

<b>WFiiS</b>	Imię i nazwisko: 1. 2.		ROK	GRUPA	ZESPÓŁ
PRACOWNIA FIZYCZNA I i II	TEMAT:				NR ĆWICZENIA
Data wykonania:	Data oddania:	Zwrot do poprawy:	Data oddania:	Data zliczenia:	OCENA

### ***Cel ćwiczenia:***

Wyznaczenie współczynnika oporu platyny. Pomiar charakterystyki termopary miedź-konstantan.

### ***Wstęp teoretyczny:***

Zjawisko oporu elektrycznego w metalu jest wynikiem rozpraszania nośników prądu – elektronów. Rozpraszanie zakłóca ich uporządkowany ruch w kierunku wyznaczonym przez przyłożone pole elektryczne. Mechanika kwantowa uczy, że doskonale periodyczny układ atomów nie rozprasza elektronów. W konsekwencji opór doskonałego kryształu, bez domieszek obcych atomów i bez dyslokacji, w temperaturze zera bezwzględnej powinien maleje do zera.

W rzeczywistym metalu istnieją dwa podstawowe mechanizmy rozpraszania elektronów, a więc dwa źródła oporności:

- rozpraszanie elektronów na drganiach termicznych sieci krystalicznej. W języku mechaniki kwantowej mówimy o zderzeniach elektronów z fononami, czyli kwantami drgań sieci krystalicznej. W wysokich temperaturach energia drgań sieci, a więc i liczba fononów jest proporcjonalna do temperatury bezwzględnej  $T$ . Prawdopodobieństwo zderzenia elektronu z fononem, a w konsekwencji opór elektryczny są w grubym przybliżeniu wprost proporcjonalne do  $T$ .

W niskich temperaturach liczba fononów szybko maleje do zera. W konsekwencji składnik oporu związany z fononami również maleje do zera. Zależna od temperatury i malejąca do zera w 0 K. część oporu nosi nazwę oporu idealnego  $R_i$ . Nazwa bierze się stąd, że opór ten występuje w każdym kryształ, również w idealnym kryształ bez domieszek i wad struktury. Rozpraszanie elektron-fonon jest głównym, lecz nie jedynym źródłem oporu idealnego. Mniejszy wkład wnosi rozpraszanie elektron-elektron, a w atomach pierwiastków magnetycznych takich jak Fe czy Mn – rozpraszanie na momentach magnetycznych atomów.

- Drugim składnikiem oporu jest rozpraszanie na niedoskonałościach sieci, które zaburzają jej periodyczność. Są nimi obce atomy (zwłaszcza w stopach) i dyslokacje. Ta część oporu, która pozostaje również z zerze bezwzględnej. W czystych pierwiastkach metalicznych oporność resztkowa jest mała. Natomiast osiąga duże wartości w stopach, gdyż losowe rozmieszczenie różnych atomów w węzłach sieci czyni ją siecią nieperiodyczną. Dlatego oporność stopów jest na ogół dużo większa od oporności metali czystych i słabo zależy od temperatury.

Doświadczalne prawo głoszące, że oporność właściwa metalu jest sumą oporności idealnej i resztkowej:

$$\rho(T) = \rho_i(T) + \rho_{reszt}$$

nosi nazwę reguły Matthiessena.

Nie ma analitycznego wzoru, który mógłby opisać funkcję  $R(T)$  w pełnym zakresie temperatur. W wąskim zakresie np.: od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$ , zależność  $R(T)$  jest w przybliżeniu liniowa. Zależność tą można opisać wzorem:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha t)$$

gdzie  $t$  oznacz temperaturę w  $^{\circ}\text{C}$ , natomiast  $R_0$  jest wartością oporności metalu w temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ . Współczynnik  $\alpha$  nazywamy temperaturowym współczynnikiem oporu, jego wartość zależy od rodzaju metalu.

Zależność oporności metali od temperatury została wykorzystana do konstrukcji termometrów oporowych. Pożądana jest odporność metalu na utlenianie i wpływ temperatury. Szczególnie znaczenie mają termometry oporowe platynowe, które umożliwiają pomiar temperatury w zakresie od kilkunastu K do około 900K. Dzięki chemicznej obojętności platyny wskazania termometru cechuje wyjątkowa dokładność i stabilność w czasie. Wadą termometrów Pt są stosunkowo duże rozmiary sondy oraz konieczność stosowania układów nieczułych na oporność doprowadzeń.

W zakresie temperatur helowych (4K), gdzie oporność i napięcie termoelektryczne metali stają się bardzo mało czułe na zmiany temperatury, szerokie zastosowanie znalazł oporowy termometr węglowy.

Utwórzmy obwód elektryczny z dwóch różnych metali. Jeżeli cały obwód znajduje się w jednakowej temperaturze, to nie zaobserwujemy żadnego prądu (było by to pogwałceniem II zasady termodynamiki). Jeżeli jednak temperatury wzdłuż obwodu będą różne, włączony w obwód galwanometr wykaże powstanie różnicy potencjałów i przepływ prądu. Doświadczenie wykazuje, że powstałe napięcie termoelektryczne zależy wyłącznie od wartości temperatur na złączach oraz od rodzaju metali tworzących złącze.

Zjawisko powstawania siły termoelektrycznej zostało wykorzystane do pomiaru temperatury z pomocą tzw. Termopar. Typową termoparę stanowią dwa metale zespawane w złączu pomiarowym. Pozostałe końce, połączone przewodami z miernikiem napięcia, stanowią złącze odniesienia, które należy utrzymywać w stałej temperaturze, na przykład  $0^{\circ}\text{C}$ . Obecnie termopara składa się z co najmniej trzech metali, gdyż przewody stanowią trzeci metal, a wewnątrz miernika mogą istnieć dalsze złącza. Napięcie termoelektryczne jest jednak takie samo jak w przypadku złącza dwóch metali, o ile tylko obydwa złącza odniesienia mają tę samą temperaturę.

Fizyczną przyczyną występowania napięcia termoelektrycznego jest powstanie na złączu dwóch metali kontaktowej różnicy potencjałów do kilku V, wynikającej z różnicy wartości energii Fermiego. Pomimo to w obwodzie o stałej temperaturze prąd nie płynie gdyż suma napięć kontaktowych wzdłuż obwodu jest równa zero. Napięcie kontaktowe w niewielkim stopniu zależy od temperatury, więc gdy temperatury złącz staną się różne równowaga napięć zostaje zachwiana i pojawi się wypadkowe napięcie termoelektryczne.

Charakterystyką termopary  $E(t)$  nazywamy zależność napięcia termoelektrycznego od temperatury złącza pomiarowego w sytuacji, gdy drugie złącze utrzymamy w  $0^{\circ}\text{C}$ . Charakterystykę termopary podaje się w formie tabeli, wykresu lub rozwinięcia w szeregu potęgowy:

$$E(t) = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \dots$$

W rozwinięciu nie ma wyrazu wolnego, gdyż, gdy obydwa złącza są utrzymywane w temperaturze zera Celsjusza, napięcie termoelektryczne jest równe zero.

Współczynniki  $a_1, a_2, a_3 \dots$  wyznacza się przez komputerowe dopasowanie wielomianu do zmierzonej wartości  $E(t)$ . Liczba wyrazów potrzebna do odtworzenia charakterystyki termopary zależy od zakresu temperatury i dokładności pomiaru. W

przypadku małego zakresu temperatur rzędu kilkudziesięciu stopni może okazać się, że wystarcza wyraz liniowy:

$$E(t) = a_1 t$$

Zastosowanie termopar pozwala na wykonanie pomiarów temperatury w szerokim zakresie sięgającym od 4K do 2000K. Złącze pomiarowe termopary może być wykonane z cienkich drucików, posiada wtedy znikomą pojemność cieplną i krótki czas reakcji na zmianę temperatury. Wygodnym sposobem pomiaru niewielkich napięć termoelektrycznych (rzędu kilku mV) jest zastosowanie woltomierza cyfrowego. Wadą termopary (w porównaniu z termometrem oporowym) jest konieczność utrzymania złącza odniesienia w stałej temperaturze i nieco mniejsza dokładność.

W zakresie 77-600K najczęściej stosowana jest termopara miedź-konstantan charakteryzująca się stosunkowo dużą wartością napięcia termoelektrycznego.

Dla zakresu 4-77K stosuje się specjalne stopy, gdyż zwykle termopary posiadają zbyt małą czułość. Dla wysokich temperatur stosuje się układy metali trudno topliwych i odpornych na utlenianie. Przykładowo, termopara  $Pt - Pt_{0,90}Rh_{0,10}$  umożliwia pomiar 1800K.

W praktyce złącze odniesienia często znajduje się w temperaturze pokojowej  $t_0$  różnej od  $0^\circ C$ . W tym przypadku woltomierz wskazuje:

$$U = E(t) - E(t_0)$$

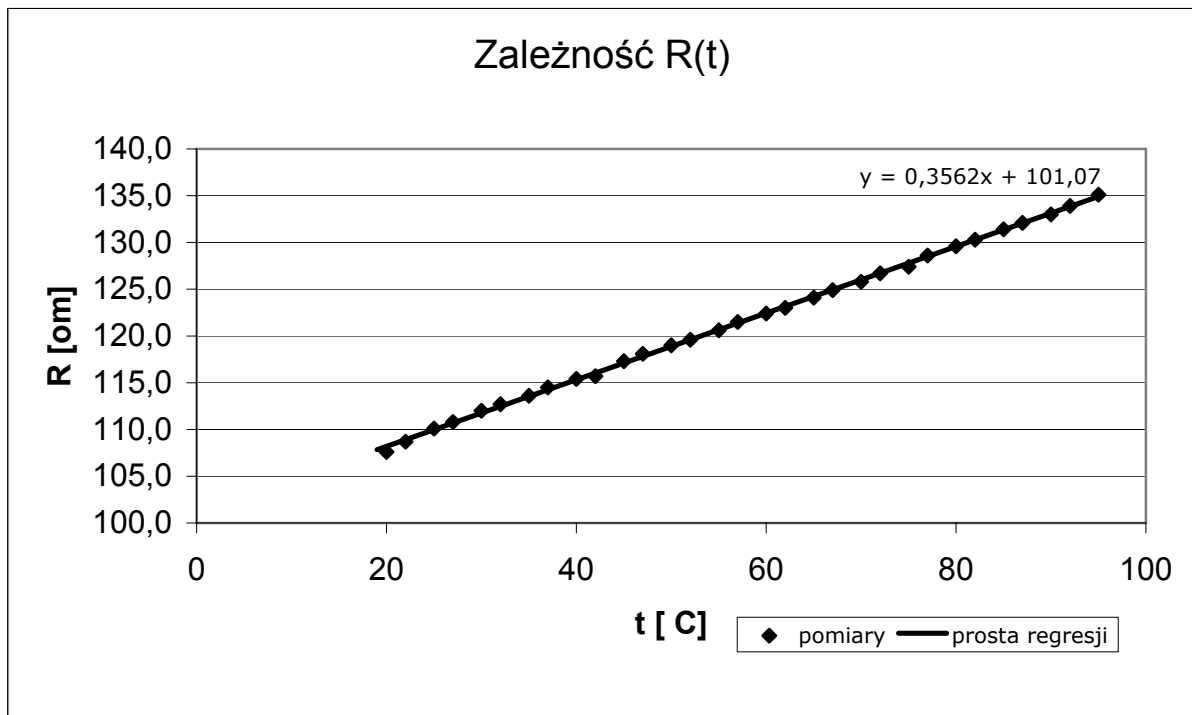
Dla uzyskania wartości  $E(t)$  należy w tym przypadku zmierzyć temperaturę złącza odniesienia  $t_0$  innym termometrem (np. rtęciowym) i do zmierzonej wartości dodać poprawkę  $E(t_0)$ , odczytaną z charakterystyki termopary.

**Wyniki pomiarów:**

Temperatura $t$ [°C]	oporność platyny $R$ [Ω]	napięcie termoelektryczne $E$ [mV]	$E/t$ [mV/°C]	temperaturowy współczynnik oporu $\alpha$ [1/°C]
20	107,6	0,827	0,041	0,00380
22	108,7	0,968	0,044	0,00395
25	110,1	1,117	0,045	0,00404
27	110,8	1,211	0,045	0,00400
30	112,0	1,353	0,045	0,00400
32	112,7	1,443	0,045	0,00397
35	113,6	1,588	0,045	0,00389
37	114,5	1,687	0,046	0,00392
40	115,4	1,820	0,046	0,00385
42	115,7	1,861	0,044	0,00374
45	117,3	2,051	0,046	0,00384
47	118,1	2,125	0,045	0,00385
50	119,0	2,264	0,045	0,00380
52	119,6	2,347	0,045	0,00377
55	120,6	2,474	0,045	0,00375
57	121,5	2,590	0,045	0,00377
60	122,4	2,682	0,045	0,00373
62	123,0	2,781	0,045	0,00371
65	124,1	2,899	0,045	0,00371
67	124,9	2,982	0,045	0,00372
70	125,8	3,135	0,045	0,00369
72	126,7	3,216	0,045	0,00371
75	127,4	3,400	0,045	0,00365
77	128,6	3,459	0,045	0,00371
80	129,6	3,612	0,045	0,00370
82	130,3	3,694	0,045	0,00370
85	131,4	3,824	0,045	0,00369
87	132,1	3,919	0,045	0,00369
90	133,0	4,063	0,045	0,00367
92	133,9	4,169	0,045	0,00368
95	135,1	4,318	0,045	0,00369

*Tabela 1*

### Opracowanie wyników pomiarów:



Powyższy wykres przedstawia liniową zależność między oporem platyny w funkcji temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury zaobserwowano wzrost rezystancji dla opornika platynowego.

Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono prostą regresji o następującym wzorze:

$$y = 0,3562x + 101,07$$

W celu wyznaczenia temperaturowego współczynnika oporu platyny przekształcono wzór  $R(T) = R_0(1 + \alpha t)$  otrzymując poniższą zależność:

$$\alpha = \frac{R(t) - R_0}{t \cdot R_0},$$

gdzie  $R(t)$  jest oporem zmierzonym w danej temperaturze  $t$ .  $R_0$  jest oporem platyny w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ . W opracowaniu ćwiczenia przyjęto  $R_0 = 100\Omega$ .

Zestawienie wyników dla każdej serii pomiarów pokazano w tabeli nr 1. Średnia wartość temperaturowego współczynnika oporu platyny wynosi:

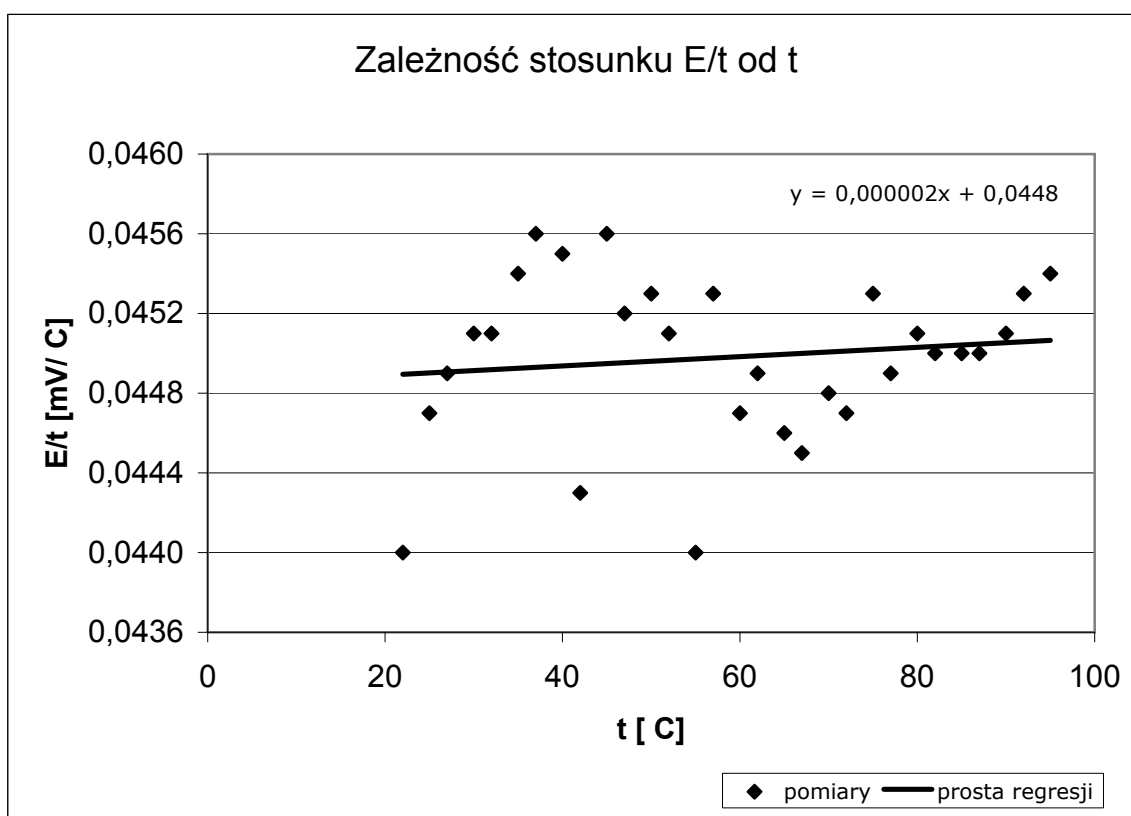
$$\alpha_{sr} = 0,00391 \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right],$$

a odchylenie standardowe:

$$\sigma_\alpha = 0,00003 \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right].$$

Wartość temperaturowego współczynnika oporu platyny otrzymana na podstawie wykonanych pomiarów wynosi  $\alpha = 0,00391(0,00003) \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$ . Otrzymana wartość mieści się w przedziale o promieniu  $\sigma$  od wartości rzeczywistej.

Różnica procentowa od wartości tablicowej  $\Delta\alpha_\% = 0,255\%$ .



Powyższy wykres przedstawia zależność stosunku napięcia termoelektrycznego i temperatury od temperatury. Pomimo pozornego rozrzutu wyników (przyczyną jest znaczna różnica wartości na czwartym i piątym miejscu po przecinku) prosta regresji ma bardzo niski współczynnik nachylenia rzędu  $10^{-6}$  (można przyjąć, że  $\approx 0$ ), co potwierdza teorię. Równanie prostej regresji otrzymane za pomocą metody najmniejszych kwadratów:

$$y = 2 \cdot 10^{-6} x + 0,0448,$$

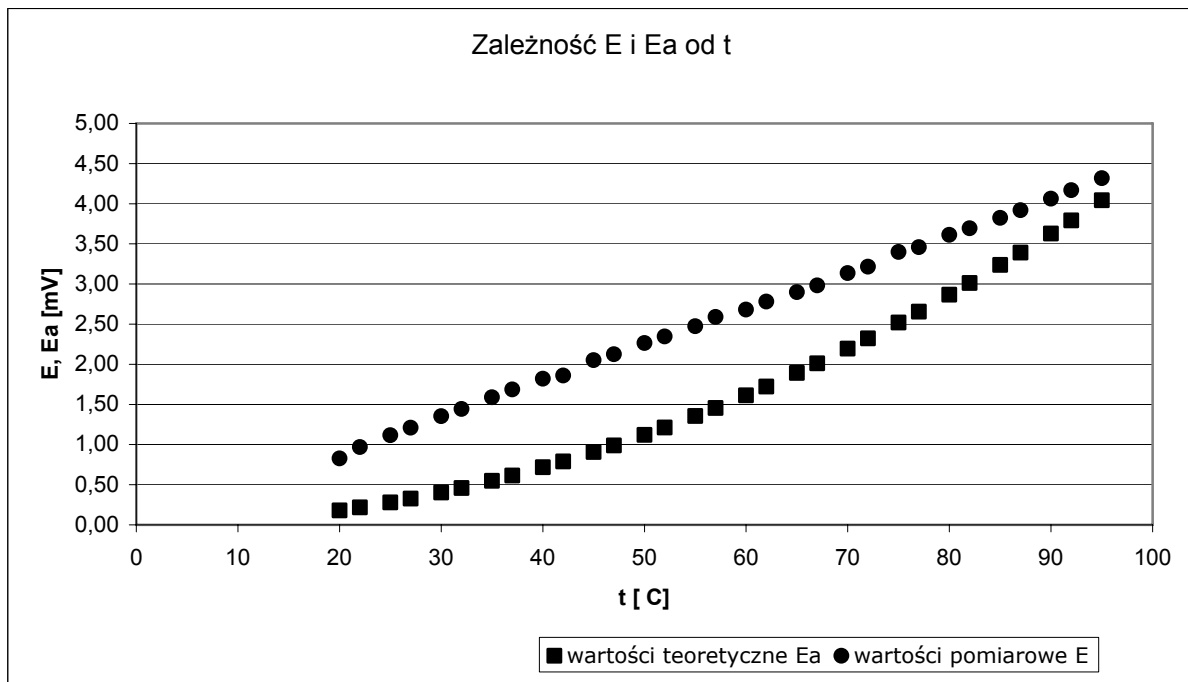
z czego:

$$a = 2 \cdot 10^{-6}$$

$$b = 0,0448$$

Wykorzystując współczynniki regresji we wzorze aproksymującym charakterystykę termopary  $E_{\alpha}(t) \approx at + bt^2$  otrzymujemy poniższe zestawienie:

<b>E [mV]</b>	<b>Ea [mV]</b>
0,827	0,179
0,968	0,217
1,117	0,280
1,211	0,327
1,353	0,403
1,443	0,459
1,588	0,549
1,687	0,613
1,820	0,717
1,861	0,790
2,051	0,907
2,125	0,990
2,264	1,120
2,347	1,211
2,474	1,355
2,590	1,456
2,682	1,613
2,781	1,722
2,899	1,893
2,982	2,011
3,135	2,195
3,216	2,322
3,400	2,520
3,459	2,656
3,612	2,867
3,694	3,012
3,824	3,237
3,919	3,391
4,063	3,629
4,169	3,792
4,318	4,043



Jak widać na powyższym wykresie różnica między teoretyczną wartością, wynikiem otrzymanym z doświadczenia jest rzędu 0,5-1mV. W zastosowaniach technicznych i przemysłowych nie odgrywa ona większej roli. Zatem można stwierdzić, że przybliżenie charakterystyki termopary przez wzór  $E_{\alpha}(t) \approx at + bt^2$  jest wystarczające.

### ***Wnioski:***

W doświadczeniu otrzymano wartość temperaturowego współczynnika oporu platyny:  $\alpha = 0,00391(0,00003) [1/^\circ\text{C}]$ , która zawiera się w przedziale o promieniu  $\sigma$  od wartości rzeczywistej. Różnica procentowa od wartości tablicowej  $\Delta\alpha_{\%} = 0,255\%$ .

Ponadto pokazano, że dobrym przybliżeniem charakterystyki termopary jest wzór

$$E_{\alpha}(t) \approx at + bt^2.$$

Jeżeli jest wymagana większa dokładność charakterystyki można wykorzystać wzór

$$\text{ogólniejszy: } E_{\alpha}(t) = a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + \dots$$

### ***Załączniki:***

[1] – kartka z wynikami pomiarów;