

Zagadnienia pokrewne

Promieniowanie ciała doskonale czarnego, termoelektryczna siła elektromotoryczna, zależność oporu od temperatury.

Podstawy teoretyczne i cel ćwiczenia

Zgodnie z prawem Stefana – Boltzmannna energia wysyłana przez ciało czarne przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej ciała. Prawo Stefana – Boltzmannna obowiązuje także dla tzw. ciała „szarego”, którego powierzchnia charakteryzuje się mniejszym od jedności, zależnym od długości fali współczynnikiem absorpcji.

W naszym doświadczeniu ciałem „szarym” jest włókno żarówki, dla której badamy zależność wysyłanej energii od temperatury.

Wyposażenie

Termopara Mollego	08479.00	1
Rurka ochronna	08479.01	1
Uniwersalny wzmacniacz pomiarowy	13626.93	1
Zasilacz regulowany 15 VAC/120VDC/5A	13530.93	1
Oprawka żarówki E14, z prętem	06175.00	1
Żarówka 6V/5A, E14	06158.00	1
Kostka łącząca	06030.23	1
Opornik wtykowy 100 Ω	06057.10	1
Ława optyczna l = 60 cm	08283.00	1
Podstawa pod ławę optyczną, regulowana	08284.00	2
Konik do ławy optycznej, h 30 mm	08286.01	2
Multimetr cyfrowy	07134.00	3
Przewód łączący, 500 mm, niebieski	07361.04	4
Przewód łączący, 500 mm, czerwony	07361.01	4

Zagadnienia

1. Dokonywany jest pomiar oporności włókna żarówki w temperaturze pokojowej oraz wyznaczana jest oporność włókna R_0 w temperaturze zera stopni Celsjusza.
2. Dokonywany jest pomiar gęstości strumienia energii żarówki dla różnych wartości napięcia żarzenia. Dla każdej wartości napięcia odczytywana jest wartość prądu żarzenia i obliczana odpowiadająca im wartość oporności włókna. Przy założeniu, że oporność włókna żarówki zależy od temperatury w drugiej potęgde, można obliczyć temperaturę włókna na podstawie zmierzonej wartości jego oporności.

Ustawienie i przebieg doświadczenia

Doświadczenie rozpoczynamy od zestawienia układu pomiarowego wg schematu przedstawionego na Rys.2, w celu pomiaru oporności włókna w temperaturze pokojowej. Opornik o wartości 100Ω podłączony jest szeregowo z żarówką, co umożliwia dokładną regulację natężenia prądu. Dla wartości natężenia prądu 100 mA DC i 200 mA DC dokonujemy pomiaru spadku napięcia na włóknie i obliczamy oporność włókna w temperaturze pokojowej. Natężenia prądu są tu na tyle małe, że można pominąć efekt nagrzewania się włókna.

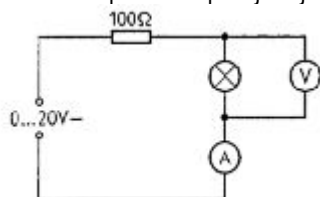
Następnie zestawiamy układ pomiarowy przedstawiony na fotografii 1. W obwodzie nie ma już opornika 100Ω . Włókno żarówki podłączone jest teraz do regulowanego źródła napięcia zmiennego poprzez amperomierz pozwalający mierzyć wartość natężenia prądu zmiennego do wartości 6 A. Voltomierz podłączony jest równolegle do włókna i napięcie zmienne zwiększane jest ze skokiem 1 V do wartości 8V AC.

Fot. 1. Układ do doświadczalnego sprawdzenia prawa promieniowania Stefana – Boltzmannna.





Rys.2. Schemat układu do pomiaru oporności włókna żarówki w temperaturze pokojowej.



Uwaga : Wartość dopuszczalna napięcia zasilania żarówki wynosi 6 V AC. Napięcie zmienne do 8 V może być stosowane przez czas nie dłuższy niż kilka minut.

Na początku przykładamy do żarówki napięcie zmienne 1 V i termoparą Mollego umieszczoną w odległości 30 cm od włókna (konik na ławie umocowany jest nieruchomo) poruszamy w prawo i w lewo w celu ustawienia jej w położeniu, w którym wartość termoelektrycznej siły elektromotorycznej jest największa. Oś walcowego włókna żarówki powinna być prostopadła do osi optycznej ławy. Ponieważ wartość termoelektrycznej SEM jest rzędu kilku miliwoltów, to w celu dokładnego odczytu musimy użyć wzmacniacza. Gdy używamy woltomierza o zakresie 10 V, trzeba wybrać współczynnik wzmacnienia 10^2 lub 10^3 . Przed odczytaniem SEM należy przeprowadzić odpowiednie wyzerowanie. Dokonuje się tego przez usunięcie na kilka minut żarówki wraz z konikiem z ławy optycznej. Wzmacniacz ustawiamy w trybie pracy LOW DRIFT ($10^4 \Omega$), ze stałą czasu 1 s.

Po ponownym ustawieniu żarówki na ławie odczyty wskazań mogą być dokonywane dopiero po osiągnięciu przez termoparę warunku równowagi. Trwa to ok. 1 minuty. Należy upewnić się, czy pomiaru nie zakłóca jakieś promieniowanie tła.

Teoria i obliczenia

Jeśli gęstość strumienia energii L ciała czarnego, np. energii wysyłanej przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu w temperaturze T , przy długości fali λ , w przedziale $d\lambda$, oznaczymy przez $dL(T, \lambda)/d\lambda$ to wzór Plancka przyjmie postać:

$$\frac{dL(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2c^2 h \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

(uwaga: „-1” za exponentem, nie w jego wykładniku !)

gdzie:

c = prędkość światła (3.00*10⁸[m/s])
 h = stała Plancka (6.62*10⁻³⁴[J*s])
 k = stała Boltzmann (1.381*10⁻²³[J*K⁻¹])

Całkowanie równania (1) w całym przedziale długości fal od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$ daje gęstość strumienia energii $L(T)$ (prawo Stefana - Boltzmann).

$$L(T) = \frac{2\pi^5}{15} \cdot \frac{k^4}{c^2 h^3} \cdot T^4 \quad (2)$$

Odpowiednio $L(T) = \sigma T^4$
 gdzie $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ [W m⁻² K⁻⁴]

Proporcjonalność $L \sim T^4$ jest słuszna także dla tzw. ciała „szarego”, którego powierzchnia charakteryzuje się niezależnym od długości fali, mniejszym od jedności współczynnikiem absorpcji.

W celu sprawdzenia prawdziwości prawa Stefana - Boltzmann mierzymy promieniowanie wysyłane przez włókno żarówki, które zupełnie dobrze spełnia rolę ciała „szarego”. Przy ustalonej odległości między włóknem a termoparą, strumień energii ϕ docierający do termopary jest proporcjonalny do $L(T)$.

$$\phi \sim L(T)$$

Ze względu na proporcjonalność między ϕ a termoelektryczną SEM, U_{term} termopary, możemy napisać $U_{\text{term}} \sim T^4$

jeśli termopara znajduje się w temperaturze zera stopni Kelvina. Ponieważ termopara znajduje się w temperaturze pokojowej T_p i także promieniuje zgodnie z prawem T^4 , więc musimy napisać $U_{\text{term}} \sim (T^4 - T_p^4)$

W naszych warunkach możemy zaniedbać T_p^4 w porównaniu z T^4 i w podwójnie logarytmicznym układzie współrzędnych powinniśmy otrzymać wykres zależności $U_{\text{term}} = f(T)$ w postaci prostej o nachyleniu „4”

$$\lg U_{\text{term}} = 4 \lg T + \text{const} \quad (3)$$

Temperaturę bezwzględną $T = t + 273$ włókna żarówki można obliczyć na podstawie zmierzonych wartości oporności $R(t)$ włókna wolframowego (t = temperatura w stopniach Celsjusza). W przypadku oporności włókna wolframowego mamy następującą zależność:

$$R(t) = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (4)$$

gdzie R_0 jest opornością w 0 °C

$$\alpha = 4.82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\beta = 6.76 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

Oporność R_0 w temperaturze 0 °C można wyznaczyć korzystając z zależności:

$$R_0 = \frac{R(t_R)}{1 + \alpha \cdot t_R + \beta \cdot t_R^2} \quad (5)$$

Rozwiązując $R(t)$ względem t , przy uwzględnieniu zależności $T = t + 273$, otrzymujemy:

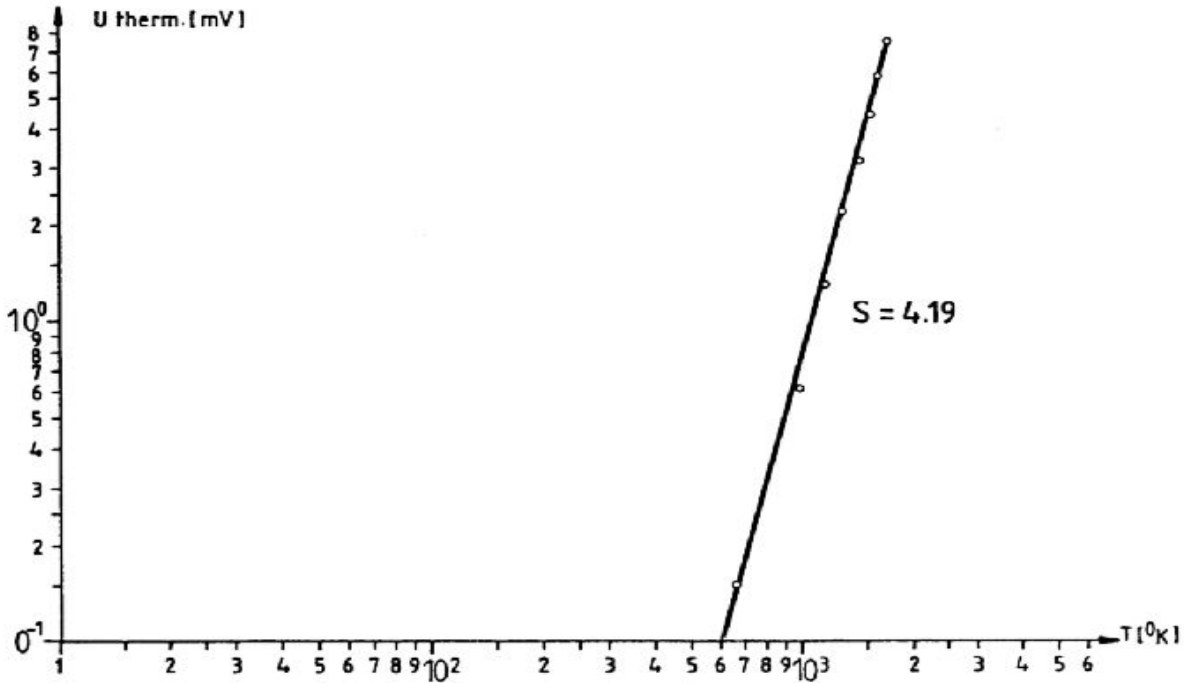
$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left(\frac{R(t)}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right] \quad (6)$$

$R(t_p)$ i $R(t)$ znajdujemy stosując prawo Ohma, np. mierząc wartość napięcia na włóknie oraz natężenia płynącego w nim prądu.



Prawo promieniowania Stefana - Boltzmann

Rys.3. Termoelektryczna SEM termopary w funkcji temperatury bezwzględnej włókna żarówki.



1. Włókno żarówki zasilane jest z wyjścia stałoprądowego zasilacza prądem stałym o natężeniu 100 mA lub 200 mA, poprzez opornik 100 Ω . Spadki napięcia wynoszą odpowiednio 16.5 mV i 33.0 mV. Dwukrotne zwiększenie wartości natężenia prądu powoduje dwukrotne zwiększenie wartości spadku napięcia. Z tego wynika, że wpływ temperatury na wartość oporności jest pomijalnie mały dla wybranych wartości natężenia prądu stałego. Wobec tego otrzymujemy

$$R(t_p) = 0,165 [\Omega] \quad (7)$$

i stąd:

$$R_0 = 0,15 [\Omega] \quad (8)$$

Małe zmiany R_0 wpływają jedynie, w niewielkim stopniu, na szukaną wartość nachylenia S .

2. Zwiększanie wartości zmiennego napięcia żarzenia ze skokiem 1 V AC od 0 do 8 woltów daje następujące wyniki:

U[V]	I[A]	U_{therm} [mV]	T[K]
1	2.20	0.15	672
2	2.80	0.62	983
3	3.45	1.30	1160
4	4.00	2.20	1300
5	4.45	3.20	1430
6	4.90	4.45	1540
7	5.30	5.90	1630
8	5.70	7.50	1720

Wykres zależności strumienia energii od temperatury bezwzględnej w skali podwójnie logarytmicznej przedstawiony jest na Rys.3. Otrzymana metodą regresji wartość S nachylenia prostej wynosi:

$$S = 4,19 \pm 0,265 \quad (9)$$

Rzeczywista wartość S wynosząca 4 mieści się w granicy błędu.