

Cechowanie termopary

Wymagania do ćwiczenia

1. Temperatura i sposoby jej pomiaru
2. Kontaktowa różnica potencjałów
3. Siła termoelektryczna
4. Termoogniwo i termopara

Literatura

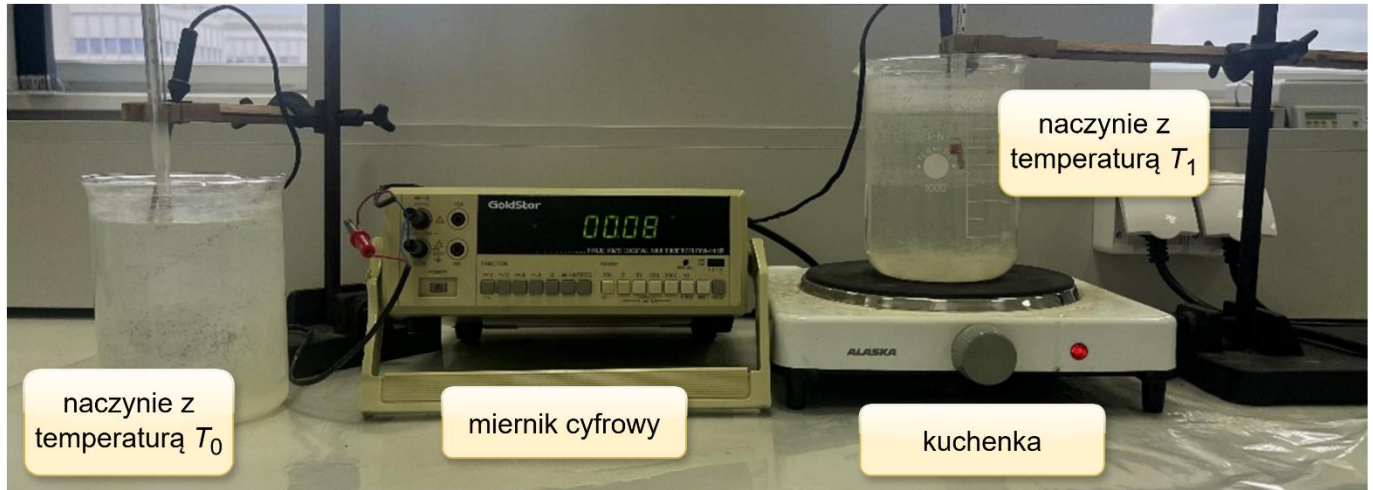
1. W. Sawieliew, Wykłady z fizyki t. 3, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994, str. 253 – 262.
2. R. Resnick, D. Halliday, Fizyka, t. I, PWN, Warszawa 1998, str. 523 – 528.
3. OpenStax, Fizyka dla szkół wyższych, Tom 2, Rozdziały: 1.1 [Temperatura i równowaga termiczna](#) i 1.2 [Termometry i skale temperatur](#).

Przykładowe pytania

1. Jak jest zbudowana termopara?
2. Do czego służy termopara?
3. Zasada działania termopary?
4. Wady i zalety termopary.
5. Podział termometrów ze względu na parametr termometryczny.
6. Omówić skale temperatur.
7. Podać treść zerowej zasady termodynamiki.
8. Co to jest praca wyjścia i od czego zależy?
9. Od czego zależy kontaktowa różnica potencjałów?

Przyrządy pomiarowe / Stanowisko pomiarowe

Termometr, termopara, miernik cyfrowy



WPROWADZENIE DO TEMATYKI ĆWICZENIA



Wstęp

Temperatura jest wielkością fizyczną określającą własności cieplne układu. W interpretacji mikroskopowej jest ona miarą średniej energii kinetycznej cząstek, $\langle E_k \rangle \propto T$. Makroskopowo – temperatura jest parametrem stanu, który stanowi kryterium równowagi cieplnej między układami. Wszystkim układom fizycznym, które mogą być jednocześnie ze sobą w stanie równowagi cieplnej przypisujemy tę samą temperaturę.

Jeśli układy A i B mogące ze sobą wymieniać ciepło są ze sobą w równowadze termicznej, i to samo jest prawdą dla układów B i C, to układy A i C również są ze sobą w równowadze – jest to treść zerowej zasady termodynamiki.

Przez równowagę termiczną rozumiemy stan, który w danych warunkach układ osiąga i już go nie zmienia. Do pomiaru temperatury służą termometry. Każdy termometr mierzy własną temperaturę. Jeśli termometr znajduje się w stanie równowagi term. to mierząc własną temperaturę mierzy jednocześnie temperaturę otoczenia. Proces pomiaru nie może zbytnio zmieniać temperatury badanego układu. Termometr powinien być tak skonstruowany (mała pojemność cieplna), aby stan równowagi term. ustalał się jak najszybciej.

Termometr – dowolny układ makroskopowy do mierzenia temperatury:

- parametr termometryczny układu zmienia się dostatecznie szybko, gdy układ traci lub pobiera energię
- jest znacznie mniejszy niż układy, które badamy przy jego pomocy, tak by jego wpływ na temperaturę układu był jak najmniejszy.

termometr	parametr termometryczny x
cieczowy – rtęć lub alkohol	wysokość słupa cieczy
gazowy o stałej objętości	ciśnienie
gazowy o stałym ciśnieniu	objętość
oporowy	oporność
termopara	siła termoelektryczna

Tabela 1

Dwa układy pozostają w równowadze po ich skontaktowaniu termicznym wtedy i tylko wtedy, gdy ich temperatury względem tego samego termometru są równe.



Skale temperatur

Założmy liniową zależność parametru termometrycznego od temperatury, $T(x) = ax$, co oznacza, że $T(x_1) = ax_1$ i $T(x_2) = ax_2$ a więc

$$\frac{T(x_1)}{T(x_2)} = \frac{x_1}{x_2}.$$

Do wyskalowania termometru przyjęto punkt potrójny wody – lód, woda i para wodna współistnieją w stanie równowagi – ciśnienie 611.2 Pa, temperatura (przyjęta arbitralnie) $0^\circ\text{C} = 273.15\text{ K}$

$$\frac{T(x)}{T(x_{tr})} = \frac{x}{x_{tr}} \rightarrow T = T(x_{tr}) \frac{x}{x_{tr}}$$

Skala Celsjusza – jednostką jest 1°C . Przyjęto dwa charakterystyczne punkty temperatury – topnienie lodu (0°C) i wrzenie wody (100°C) w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego. Temperaturę w skali Celsjusza wyznaczymy z zależności

$$t(^{\circ}\text{C}) = 100 \frac{x - x_0}{x_{100} - x_0}$$

gdzie: x – wartość parametru termometrycznego w temperaturze t , x_{100} , x_0 – wartości parametru termometrycznego odpowiednio w temperaturze 100° i 0° .

Skala Kelvina – jednostką jest 1 K. W skali Kelvina temperatura topnienia lodu wynosi 273.15 K, temperatura wrzenia wody 373.15 K. Z równania stanu gazu doskonałego

$$pV = nRT$$

wynika, że przy oziębianiu gazu do temperatury 0 K w procesie izobarycznym ($p = \text{const}$) objętość gazu doskonałego dąży do zera, a przy oziębianiu w procesie izochorycznym ($V = \text{const}$) ciśnienie dąży do zera.

(n jest liczbą kilomoli gazu pod ciśnieniem p , w temperaturze T zajmującego objętość V , R – stała gazowa).

Temperatura bezwzględna każdego układu $T > 0$ i jest miarą średniej energii kinetycznej cząsteczki w ruchu postępowym

$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} k T,$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ – jest stałą Boltzmanna.



Kontaktowa różnica potencjałów

W metalach elektrony walencyjne mogą poruszać się swobodnie po całej sieci krystalicznej w swoim nieuporządkowanym ruchu cieplnym. Najszybciej poruszające się elektrony mogą opuścić metal – wówczas zaczynają działać siły przyciągania pochodzące od jonów dodatnich oraz od metalu jako całości, który tracąc elektron zyskał ładunek dodatni tej samej wielkości. Aby elektron opuścić metal musi wykonać pracę przeciwko tym siłom – jest to praca wyjścia W . Wielkość pracy wyjścia zależy od rodzaju metalu.

metal	Cs	Ba	Zr	Th	Ta	Zn	Mo	Cu	W	Ni	Pt
W [eV]	1,81	2,11	4,12	3,38	4,12	3,74	4,15	4,47	4,50	5,03	6,27

Tabela 2

Pracę wyjścia wyraża się zwykle w elektronowoltach. Jest to praca wykonana przy przeniesieniu elektronu pomiędzy punktami o różnicy potencjałów 1V, przy czym

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}.$$

Niedobór elektronów w metalu i ich nadmiar w otaczającej przestrzeni ujawnia się w warstwach powierzchniowych po obu stronach przewodnika, o grubości rzędu kilku warstw atomowych. W przybliżeniu można przyjąć, że powierzchnia metalu tworzy podwójną warstwę elektryczną, podobną do bardzo cienkiego kondensatora, przy czym różnica potencjałów

$$\Delta\varphi = \frac{W}{e}.$$

Tę różnicę potencjałów nazywamy *kontaktową różnicą potencjałów* między metalem a otoczeniem.

Zjawisko powstawania kontaktowej różnicy potencjałów między stykającymi się metalami zostało odkryte przez A. Voltę (XVIII w). Doświadczalnie ustalił on dwa prawa:

1. Przy łączeniu dwóch przewodników wykonanych z różnych metali powstaje między nimi kontaktowa różnica potencjałów, zależna jedynie od ich składu chemicznego i temperatury.
2. Różnica potencjałów między końcami obwodu składającego się z połączonych szeregowo metali pozostających w jednakowej temperaturze nie zależy od składu chemicznego elementów pośrednich. Różnica ta równa jest kontaktowej różnicy potencjałów powstającej przy bezpośrednim połączeniu przewodników skrajnych.

Rozważmy układ dwóch metali o różnych pracach wyjścia W_1 i W_2 . Jeśli $W_1 > W_2$ to elektronom trudniej

1 W_1	2 W_2
------------	------------

wyrwać się z metalu pierwszego niż z drugiego. Ponieważ elektrony będą przechodzić w obydwu kierunkach, to w metalu pierwszym będzie ich nadmiar, w drugim –

niedobór. I tak pomiędzy metalami powstanie kontaktowa różnica potencjałów, której przyczyną jest różna praca wyjścia metali (minus we wzorze wynika z ujemnego ładunku elektronu):

$$\Delta\varphi' = \varphi'_1 - \varphi'_2 = -\frac{W_1 - W_2}{e}.$$

Na kontaktową różnicę potencjałów ma również wpływ różna koncentracja elektronów swobodnych w obydwu metalach. Gaz elektronowy w metalu potraktujemy analogicznie jak gaz idealny, a więc ciśnienie p wywołane przez gaz

$$p = n_0 kT,$$

gdzie n_0 – koncentracja cząsteczek, k – stała Boltzmanna. Jeśli koncentracja elektronów jest różna, $n_{01} \neq n_{02}$ to nawet przy jednakowych temperaturach obydwu metali ciśnienia gazu elektronowego będą w nich różne. Niech $p_1 > p_2$, wówczas pod wpływem różnicy ciśnień $p_1 - p_2$ elektrony będą przechodzić do drugiego metalu w większej ilości niż w kierunku przeciwnym. Można wykazać, że kontaktowa różnica potencjałów spowodowana różnicą koncentracji elektronów

$$\Delta\varphi'' = \varphi''_1 - \varphi''_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}.$$

Całkowita kontaktowa różnica potencjałów

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi' + \Delta\varphi'' = -\frac{W_1 - W_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \quad (1)$$

jest to matematyczny zapis I prawa Volty – kontaktowa różnica potencjałów zależy jedynie od struktury fizykochemicznej metali i ich temperatury.

Rozważmy obwód złożony z połączonych szeregowo metali znajdujących się w takiej samej temperaturze.



Suma algebraiczna spadków potencjałów na wszystkich stykach

$$(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_4) = \varphi_1 - \varphi_4$$

jak widać jest równa różnicy potencjałów pomiędzy końcami obwodu. Po wstawieniu I prawa Volty:

$$\varphi_1 - \varphi_4 = \left[-\frac{W_1 - W_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \right] + \left[-\frac{W_2 - W_3}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{03}} \right] + \left[-\frac{W_3 - W_4}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{03}}{n_{04}} \right]$$

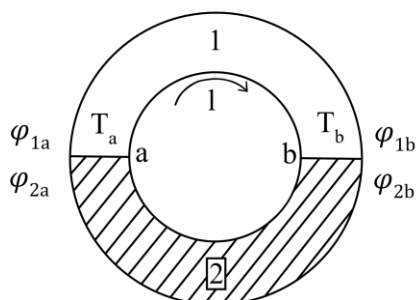
Co daje:

$$\varphi_1 - \varphi_4 = -\frac{W_1 - W_4}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{04}} \quad (2)$$

Jest to matematyczny zapis II prawa Volty – różnica potencjałów nie zależy od rodzaju metali pośrednich.



Zjawisko termoelektryczne



Rozważmy obwód zamknięty złożony z dwóch metali. W zamkniętym obwodzie pojawia się siła elektromotoryczna równa sumie algebraicznej wszystkich spadków napięć:

$$\varepsilon = (\varphi_{1a} - \varphi_{2a}) + (\varphi_{2b} - \varphi_{1b}).$$

Jeśli temperatury obu spoin są równe $T_a = T_b = T$, to siła elektromotoryczna:

$$\varepsilon = \frac{-W_1 - W_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} - \frac{W_2 - W_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{01}} = 0$$

W obwodzie zamkniętym złożonym z kilku metali nie jest możliwym powstanie siły elektromotorycznej wyłącznie kosztem kontaktowych różnic potencjałów.

Jeśli temperatury spoin są różne, i np. $T_a > T_b$, wówczas

$$\varepsilon = \frac{-W_1 - W_2}{e} + \frac{kT_a}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} - \frac{W_2 - W_1}{e} + \frac{kT_b}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{01}} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} (T_a - T_b)$$

w obwodzie pojawia się siła termoelektryczna, wprost proporcjonalna do różnicy temperatury obu spoin. Współczynnik proporcjonalności zwany czułością termopary

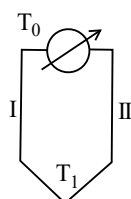
$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \quad (3)$$

charakteryzuje własności styku dwóch danych metali. Wtedy możemy zapisać siłę termoelektryczną jako

$$\varepsilon = \alpha(T_a - T_b). \quad (4)$$

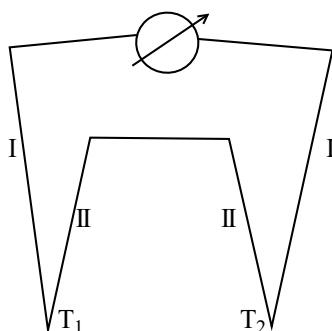


Termopara i ogniwo termoelektryczne



Ogniwo termoelektryczne otrzymamy jeśli połączymy dwa różne metale lub stopy i ich złącza umieścimy w różnej temperaturze T_1 i T_0 . Oba przewody woltomierza będą w tej samej temperaturze i będzie on mierzył różnicę napięć powstającą w metalach I i II. Siła termoelektryczna powstająca w termoogniwie jest rzędu kilku mV przy różnicy temperatur 100 K – dlatego rzadko służą one jako źródła prądu.

Termopara jest to para drutów wykonanych z różnych metali lub stopów, odznaczających się określoną wartością współczynnika α . Końce drutów są ze sobą spojone – jedna spoina umieszczona jest w ośrodku,



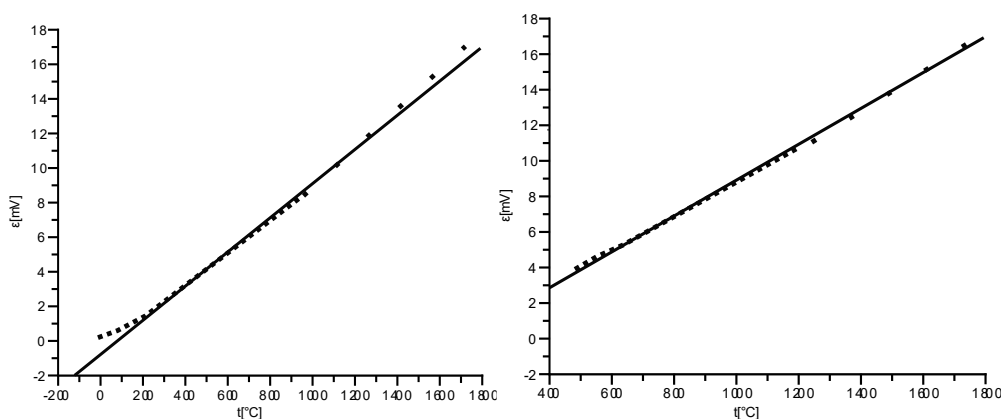
którego temperaturę mierzymy, druga – w znanej stałej temperaturze, zwanej temperaturą odniesienia. Przy użyciu takiego termoelementu można mierzyć temperaturę oraz kontrolować jej zmiany w czasie. Mogą być stosowane w urządzeniach kontrolno-sterujących w procesach technologicznych po wzmocnieniu sygnału z termopary. Do budowy termopar można używać bardzo cienkich drutów, nawet o średnicy rzędu mikrometrów. Mała bezwładność takich termopar pozwala na szybki odczyt temperatury.

Termopary nadają się do pomiaru temperatury w szerokim zakresie. Charakterystyka termopary w zakresie temperatury pracy powinna być liniowa, a współczynnik proporcjonalności na tyle duży by niepewności pomiarowe były jak najmniejsze. W zależności od temperatury pracy termopary łączy się ze sobą różne metale. Czułość termopar jest duża, dzięki czemu można mierzyć bardzo małe różnice temperatur, do 10^{-6} stopnia.

termopara	Temperaturowy przedział pracy [K]	maksymalna siła termoelektryczna [mV]
Cu – konstantan (typ T)	2 – 700	21
Cu – Au+2.11%Co	2 – 300	10
Cu – Ag+0.37%Au	25 – 300	0,2
Fe – konstantan (typ J i L)	70 – 1300	66
chromel – alumel (typ K)	220 – 1600	57
Pt – Pt+10%Rh (typ S)	250 – 2100	17
nikiel – nichrom (typ N)	250 – 1500	49
Pt – Pt+30%Rh (typ B)	570 – 2100	14
wolfram–molibden (typ C, D)	1300 – 2800	8

Tabela 3

W celu zwiększenia czułości termoelementów łączy się je szeregowo w tzw. stosy termoelektryczne. Gdy nie jest wymagana duża dokładność pomiarów, można stosować termoogniwa, wówczas temperatura T_0 jest temperaturą otoczenia.

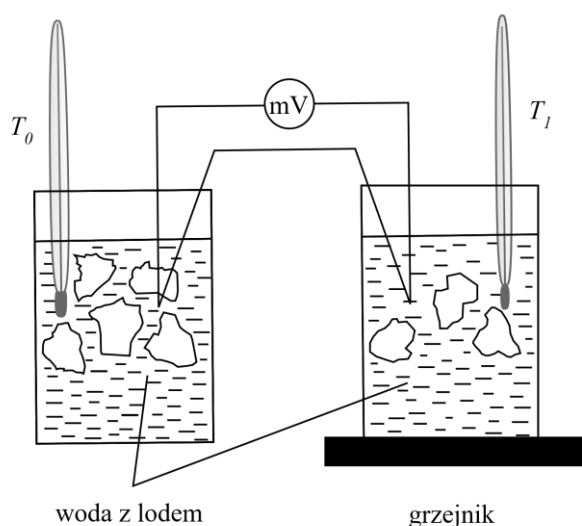


Powyżej przedstawiono zależność siły elektromotorycznej od temperatury dla termopary Pt – Pt+10% Rh. Widać wyraźne odstępstwa od liniowości dla niskich temperatur, natomiast w zakresie roboczym tej termopary (250 – 2100) K zależność ta jest liniowa.



Metodologia wykonania pomiarów

Zestawić układ do wyznaczania charakterystyki termopary.



1. Złącza termopary umieścić w mieszaninie lodu z wodą. Temperatury T_0 i T_1 winny być takie same i wynosić 273 K (0°C).
2. Włączyć miliwoltomierz i sprawdzić czy wskazania miernika są zerowe, jeśli wskazanie jest różne od zera odczekać chwilę na ustabilizowanie obu systemów. W razie konieczności poprosić prowadzącego o wyzerowanie miernika.
3. Podgrzewać kąpiel otaczającą złącze znajdujące się w temperaturze T_1 . Notować wskazania miliwoltomierza w temperaturze $T = T_0 + \Delta T, T_0 + 2\Delta T, \dots, T_0 + n\Delta T$, przyjmując $\Delta T = 5\text{K}$, jeśli prowadzący nie zleci inaczej. Zmierzone wyniki notować w tabeli pomiarowej.

Uwaga: Należy pamiętać, by temperatura T_0 nie zmieniała się w czasie – mieszaninę wody z lodem należy mieszać co kilka minut. Szybkość przyrostu temperatury T_1 nie powinna być większa od 2 K/min, ogranicza to niepewności pomiarowe wynikające z bezwładności układu.



Rys. 1. Zdjęcie układu pomiarowego.



Tabela pomiarowa

Kolorem szarym oznaczono te kolumny, które będą zawierały obliczone wartości.

T_0 [°C]	T_1 [°C]	$T_1 - T_0$ [°C]	ε [mV]	$\alpha \pm \Delta\alpha$ [mV/°C]



Obliczenia

1. Obliczyć niepewności pomiarowe $u(T)$ i $u(\varepsilon)$ metodą typu B.
2. Narysować zależność $\varepsilon = f(T_1 - T_0)$. Na wykresie zaznaczyć niepewności pomiarowe $u(T)$ i $u(\varepsilon)$.
3. Metodą najmniejszych kwadratów dopasować do uzyskanych wyników prostą $y = ax + b$.
4. Wyznaczyć parametry a, b prostej. Na podstawie nachylenia prostej wyznaczyć wartość współczynnika α dla badanej termopary.
5. Wyznaczyć odchylenia standardowe $u(a)$, $u(b)$ parametrów prostej oraz współczynnik korelacji r .
6. Wyznaczyć niepewność bezwzględną $u(\alpha)$ oraz względną $\frac{u(\alpha)}{\alpha}$.
7. Na podstawie wartości współczynnika termoelektrycznego (czułości) określić rodzaj termopary. W tym celu uzupełnić Tabelę 3 o kolumnę czułości termopar. Czułość α dla każdej termopary obliczyć ze wzoru (4) wstawiając górną i dolną temperaturę z podanego zakresu temperatur.
8. Porównania czułości α badanej termopary z odpowiednią czułością z tabeli dokonać za pomocą metody porównywania wyników podanej w skrypcie Niepewności pomiarów.
9. Obliczyć stosunek koncentracji elektronów w obu stopach metali stanowiących obie części termopary (wzór 3).
10. We wnioskach na początku zapisać poprawnie zaokrąglony wynik pomiarów. Można także zinterpretować otrzymaną wartość współczynnika b prostej.