

EFEKTY TERMOELEKTRYCZNE W CIAŁACH STAŁYCH

Instrukcja zawiera:

1. Cel ćwiczenia
2. Wprowadzenie teoretyczne; definicje i wzory
3. Opis wykonania ćwiczenia
4. Sposób przygotowania sprawozdania
5. Lista pytań do kolokwium pisemnego
6. Literatura

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów ze zjawiskami termoelektrycznymi w ciałach stałych na przykładzie pomiaru siły termoelektrycznej materiału tlenkowego Nd_2CuO_4 . W aspekcie teoretycznym dyskutowane są mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie zjawisk termoelektrycznych, w aspekcie praktycznym przedstawione jest wykorzystanie tych zjawisk w zastosowaniach związanych z konwersją energii.

2. Wprowadzenie teoretyczne; definicje i wzory

Równanie kinetyczne Boltzmanna

Wszelkie efekty fizyczne uwarunkowane ruchem nośników ładunku pod wpływem pól zewnętrznych i wewnętrznych nazywają się efektami kinetycznymi lub zjawiskami transportu. Zalicza się do nich: *przewodnictwo elektryczne i cieplne, zjawiska galwanomagnetyczne, termomagnetyczne i termoelektryczne*. Opis teoretyczny tych efektów bazuje na równaniu kinetycznym Boltzmanna, określającym zmianę stanu układu cząstek (nośników) pod wpływem działania różnych czynników. W kryształach rozkład elektronów według stanów opisuje pewna funkcja $f(\vec{r}, \vec{k}, t)$, której zmiana w czasie t w każdym punkcie (\vec{r}, \vec{k}) przestrzeni fazowej uwarunkowana jest ruchem cząstek w przestrzeni zwykłej (wektor \vec{r}) i w przestrzeni wektora falowego \vec{k} . Zmianę tę można przedstawić w postaci sumy trzech wyrazów: wyrazu polowego, całki zderzeń i członu związanego z dyfuzją:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{pol} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{zd} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{dyf}$$

Człon polowy jest wynikiem ruchu cząstek i działania sił zewnętrznych wywołanych przyłożonymi polami, cała zderzeń opisuje procesy rozpraszania na lokalnych zaburzeniach sieci przestrzennej (krystalicznej), natomiast człon dyfuzyjny wynika z procesów dyfuzji cząstek.

Dla niezmiennego w czasie stanu stacjonarnego równanie kinetyczne Boltzmanna sprowadza się do uproszczonej postaci:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{pol} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{zd} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{dyf} = 0$$

Opuszczając człon dyfuzyjny, można wyprowadzić, że:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{zd} &= -\frac{f - f_0}{\tau} \\ \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{pol} &= \vec{v}\nabla_{\vec{r}}f + \frac{1}{\hbar}\vec{F}\nabla_{\vec{k}}f \\ \vec{v}\nabla_{\vec{r}}f + \frac{1}{\hbar}\vec{F}\nabla_{\vec{k}}f &= \frac{f - f_0}{\tau} \end{aligned}$$

gdzie: f_0 – funkcja rozkładu w stanie równowagi, τ – czas relaksacji, \vec{v} – prędkość unoszenia, \hbar – stała Plancka podzielona przez 2π , \vec{F} – wektor siły.

Postać ta jest bazowa do wyprowadzenia szeregu zależności fizycznych opisujących zjawiska transportu, w przypadku gdy w układzie działa stale przynajmniej jeden niezmienny bodziec (np. pole elektryczne, pole magnetyczne, gradient temperatury).

Dodatkowo, w celu dalszego uproszczenia, możliwe jest pominięcie zależności funkcji rozkładu od położenia (\vec{r}), ponieważ istotne znaczenie mają tylko zmiany energii nośników. W tym przypadku funkcję f można przedstawić w postaci:

$$f(\vec{k}) = f_0(\vec{k}) - \vec{C}(E)\vec{k} \frac{\partial f_0}{\partial E}$$

gdzie wektorowa funkcja $\vec{C}(E)$ zależy od tego jakie siły działają na nośniki ładunku w kryształach.

Równanie Boltzmanna w obecności (jedynie) gradientu temperatury – siła termoelektryczna

Jeżeli jednorodny przewodnik zostaje nagrany nierównomiernie, to średnia energia nośników ładunków i ich koncentracja będzie większa tam, gdzie jest wyższa temperatura. Gradient temperatury doprowadzi zatem do powstania gradientu średniej energii nośników i gradientu ich koncentracji. W rezultacie w materiale pojawi się strumień dyfuzyjny nośników ładunku czyli prąd elektryczny. Ponieważ jednak w obwodzie otwartym w stanie stacjonarnym gęstość prądu we wszystkich punktach musi być równa zero, powstanie w wyniku rozdzielania ładunków pole

elektryczne, które wywoła prąd kompensujący prąd dyfuzyjny. Różnica potencjałów tego pola (siła elektromotoryczna) odniesiona do jednostkowej różnicy temperatur nazywa się bezwzględną, różnicową siłą termoelektryczną:

$$\alpha = \frac{\Delta V_T}{\Delta T}$$

gdzie V_T jest różnicą potencjałów pola dla danej różnicy temperatur. Formalnie, powyższy wzór jest bardziej poprawny, gdy $\Delta T \rightarrow 0$:

$$\alpha = \frac{dV_T}{dT}$$

Umownie przypisuje się sile termoelektrycznej znak taki jak względny znak potencjału chłodniejszego końca przewodnika.

Do wyprowadzenia wielkości α można posłużyć się równaniem kinetycznym Boltzmanna. W rozważanym przypadku na nośniki ładunku oddziałuje tylko jeden zewnętrzny bodziec – gradient temperatury ΔT . Wypadkowa siła działająca na nośniki wynosi:

$$\vec{F} = -e\nabla\left(\varphi - \frac{E_F}{e}\right)$$

gdzie: e – ładunek elektronu, φ – potencjał pola elektrycznego, E_F – energia Fermiego. Równocześnie, funkcja wektorowa $\vec{C}(E)$ wyraża się zależnością:

$$\vec{C}(E) = -\frac{h}{m^*} \tau \left[\frac{E - E_F}{T} \nabla T + \nabla(e, \varphi) \right]$$

gdzie: h – stała Plancka, m^* – masa efektywna nośników, E – energia.

Posługując się powyższymi zależnościami, wprowadzonymi do równania Boltzmanna oraz wykorzystując fakt, że w stanie stacjonarnym gęstość prądu elektrycznego jest równa zero otrzymuje się ogólne równanie na siłę termoelektryczną:

$$\alpha = \frac{k_B}{e} \int \left(\frac{E - E_F}{k_B T} \right) \frac{\sigma(E)}{\sigma} dE$$

gdzie: k_B – stała Boltzmanna, $\sigma(E)$ – przewodnictwo nośników o energii E , $\sigma = \int \sigma(E) dE$ – całkowite przewodnictwo wszystkich nośników. Wyrażenie powyższe jest słuszne dla wszystkich mechanizmów przewodzenia. Wkład pojedynczego nośnika do siły termoelektrycznej jest miarą odległości pasma (poziomu) energetycznego, w którym znajduje się nośnik, od poziomu Fermiego. Obserwowany znak siły termoelektrycznej zależy od tego, czy nośniki mające dominujący wkład

do przewodnictwa są elektronami (znak ujemny) czy dziurami elektronowymi (znak dodatni, np. gdy pasmo efektywne jest prawie całkowicie wypełnione).

W przypadku materiałów, w których obserwuje się kilka rodzajów nośników ładunku, wszystkie rodzaje nośników wnoszą określony wkład do siły termoelektrycznej w stopniu odpowiadającym całkowitemu przewodnictwu kryształu:

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i \sigma_i}{\sum_i \sigma_i}$$

gdzie α_i oraz σ_i to odpowiednio siła termoelektryczna i przewodnictwo elektryczne danego typu nośników.

Zależności na siłę termoelektryczną dla przewodników różnego rodzaju

W zależności od mechanizmu przewodzenia ładunku w materiale, możliwe jest wyprowadzenie szczegółowych wzorów określających wartość α :

1. Dla materiałów metalicznych oraz półprzewodników zdegenerowanych (posiadających efektywne pasmo pochodzące od domieszki):

$$\alpha = \frac{\pi^2 k_B T}{3e E_F}$$

Wartości siły termoelektrycznej dla metali są niewielkie (rzędu kilku $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$). Znak siły termoelektrycznej jest uzależniony od kształtu funkcji gęstości stanów w okolicy poziomu Fermiego.

2. W przypadku półprzewodników samoistnych:

$$\alpha = \frac{k_B}{e} \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p} \left(2 + \frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

gdzie: μ_n oraz μ_p to odpowiednio ruchliwość elektronów i dziur, E_g – wielkość przerwy energetycznej. Wartości siły termoelektrycznej są znacznie większe niż dla metali (rzędu kilkudziesięciu – kilkuset $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$)

3. Dla półprzewodników domieszkowych wyrażenia na siłę termoelektryczną ma postać:

$$\alpha = \frac{k_B}{e} \left(-\frac{E_F}{k_B T} + r + \frac{5}{2} \right)$$

gdzie r zależy od mechanizmu rozpraszania nośników i jest równe $3/2$ dla rozpraszania na domieszkach (w zakresie niskich temperatur) oraz $-1/2$ dla rozpraszania na fononach akustycznych (w zakresie temperatur wyższych).

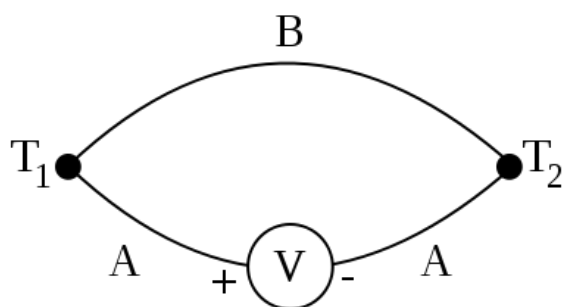
4. Jeśli w przewodniku występuje mechanizm skaczącego elektronu (mechanizm hoppingowy), to α określa zależność:

$$\alpha = \frac{k_B}{e} \left(\frac{\Delta S}{k_B} + \ln \frac{c_0 - c}{c} \right)$$

gdzie ΔS – zmiana entropii związana z wprowadzeniem dodatkowego nośnika, c_0 – stężenie dostępnych położeń (węzłów sieci krystalicznej) dla nośników, c – rzeczywiste stężenie nośników.

Zjawiska termoelektryczne

Jak wspomniano powyżej, w izolowanym przewodniku prądu, w którym występuje gradient temperatury powstaje pole elektryczne, którego różnica potencjałów odniesiona do różnicy temperatur jest bezwzględną siłą termoelektryczną. Wartość α jest *parametrem materiałowym* zależnym od temperatury. Pomiar bezwzględnej wartości α jest jednak utrudniony: na poniższym rysunku przedstawiono obwód elektryczny składający się z dwóch różnych przewodników A i B, których miejsca połączenia znajdują się w różnych temperaturach T_1 i T_2 . Mierzona wartość napięcia termoelektrycznego (pod warunkiem, że końce przewodnika A umieszczone w woltomierzu znajdują się w takiej samej temperaturze) będzie wynikała z siły termoelektrycznej *zarówno* przewodnika A jak i B. Wyznaczona w ten sposób wielkość siły termoelektrycznej α będzie natomiast różnicą $\alpha_B - \alpha_A$.



Jeśli wiadome jest, że wartości α_A są znacznie mniejsze niż α_B , to w przybliżeniu pomiar taki pozwala określić bezwzględną wartość α_B . W szczególnym przypadku możliwe jest zastosowanie nadprzewodnika, zamiast przewodnika A, dla którego $\alpha_A = 0$. Dodatkowo, ponieważ siła termoelektryczna jest zależna od temperatury, różnica temperatur $T_2 - T_1$ nie może być duża.

Zobrazowane na powyższym rysunku zjawisko, a więc powstawanie siły elektromotorycznej w obwodzie zawierającym dwa metale lub półprzewodniki gdy ich złącza znajdują się w różnych

temperaturach, określa się mianem *efektu Seebecka*. Efekt ten został wykorzystany w konstrukcji termopar (czujników temperatury).

Innym zjawiskiem termoelektrycznym jest *efekt Peltiera*, który polega na wydzielaniu lub pochłanianiu energii, pod wpływem przepływu prądu elektrycznego przez złącze półprzewodników. W wyniku pochłaniania energii na jednym złączu i wydzielania energii na drugim, pomiędzy złączami powstaje różnica temperatur. Jest to efekt w pewnym sensie odwrotny do efektu Seebecka. Znalazł on zastosowanie w tzw. modułach Peltiera wykorzystywanych w urządzeniach chłodniczych (lodówki, chłodzenie elektroniki, itp.).

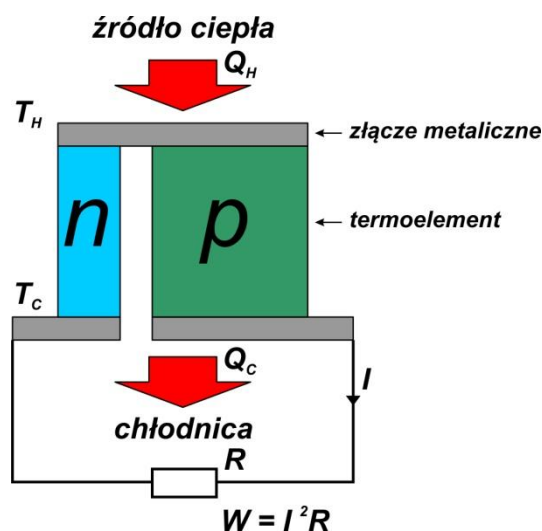
Efekt Thomsona polega na wydzielaniu się lub pochłanianiu ciepła podczas przepływu prądu elektrycznego (tzw. ciepła Thomsona) w jednorodnym przewodniku, w którym istnieje gradient temperatury. W takim przypadku ilość wydzielonego lub pochłoniętego ciepła jest proporcjonalna do różnicy temperatury, natężenia prądu i czasu jego przepływu, a także od rodzaju przewodnika. Formalnie, ze względów symetrii można również wyróżnić czwarty efekt termoelektryczny, odwrotny do efektu Thomsona.

Praktyczne wykorzystanie efektów termoelektrycznych

Efekty termoelektryczne znalazły swoje praktyczne zastosowanie w urządzeniach służących do konwersji energii. Można wyróżnić dwie podstawowe grupy tych urządzeń:

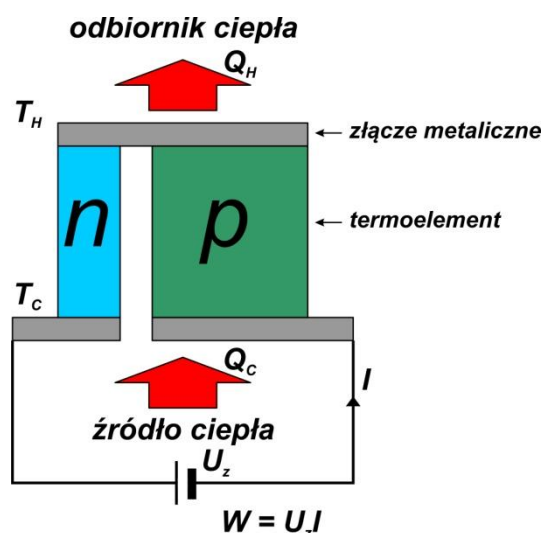
- generatory termoelektryczne (wykorzystujące zjawisko Seebecka),
- pompy ciepła (stosowane najczęściej jako chłodziarki, wykorzystujące zjawisko Peltiera).

Na poniższym rysunku przedstawiono schemat jednostopniowego generatora termoelektrycznego zbudowanego z pary półprzewodników typu *n* i *p*. Na rysunku: T_H – temperatura źródła ciepła, T_C – temperatura chłodnicy, Q_H – moc cieplna pobierane ze źródła ciepła, Q_C – moc cieplna oddawana do chłodnicy, I – natężenie prądu, R – rezystancja obciążenia, W – wygenerowana moc elektryczna.



Występująca różnica temperatur prowadzi do powstania napięcia termoelektrycznego na obu półprzewodnikach. Ponieważ obwód zawierający oba półprzewodniki jest zamknięty i obciążony rezystancją R , zakładając zaniedbywalnie mały opór materiałów termoelektrycznych, w obwodzie będzie płynął prąd o natężeniu I , a wygenerowana moc wynosić będzie W . Należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór materiałów termoelektrycznych (termoelementów n i p), dzięki którym wartość napięcia termoelektrycznego jest maksymalnie duża (sumuje się).

Rysunek poniżej przedstawia jednostopniową pompę cieplną zbudowaną (podobnie jak w przypadku generatora termoelektrycznego) z pary półprzewodników typu n i p . Na rysunku: T_H – temperatura odbiornika ciepła, T_C – temperatura źródła ciepła, Q_H – moc cieplna oddawana do odbiornika ciepła, Q_C – moc cieplna pobierana ze źródła ciepła, I – natężenie prądu, U_z – napięcie (stałe) zasilania, W – moc elektryczna zasilania.



W przypadku powyższej pompy cieplnej dostarczenie mocy elektrycznej W , a więc wymuszenie przez obwód przepływu prądu I powoduje przeniesienie ciepła ze źródła ciepła do odbiornika ciepła, co w konsekwencji umożliwia chłodzenie źródła ciepła.

W obu powyższych przypadkach krytycznym parametrem decydującym o efektywności pracy użytych materiałów elektrycznych jest *bezwymiarowy współczynnik dobroci termoelektrycznej* ZT :

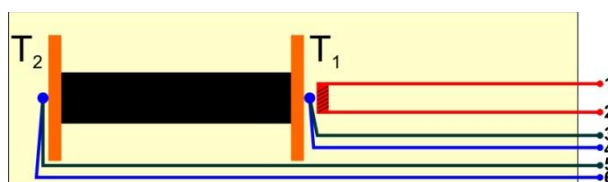
$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} T$$

gdzie: α – siła termoelektryczna danego materiału, σ – przewodnictwo elektryczne, λ – przewodnictwo cieplne, T – temperatura.

Używane komercyjnie materiały termoelektryczne (np. stopy Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3) posiadają $ZT \approx 1$, co dla generatora (pompy) jednostopniowej przy $\Delta T = 300\text{K}$ daje sprawność około 10%. Jeśli możliwe by było zastosowanie materiałów o $ZT = 4$, to sprawność urządzeń termoelektrycznych wzrosła by do ok. 30%.

3. Opis wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie wykonuje się przy użyciu specjalistycznego układu przystosowanego do pomiaru siły termoelektrycznej metodą dynamiczną. Prostopadłościenna próbka tlenku Nd_2CuO_4 umieszczona jest pomiędzy dwiema złotymi elektrodami (schemat ideowy sondy na rysunku poniżej). Do każdej z elektrod dospawane są końcówki termopar Pt-PtRh10 (termopara typu S), które służą do odczytu temperatur T_1 i T_2 po obu stronach próbki (połączenia 3 i 4 oraz 5 i 6). Kończówki termopar wykonane z platyny (3 i 5) służą równocześnie do pomiaru napięcia termoelektrycznego ΔV . Dodatkowo, obok termopary T_1 znajduje się grzejnik elektryczny wymuszający gradient temperatury, zasilany przez wyjścia 1 i 2. Całość umocowana jest w sondzie alundowej umieszczonej w rurze kwarcowej znajdującej się w piecu oporowym.



Istotą metody dynamicznej jest pomiar napięcia termoelektrycznego dla różnych wartości gradientu temperatury (w zakresie kilku stopni). Wartość siły termoelektrycznej wyznacza się jako współczynnik kierunkowy prostej poprowadzonej przez punkty o współrzędnych $(\Delta T, \Delta V)$. Metoda dynamiczna pozwala na minimalizację błędów pomiarowych, ponieważ mogące występować w układzie pomiarowym zakłócenia (np. dodatkowe potencjały) nie wpływają na wynik pomiarowy: rejestruje się jedynie *zmiany napięcia termoelektrycznego w funkcji zmian gradientu temperatury*.

Wykonanie ćwiczenia

1. Sprawdzić prawidłowość połączeń, włączyć zasilanie pieca i przyrządów pomiarowych.
2. Zgodnie z zaleceniem prowadzącego ustawić na programatorze pieca program temperaturowy. Przykładowo: szybkie nagrzewanie do temperatury 300°C , a następnie wolne grzanie do 500°C z tempem $2^\circ/\text{min}$.
3. W odstępach czasu wskazanych przez prowadzącego (przykładowo co 10 min) lub dla temperatur wskazanych przez prowadzącego (przykładowo co 20 stopni) rejestrować punkty pomiarowe w sposób następujący:
 - a) odczytać i zanotować wskazania napięć termopar T_1 i T_2 ,
 - b) włączyć zasilanie grzejnika,
 - c) odczytać i zanotować wskazania napięć termopar T_1 i T_2 oraz wartość napięcia termoelektrycznego ΔV ,
 - d) po ok. 10 sekundach powtórzyć czynności z punktu c kolejno 8 – 10 razy,
 - e) wyłączyć zasilanie grzejnika.

4. Sposób przygotowania sprawozdania

1. Przedstawić na wykresie zależność siły termoelektrycznej Nd_2CuO_4 w mierzonym zakresie temperatur. W tym celu należy:
 - a) obliczyć wartość średnią temperatury pomiaru na podstawie wskazań termopar (punkt 3a wykonania ćwiczenia) przeliczonych wg tablicy kalibracji dla termopary typu S znajdującej się na końcu skryptu,
 - b) narysować zależność zmierzonego ΔV (w μV) w funkcji ΔT (3c i d), wartości ΔT (w stopniach $^\circ\text{C}$),
 - c) dopasować linię prostą do wykresu, wartość współczynnika kierunkowego prostej jest wartością siły termoelektrycznej dla danej temperatury,
 - d) czynności z punktów a – c powtórzyć dla wszystkich średnich temperatur pomiaru, w których rejestrowane były punkty pomiarowe,
 - e) uzyskane wartości $\alpha(T)$ przedstawić na wspólnym wykresie,
 - f) określić dominujący rodzaj nośników w Nd_2CuO_4 ,
 - g) na podstawie uproszczonego wzoru: $\alpha = \frac{k_B}{e} \ln \frac{c_0 - c}{c}$ określić zależność ułamkowego obsadzenia dostępnych położeń $\frac{c}{c_0}$ w funkcji temperatury.

5. Lista pytań do kolokwium pisemnego

1. Równanie kinetyczne Boltzmanna ([1], wybrane str. rozdz. 16; [2], instrukcja)
2. Ogólne wzory na siłę termoelektryczną (instrukcja)
3. Metale, półprzewodniki samoistne, półprzewodniki domieszkowe ([2], wybrane zagadnienia)
4. Wzory wyrażające siłę termoelektryczną dla różnych przewodników (instrukcja)
5. Efekty termoelektryczne Seebecka, Peltiera i Thomsona ([3], rozdz. 2 i 3)
6. Znaczenie pojęć użytych we wzorach: masa efektywna, czas relaksacji, ruchliwość, dziura elektronowa ([1]; [2]; odpowiednie hasła z Wikipedii)
7. Zasada działania generatorów termoelektrycznych i termoelektrycznych pomp ciepła ([3], rozdz. 2 i 3)
8. Bezwymiarowy współczynnik dobroci termoelektrycznej ZT ([3], rozdz. 3; instrukcja)
9. Metoda pomiaru siły termoelektrycznej metodą dynamiczną (instrukcja)
10. Budowa i zasada działania termopary (instrukcja, odpowiednie hasło z Wikipedii)

6. Literatura

1. N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, *Fizyka ciała stałego*, PWN 1986
2. C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN 1999
3. K. Wojciechowski, monografia: *Wpływ modyfikacji strukturalnych na właściwości termoelektryczne materiałów z grupy skutterudytów*, Ceramika/Ceramics 106 (2008)

Przedstawiona w dalszej części instrukcji tablica kalibracji termopary typu S (której zimne końce znajdują się w temperaturze 0°C) jest kopią tabeli udostępnionej w Internecie przez firmę Pyromation, Inc.

Efekty termoelektryczne w ciałach stałych

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Thermoelectric Voltage in Millivolts												
-50	-0.236											-50
-40	-0.194	-0.199	-0.203	-0.207	-0.211	-0.215	-0.219	-0.224	-0.228	-0.232	-0.236	-40
-30	-0.150	-0.155	-0.159	-0.164	-0.168	-0.173	-0.177	-0.181	-0.186	-0.190	-0.194	-30
-20	-0.103	-0.108	-0.113	-0.117	-0.122	-0.127	-0.132	-0.136	-0.141	-0.146	-0.150	-20
-10	-0.053	-0.058	-0.063	-0.068	-0.073	-0.078	-0.083	-0.088	-0.093	-0.098	-0.103	-10
0	0.000	-0.005	-0.011	-0.016	-0.021	-0.027	-0.032	-0.037	-0.042	-0.048	-0.053	0
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055	0
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113	10
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.143	0.149	0.155	0.161	0.167	0.173	20
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.204	0.210	0.216	0.222	0.229	0.235	30
40	0.235	0.241	0.248	0.254	0.260	0.267	0.273	0.280	0.286	0.292	0.299	40
50	0.299	0.305	0.312	0.319	0.325	0.332	0.338	0.345	0.352	0.358	0.365	50
60	0.365	0.372	0.378	0.385	0.392	0.399	0.405	0.412	0.419	0.426	0.433	60
70	0.433	0.440	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502	70
80	0.502	0.509	0.516	0.523	0.530	0.538	0.545	0.552	0.559	0.566	0.573	80
90	0.573	0.580	0.588	0.595	0.602	0.609	0.617	0.624	0.631	0.639	0.646	90
100	0.646	0.653	0.661	0.668	0.675	0.683	0.690	0.698	0.705	0.713	0.720	100
110	0.720	0.727	0.735	0.743	0.750	0.758	0.765	0.773	0.780	0.788	0.795	110
120	0.795	0.803	0.811	0.818	0.826	0.834	0.841	0.849	0.857	0.865	0.872	120
130	0.872	0.880	0.888	0.896	0.903	0.911	0.919	0.927	0.935	0.942	0.950	130
140	0.950	0.958	0.966	0.974	0.982	0.990	0.998	1.006	1.013	1.021	1.029	140
150	1.029	1.037	1.045	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.094	1.102	1.110	150
160	1.110	1.118	1.126	1.134	1.142	1.150	1.158	1.167	1.175	1.183	1.191	160
170	1.191	1.199	1.207	1.216	1.224	1.232	1.240	1.249	1.257	1.265	1.273	170
180	1.273	1.282	1.290	1.298	1.307	1.315	1.323	1.332	1.340	1.348	1.357	180
190	1.357	1.365	1.373	1.382	1.390	1.399	1.407	1.415	1.424	1.432	1.441	190
200	1.441	1.449	1.458	1.466	1.475	1.483	1.492	1.500	1.509	1.517	1.526	200
210	1.526	1.534	1.543	1.551	1.560	1.569	1.577	1.586	1.594	1.603	1.612	210
220	1.612	1.620	1.629	1.638	1.646	1.655	1.663	1.672	1.681	1.690	1.698	220
230	1.698	1.707	1.716	1.724	1.733	1.742	1.751	1.759	1.768	1.777	1.786	230
240	1.786	1.794	1.803	1.812	1.821	1.829	1.838	1.847	1.856	1.865	1.874	240
250	1.874	1.882	1.891	1.900	1.909	1.918	1.927	1.936	1.944	1.953	1.962	250
260	1.962	1.971	1.980	1.989	1.998	2.007	2.016	2.025	2.034	2.043	2.052	260
270	2.052	2.061	2.070	2.078	2.087	2.096	2.105	2.114	2.123	2.132	2.141	270
280	2.141	2.151	2.160	2.169	2.178	2.187	2.196	2.205	2.214	2.223	2.232	280
290	2.232	2.241	2.250	2.259	2.268	2.277	2.287	2.296	2.305	2.314	2.323	290
300	2.323	2.332	2.341	2.350	2.360	2.369	2.378	2.387	2.396	2.405	2.415	300
310	2.415	2.424	2.433	2.442	2.451	2.461	2.470	2.479	2.488	2.497	2.507	310
320	2.507	2.516	2.525	2.534	2.544	2.553	2.562	2.571	2.581	2.590	2.599	320
330	2.599	2.609	2.618	2.627	2.636	2.646	2.655	2.664	2.674	2.683	2.692	330
340	2.692	2.702	2.711	2.720	2.730	2.739	2.748	2.758	2.767	2.776	2.786	340
350	2.786	2.795	2.805	2.814	2.823	2.833	2.842	2.851	2.861	2.870	2.880	350
360	2.880	2.889	2.899	2.908	2.917	2.927	2.936	2.946	2.955	2.965	2.974	360
370	2.974	2.983	2.993	3.002	3.012	3.021	3.031	3.040	3.050	3.059	3.069	370
380	3.069	3.078	3.088	3.097	3.107	3.116	3.126	3.135	3.145	3.154	3.164	380
390	3.164	3.173	3.183	3.192	3.202	3.212	3.221	3.231	3.240	3.250	3.259	390

Efekty termoelektryczne w ciałach stałych

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Thermoelectric Voltage in Millivolts												
400	3.259	3.269	3.279	3.288	3.298	3.307	3.317	3.326	3.336	3.346	3.355	400
410	3.355	3.365	3.374	3.384	3.394	3.403	3.413	3.423	3.432	3.442	3.451	410
420	3.451	3.461	3.471	3.480	3.490	3.500	3.509	3.519	3.529	3.538	3.548	420
430	3.548	3.558	3.567	3.577	3.587	3.596	3.606	3.616	3.626	3.635	3.645	430
440	3.645	3.655	3.664	3.674	3.684	3.694	3.703	3.713	3.723	3.732	3.742	440
450	3.742	3.752	3.762	3.771	3.781	3.791	3.801	3.810	3.820	3.830	3.840	450
460	3.840	3.850	3.859	3.869	3.879	3.889	3.898	3.908	3.918	3.928	3.938	460
470	3.938	3.947	3.957	3.967	3.977	3.987	3.997	4.006	4.016	4.026	4.036	470
480	4.036	4.046	4.056	4.065	4.075	4.085	4.095	4.105	4.115	4.125	4.134	480
490	4.134	4.144	4.154	4.164	4.174	4.184	4.194	4.204	4.213	4.223	4.233	490
500	4.233	4.243	4.253	4.263	4.273	4.283	4.293	4.303	4.313	4.323	4.332	500
510	4.332	4.342	4.352	4.362	4.372	4.382	4.392	4.402	4.412	4.422	4.432	510
520	4.432	4.442	4.452	4.462	4.472	4.482	4.492	4.502	4.512	4.522	4.532	520
530	4.532	4.542	4.552	4.562	4.572	4.582	4.592	4.602	4.612	4.622	4.632	530
540	4.632	4.642	4.652	4.662	4.672	4.682	4.692	4.702	4.712	4.722	4.732	540
550	4.732	4.742	4.752	4.762	4.772	4.782	4.793	4.803	4.813	4.823	4.833	550
560	4.833	4.843	4.853	4.863	4.873	4.883	4.893	4.904	4.914	4.924	4.934	560
570	4.934	4.944	4.954	4.964	4.974	4.984	4.995	5.005	5.015	5.025	5.035	570
580	5.035	5.045	5.055	5.066	5.076	5.086	5.096	5.106	5.116	5.127	5.137	580
590	5.137	5.147	5.157	5.167	5.178	5.188	5.198	5.208	5.218	5.228	5.239	590
600	5.239	5.249	5.259	5.269	5.280	5.290	5.300	5.310	5.320	5.331	5.341	600
610	5.341	5.351	5.361	5.372	5.382	5.392	5.402	5.413	5.423	5.433	5.443	610
620	5.443	5.454	5.464	5.474	5.485	5.495	5.505	5.515	5.526	5.536	5.546	620
630	5.546	5.557	5.567	5.577	5.588	5.598	5.608	5.618	5.629	5.639	5.649	630
640	5.649	5.660	5.670	5.680	5.691	5.701	5.712	5.722	5.732	5.743	5.753	640
650	5.753	5.763	5.774	5.784	5.794	5.805	5.815	5.826	5.836	5.846	5.857	650
660	5.857	5.867	5.878	5.888	5.898	5.909	5.919	5.930	5.940	5.950	5.961	660
670	5.961	5.971	5.982	5.992	6.003	6.013	6.024	6.034	6.044	6.055	6.065	670
680	6.065	6.076	6.086	6.097	6.107	6.118	6.128	6.139	6.149	6.160	6.170	680
690	6.170	6.181	6.191	6.202	6.212	6.223	6.233	6.244	6.254	6.265	6.275	690
700	6.275	6.286	6.296	6.307	6.317	6.328	6.338	6.349	6.360	6.370	6.381	700
710	6.381	6.391	6.402	6.412	6.423	6.434	6.444	6.455	6.465	6.476	6.486	710
720	6.486	6.497	6.508	6.518	6.529	6.539	6.550	6.561	6.571	6.582	6.593	720
730	6.593	6.603	6.614	6.624	6.635	6.646	6.656	6.667	6.678	6.688	6.699	730
740	6.699	6.710	6.720	6.731	6.742	6.752	6.763	6.774	6.784	6.795	6.806	740
750	6.806	6.817	6.827	6.838	6.849	6.859	6.870	6.881	6.892	6.902	6.913	750
760	6.913	6.924	6.934	6.945	6.956	6.967	6.977	6.988	6.999	7.010	7.020	760
770	7.020	7.031	7.042	7.053	7.064	7.074	7.085	7.096	7.107	7.117	7.128	770
780	7.128	7.139	7.150	7.161	7.172	7.182	7.193	7.204	7.215	7.226	7.236	780
790	7.236	7.247	7.258	7.269	7.280	7.291	7.302	7.312	7.323	7.334	7.345	790
800	7.345	7.356	7.367	7.378	7.388	7.399	7.410	7.421	7.432	7.443	7.454	800
810	7.454	7.465	7.476	7.487	7.497	7.508	7.519	7.530	7.541	7.552	7.563	810
820	7.563	7.574	7.585	7.596	7.607	7.618	7.629	7.640	7.651	7.662	7.673	820
830	7.673	7.684	7.695	7.706	7.717	7.728	7.739	7.750	7.761	7.772	7.783	830
840	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.838	7.849	7.860	7.871	7.882	7.893	840
850	7.893	7.904	7.915	7.926	7.937	7.948	7.959	7.970	7.981	7.992	8.003	850
860	8.003	8.014	8.026	8.037	8.048	8.059	8.070	8.081	8.092	8.103	8.114	860
870	8.114	8.125	8.137	8.148	8.159	8.170	8.181	8.192	8.203	8.214	8.226	870
880	8.226	8.237	8.248	8.259	8.270	8.281	8.293	8.304	8.315	8.326	8.337	880
890	8.337	8.348	8.360	8.371	8.382	8.393	8.404	8.416	8.427	8.438	8.449	890