupełnić wartościami konduktywności σ , dla badanych półprzewodników, wyliczonymi ze wzoru:

$$\sigma = \frac{1}{R} \frac{l}{S} \quad (6)$$

Temperatura w K obliczana jest według wzoru:

$$T(K) = t(^{\circ}\text{C}) + 273 \quad (7)$$

Po wykonaniu obliczeń należy wykreślić charakterystyki $\ln \sigma = f(1000/T)$ dla badanych próbek. Z wykresu należy wybrać odcinek prostoliniowy o największej stromości i odczytać wartości σ_1, σ_2 oraz $1000/T_1, 1000/T_2$. Następnie należy obliczyć wartości E_g , korzystając ze wzoru:

$$\Delta E = E_g = \frac{\ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot 2000k}{\frac{1000}{T_1} - \frac{1000}{T_2}} \quad (8)$$

5. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabelę z wynikami pomiarów i obliczeń,
- przykładowe obliczenia,
- charakterystyki $\ln\sigma = f(1000/T)$,
- prostoliniowy fragment charakterystyki, z którego odczytano $\sigma_1, \sigma_2, 1000/T_1, 1000/T_2$,
- obliczoną wartość E_g ,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników z komentarzem.

6. PYTANIA KONTROLNE

- Modele pasmowe dla metalu, półprzewodnika i dielektryka.
- Półprzewodnik samoistny i domieszkowany, rodzaje domieszkowania.
- Zależność koncentracji nośników w zależności od temperatury, wzory.
- Podział diod, charakterystyki.
- Co to jest półprzewodnik?
- Złącze p - n, właściwości.

7. LITERATURA

- Marciniak W.: *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*. Warszawa, WNT 1979.
- Streetman B.: *Przyrządy półprzewodnikowe*. Warszawa, WNT 1976.
- Wert C.A., Thomson R.M.: *Fizyka ciała stałego*. Warszawa, PWN 1974.
- Bany B., Tęсны W.: *Diody i tranzystory mocy*. Warszawa, WNT 1988.
- Januszewski S., Świętek H.: *Diody i tyrystory w pytaniach i odpowiedziach*. Warszawa, WNT 1984.
- Kaźmierkowski M.P., Matysik J.: *Podstawy elektroniki i elektroenergetyki*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej 1990.
- Rusek M.: *Materialoznawstwo elektroniczne*. Warszawa, Wyd. Wojskowej Akademii Technicznej 1971.