



## Ćwiczenie nr 4

### **Wpływ temperatury na półprzewodnik (termistory) oraz na złącze p-n**

#### **I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania**

- zależność konduktywności półprzewodnika od temperatury,
- charakterystyka rezystancyjno-temperaturowa oraz prądowo-napięciowa termistora
- rezystancja statyczna i dynamiczna termistora, temperaturowy współczynnik rezystancji, opór cieplny i stała czasowa termistora,
- wpływ temperatury na prąd złącza spolaryzowanego w kierunku zaporowym,
- wpływ temperatury na powielanie lawinowe i zjawisko Zenera,
- wpływ temperatury na charakterystykę złącza spolaryzowanego w kierunku przewodzenia,
- graniczna temperatura złącza, moc admysyjna,
- przebieg cieplny złącza

#### **II. Program zajęć**

- pomiar charakterystyki  $R_T=f(T)$  termistora,
- wyznaczenie  $R_8$ ,  $B$  i  $\alpha_T$  (w temperaturze otoczenia, np. 25°C) na podstawie wyżej wym. zależności wykreślonej w układzie  $R_T=f(1/T)$  - ( $R_T$  w skali logarytmicznej)
- pomiar charakterystyki  $U=f(I)$  termistora
- pomiar zależności  $U=f(T)$  dla diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia
- pomiar zależności  $I=f(T)$  dla diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym
- obliczenie temperaturowego współczynnika napięcia oraz szerokości pasma zabronionego  $W_g$  na podstawie wykresu  $U=f(T)$  dla kierunku przewodzenia (wykres w liniowym układzie współrzędnych)
- obliczenie szerokości pasma zabronionego  $W_g$  na podstawie wykresu  $I=f(1/T)$  dla kierunku zaporowego w półlogarytmicznym układzie współrzędnych

#### **III. Literatura**

- W. Marciniak - Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
- A. Świt, J. Pułtorak - Przyrządy półprzewodnikowe
- T. Ohly, Z. Radzimski - Elementy elektroniczne (skrypt do laboratorium)
- U. Schmidt, E. Kuźma - Termistory,  
Poradnik Inżyniera Elektronika

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

#### IV A) Wiadomości wstępne dotyczące wpływu temperatury na półprzewodnik

Konduktywność półprzewodnika opisuje zależność:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

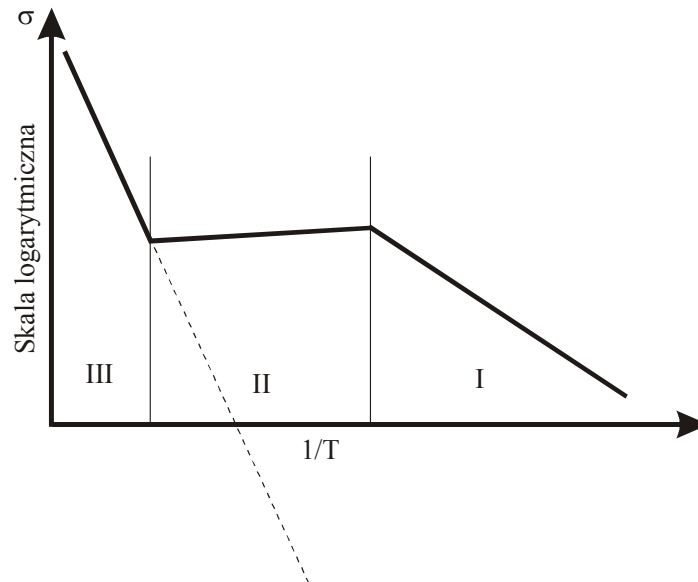
$q$  - ładunek elementarny,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  - ruchliwość elektronów i dziur,  $n$ ,  $p$  - koncentracja odpowiednio elektronów i dziur.

Zależność przewodności półprzewodnika od temperatury wynika przede wszystkim ze zmiany koncentracji nośników.

Dla półprzewodnika niesamoistnego:

- dla temperatur niskich (zakres I na rys.1) - eksponencjalna zależność przewodności od  $\frac{1}{T}$

(jonizacja atomów domieszek)



Rys. 1. Zależność konduktywności półprzewodnika niesamoistnego od temperatury

- dla temperatur średnich (II) - domieszki zjonizowane, koncentracja nośników praktycznie nie zmienia się, nieznaczne zmniejszenie przewodności ze wzrostem temperatury wynika ze zmniejszenia się ruchliwości nośników,
- dla temperatur wysokich (III) - generacja nośników z pasma podstawowego.

**Termistor** - rezystor półprzewodnikowy wykorzystujący zależność rezystancji od temperatury. Termistory podzielić można na trzy grupy:

- NTC, o ujemnym TWR, najczęściej stosowane, (TWR - temperaturowy współczynnik

rezystancji,  $TWR = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ ),

- PTC, o dodatnim TWR w ograniczonym zakresie temperatur,
- CTR o ujemnym TWR, o dużej jego wartości bezwzględnej a wąskim zakresie temperatur.

Temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR) oznaczany najczęściej  $\alpha_T$  dla termistorów NTC wynosi kilka do kilkunastu %/K, a więc jest co najmniej o rząd większy niż dla metali. Termistory zawierają najczęściej tlenki metali przejściowych o składzie niestechiometrycznym. Zależność rezystancji termistora od temperatury ma postać:

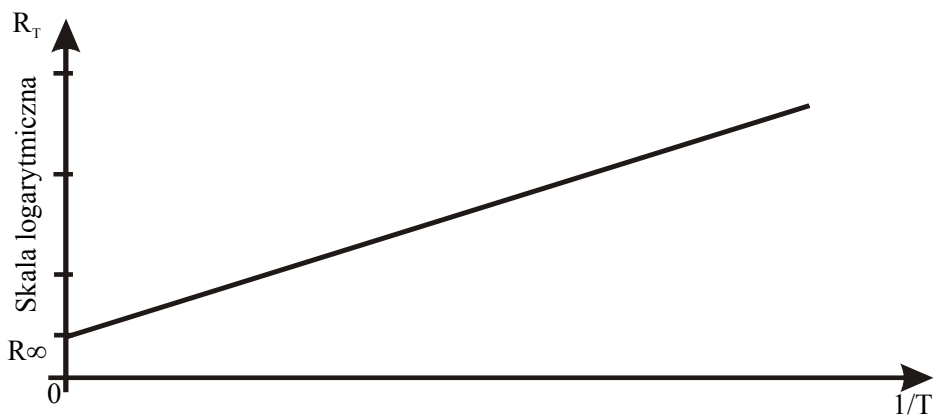
$$R_T = R_\infty \exp\left[\frac{B}{T}\right] \quad \ln R_T = \ln R_\infty + \frac{B}{T} \quad (\text{rys.1})$$

gdzie:  $R_\infty$  - rezystancja termistora dla  $1/T=0$

$B$  - stała w {K}, zwykle równa kilka tysięcy K

Stąd:

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$



Rys. 2. Charakterystyka termistora NTC w układzie półlogarytmicznym  $R_T=f(1/T)$

### Charakterystyka prądowo-napięciowa termistora

Temperatura termistora zależy od wydzielanej w nim mocy zgodnie z zależnością

$$T = K \cdot P_T + T_a$$

gdzie:  $T_a$  - temperatura otoczenia

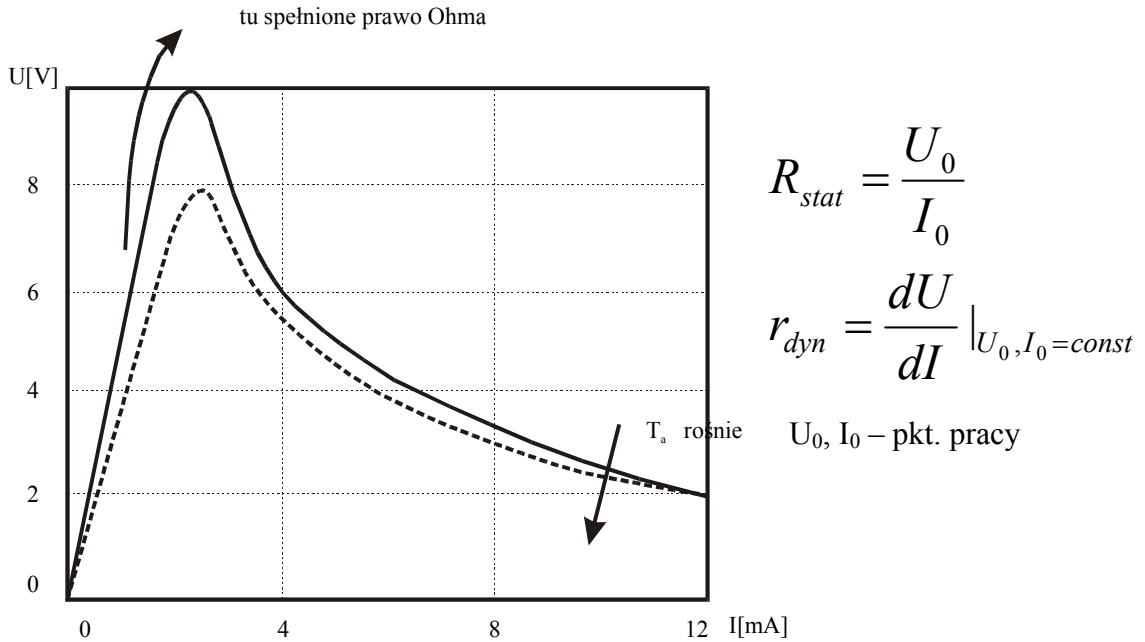
$T$  - temperatura termistora

$K$  - opór cieplny  $\left[\frac{K}{W}\right]$

$P_T$  - moc wydzielana w termistorze

Charakterystykę prądowo-napięciową termistora przedstawioną na rys. 3 opisuje wzór:

$$U = I \cdot R_T = I \cdot R_\infty \exp\left[\frac{B}{KP_T + T_a}\right]$$



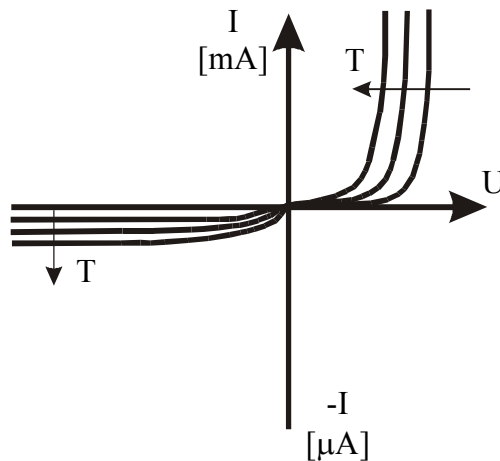
Rys. 3. Charakterystyka prądowo-napięciowa termistora

Jeżeli iloczyn  $U \cdot I$  jest mały to  $K \cdot P_T \ll T_a$  i  $U \approx I \cdot R_\infty \exp\left(\frac{B}{T_a}\right) = I \cdot R_a$

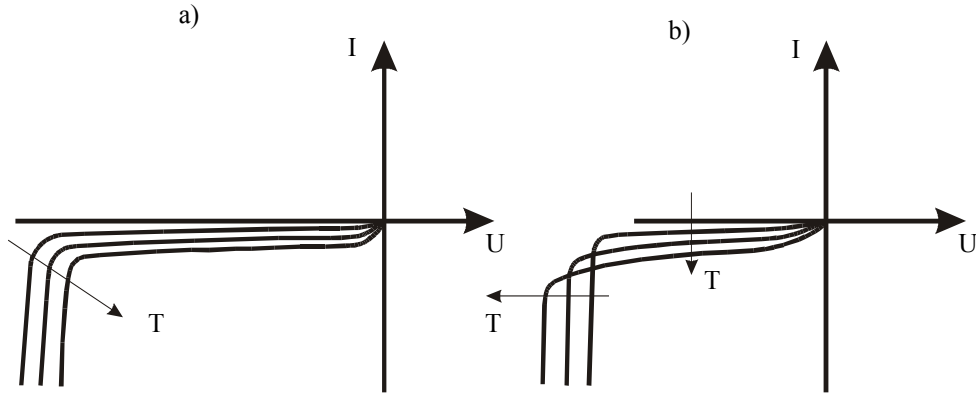
gdzie  $R_a$  - rezystancja termistora w temperaturze otoczenia.

Tak więc w tym zakresie charakterystyki napięcie  $U$  jest liniową funkcją natężenia prądu  $I$ . W miarę wzrostu natężenia prądu,  $I$  moc wydzielana w termistorze powoduje wzrost jego temperatury,  $T$  a więc spadek  $R_T$  termistora. Napięcie na termistorze  $U = I \cdot R_T$  zależne jest od rosnącego natężenia prądu  $I$  i malejącej rezystancji termistora  $R_T$ . Stąd występuje maksimum funkcji  $U = f(I)$  a następnie spadek jej wartości (szybciej maleje  $R_T$ ).

#### IV B) Wiadomości wstępne dotyczące wpływu temperatury na złącze p-n.



Rys. 4. Wpływ wzrostu temperatury na charakterystykę złącza p-n w zakresie przewodzenia i zakresie zaporowym przed przebiciem



Rys. 5. Wpływ wzrostu temperatury na charakterystykę złącza p-n w zakresie przebicia; a) zjawisko Zenera, b) zjawisko przebicia lawinowego

Równanie opisujące charakterystykę I - U złącza p-n ma postać:

$$I = I_R \left( \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie: I - prąd płynący przez złącze

$I_R$  - prąd wsteczny złącza

1. Polaryzacja złącza p-n w kierunku zaporowym (napięcie polaryzacji mniejsze od napięcia przebicia)

Przy zaporowej polaryzacji złącza p-n  $\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \ll 1$  i natężenie prądu złącza można

wyrazić uproszczonym wzorem  $I \cong -I_R$  przy czym  $I_R = I_S + I_g$  ( $I_S$  - prąd nasycenia,  $I_g$  prąd generacji).

a) Dla materiałów o małej szerokości pasma zabronionego (np. Ge,  $W_g = 0,7$  eV)  $I_S \gg I_g$

więc:

$$\begin{aligned} I_R = I_S &= Sq \left[ \frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right] = Sq \left[ \frac{D_n}{L_n} \cdot \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \cdot \frac{n_i^2}{N_D} \right] = \\ &= Sq n_i^2 \left[ \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right] = Sq A^2 T^3 \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right) \cdot \left[ \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right] \end{aligned}$$

gdzie: S - powierzchnia złącza,  $D_n$ ,  $D_p$  - współczynnik dyfuzji odpowiednio elektronów i dziur,  $n_p$ ,  $p_n$  - koncentracje nośników mniejszościowych,  $L_n$ ,  $L_p$  - drogi dyfuzji odpowiednio elektronów i dziur,  $n_i$  - koncentracja par elektron-dziura,  $N_A$ ,  $N_D$  - koncentracja odpowiednio akceptorów i donorów.

Można przyjąć, że występujące w tym wzorze stałe nie zależą od temperatury, więc:

$$I_s = BT^3 \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right) \quad \text{stad:} \quad \frac{dI_s}{dT} = \left(\frac{3}{T} + \frac{W_g}{kT^2}\right)I_s$$

Wyrażenie na temperaturowy współczynnik prądu ma więc postać:

$$\frac{1}{I_s} \frac{dI_s}{dT} = \frac{3}{T} + \frac{W_g}{kT^2}$$

dla Ge w temperaturze pokojowej ( $T=300\text{ K}$ )  $\frac{1}{I_s} \frac{dI_s}{dT} = 0,1\text{K}^{-1} = 10\% / \text{K}$ .

Człon eksponencjalny we wzorze na  $I_s$  najsilniej zależy od temperatury i decyduje o wpływie temperatury na natężenie prądu złącza a pozostałe czynniki można traktować jako stałe.

Można więc napisać, że:

$$I_s = A' \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right)$$

Logarytmując powyższą zależność otrzymujemy:

$$\lg I_s = \lg A' - 0,434 \frac{W_g}{k} \cdot \frac{1}{T}$$

Obrazem otrzymanego wzoru w półlogarytmicznym układzie współrzędnych

$I_s = f\left(\frac{1}{T}\right)$  jest linia prosta (rys. 6) i na podstawie dwóch punktów tej linii  $\left(\frac{1}{T_1}, I_1\right)$  oraz

$\left(\frac{1}{T_2}, I_2\right)$  można określić szerokość pasma zabronionego:

$$W_g = \frac{k}{0,434} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \cdot \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

gdzie:  $k=8,65 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ .

b) dla materiałów o większej szerokości pasma zabronionego (np. Si,  $W_g = 1,1 \text{ eV}$ )

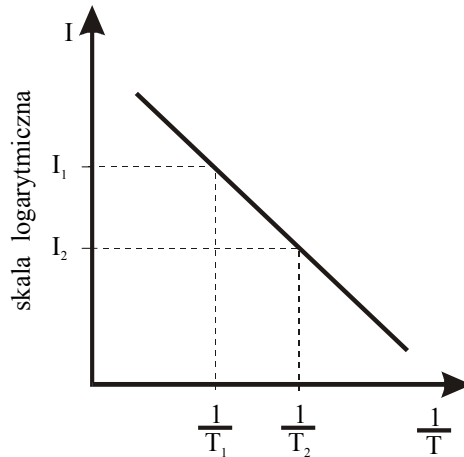
$I_g \gg I_s$  więc:

$$I_R \approx I_g$$

$$I_R \approx I_g = \frac{qn_i d}{\tau} = \frac{qd}{\tau} AT^{3/2} \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right)$$

gdzie:  $d$  - grubość warstwy zaporowej złącza

$\tau$  - czas życia nośników



Rys. 6. Zależność prądu złącza p-n od temperatury dla polaryzacji zaporowej (wykres w skali półlogarytmicznej)

Analogicznie jak w punkcie a) otrzymujemy zależność

$$I_g \approx B'T^{3/2} \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right) \quad \text{stad:} \quad \frac{dI_g}{dT} = \left(\frac{3}{2T} + \frac{W_g}{2kT^2}\right) I_g \quad \text{a więc} \quad \text{temperaturowy}$$

współczynnik prądu wynosi:

$$\frac{1}{I_g} \frac{dI_g}{dT} = \frac{3}{2T} + \frac{W_g}{2kT^2}$$

dla Si w temperaturze pokojowej ( $T=300$  K)

$$\frac{1}{I_g} \frac{dI_g}{dT} \approx 0,08K^{-1} = 8\% / K$$

Podobnie jak w punkcie a) „pomijając” czynnik  $T^{3/2}$  otrzymujemy wzór stanowiący dalsze uproszczenie:

$$I_g = B'' \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right)$$

po jego zlogarytmowaniu obliczamy szerokość pasma zabronionego  $W_g$ :

$$W_g = \frac{2k}{0,434} \frac{1}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

## 2. Polaryzacja złącza p-n w kierunku przewodzenia

Przy polaryzacji w kierunku przewodzenia można w istotny sposób uprościć równanie (1) bowiem:

- w warunkach polaryzacji w kierunku przewodzenia  $\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) \gg 1$

- przy dostatecznie dużej wartości napięcia polaryzacji diody składowa dyfuzyjna prądu przeważa nad prądem rekombinacji i można przyjąć, że  $n \approx 1$ .

Po uwzględnieniu powyższych faktów równanie (1) upraszcza się do następującej postaci:

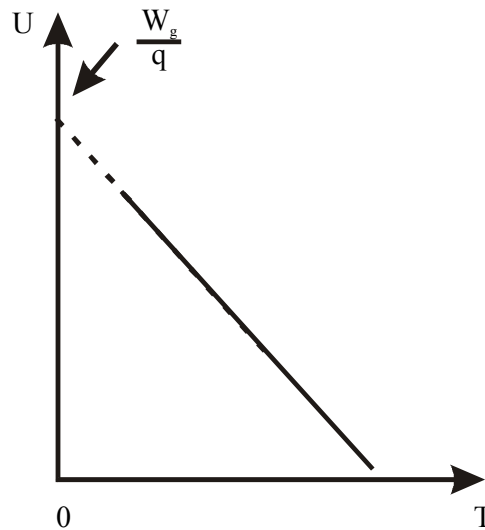
$$I = I_F = A' \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$$

tak więc  $\ln I_F = \ln A' - \frac{W_g}{kT} + \frac{qU}{kT}$  stąd  $U = \frac{k}{q} \ln \frac{I_F}{A'} \cdot T + \frac{W_g}{q}$

gdzie  $I_F$  - prąd złącza przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Obrazem zależności  $U=f(T)$

(rys.7) jest linia prosta o nachyleniu  $\frac{dU}{dT} = \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{I_F}{A'}$  zwanym temperaturowym

współczynnikiem spadku napięcia, przy stałym natężeniu prądu. Jego wartość wynosi ok.  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .



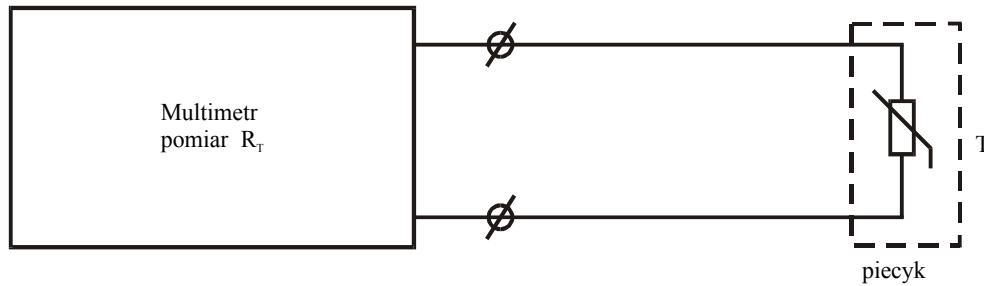
Rys. 7. Zależność napięcia na złączu p-n od temperatury dla kierunku przewodzenia (dla  $I_F = \text{const.}$ )



### V A) Pomiary charakterystyk termistora

Charakterystykę  $R_T=f(T)$  termistora zmierzyć w układzie przedstawionym na rys. 8.

- \* W czasie pomiaru stosować małe natężenie prądu (np. 1 mA) aby uniknąć samopodgrzewania termistora.
- \* Piecyk wraz z termistorem nagrzać do temp. ok.  $90^{\circ}\text{C}$ , wyłączyć grzałkę piecyka i mierzyć



charakterystykę w czasie studzenia.

Rys. 8. Układ do pomiaru charakterystyki  $R_T=f(T)$  termistora

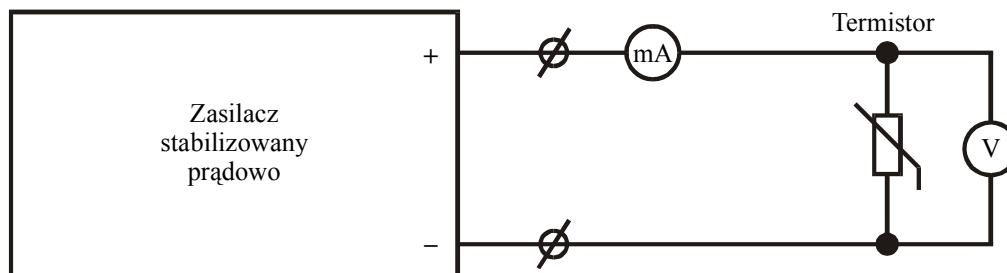
- \* Zmierzone wartości  $R_T$  i  $T$  wykreślić na papierze półlogarytmicznym (papier półlogarytmiczny dostępny w laboratorium) we współrzędnych  $R_T=f(1/T)$ . Na podstawie uzyskanego wykresu wyznaczyć (patrz rys. 2):

a)  $R_{\infty}$

$$b) \quad B = \frac{1}{\lg e} \frac{\lg R_{T_2} - \lg R_{T_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = 2,3 \frac{\lg \left( \frac{R_{T_2}}{R_{T_1}} \right)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$

gdzie:  $e$  - podstawa logarytmu naturalnego

c)  $\alpha_T = -\frac{B}{T^2}$  w temperaturze otoczenia



Rys. 9. Układ do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej termistora

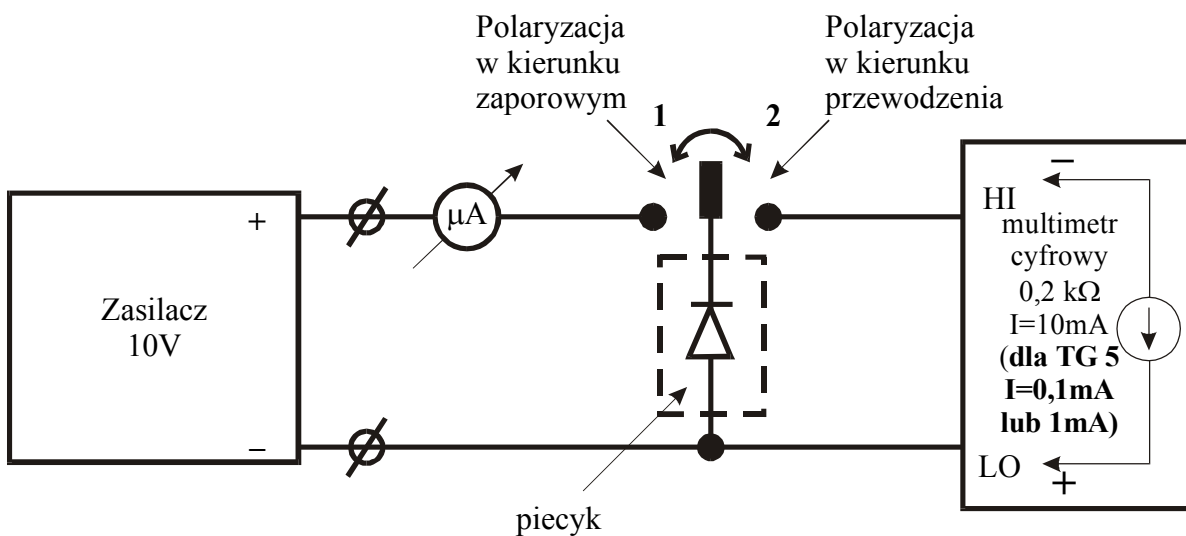
Charakterystykę  $U=f(I)$  termistora zmierzyć w układzie przedstawionym na rys. 9.

\* ustawić wartość natężenia prądu po ustaleniu równowagi termicznej mierzyć spadek napięcia na termistorze.

**Uwaga:** nie przekraczać mocy admysyjnej termistora

### V B) Pomiary dotyczące wpływu temperatury na złącze p-n

Pomiary wykonywać należy w układzie „uniwersalnym” tj. wykorzystywanym dla obu polaryzacji złącza (rys.10). Multimetr VC10T na zakresie omomierza  $0,2\text{ k}\Omega$  jest źródłem stałego prądu  $I=10\text{ mA}$ . Wskazania multimetru odpowiadają napięciu na elemencie w mV. Przy połączeniu w pozycji „1” - pomiar prądu w kierunku zaporowym przy stałym napięciu, „2” - pomiar napięcia w kierunku przewodzenia przy stałym prądzie.



Rys. 10. Układ do pomiaru charakterystyk temperaturowych złącza p-n dla kierunku przewodzenia i kierunku zaporowego

Pomiary wykonywać w warunkach chłodzenia diody po uprzednim nagraniu piecyka do temperatury 110°C dla diod Si a 70°C dla diod Ge. Po osiągnięciu wymaganej temperatury wyłączyć grzałkę piecyka. Po wyłączeniu grzałki temperatura w piecu jeszcze rośnie ze względu na bezwładność układu. Jest to obserwowane w postaci zmniejszania spadku napięcia na diodzie w połączeniu 2 na rys. 10. Wyniki pomiarów należy zacząć zapisywać w momencie gdy zaobserwuje się ustalenie spadku napięcia na diodzie a następnie powolne zwiększanie jego wartości. Pomiary wykonywać na przemian dla kierunku przewodzenia (położenie 2, pomiar napięcia multimetrem) oraz dla kierunku zaporowego (położenie 1, pomiar prądu mikroamperomierzem), odnotowując przy każdym pomiarze temperaturę. Pomiary zakończyć gdy temperatura spadnie do wartości ok. 40 - 50°C. Wyniki uzyskane przy polaryzacji w kierunku przewodzenia przedstawić na wykresie  $U=f(T)$  w skali liniowej i obliczyć na podstawie tego wykresu szerokość pasma zabronionego i temperaturowy współczynnik napięcia. Wyniki uzyskane przy polaryzacji zaporowej przedstawić na wykresie  $I=f(1/T)$  w półlogarytmicznym układzie współrzędnych i obliczyć na podstawie tego wykresu szerokość pasma zabronionego i temperaturowy współczynnik prądu.