Nazwisko .... Data .... Wydział ....
Imię .... Dzień tyg. ....
Godzina ....

Ćwiczenie 375

Badanie zależności mocy promieniowania cieplnego od temperatury

R_0 =

	U [V]	I [mA]	R [Ω]	R/R_0	T [K]	P [W]	ln(T)	ln(P)
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
7.								
8.								
9.								
10.								
11.								
12.								

nachylenie prostej $\ln(P) = a \cdot \ln(T) + b$	a =

Wprowadzenie

Wszystkie ciała emitują **promieniowanie cieplne (termiczne)** składające się z fal elektromagnetycznych o różnych długościach. Powstaje ono w wyniku ruchów cieplnych naładowanych cząsteczek znajdujących się w materii, gdy część energii kinetycznej tych cząsteczek zostaje zamieniona w energię wyemitowanych fal. **Widmo promieniowania**, czyli jakiej długości fale są wysyłane i w jakiej ilości, zależy od temperatury ciała. Promieniowanie podczerwone (o długości 750 nm – 1 mm) dominuje w widmie ciał o umiarkowanej temperaturze (np. temperaturze pokojowej). Promieniowanie podczerwone czasami nazywane jest też promieniowaniem cieplnym, jednakże pamiętajmy, że promieniowanie cieplne może być we wszystkich długościach fal elektromagnetycznych, nie tylko w zakresie podczerwieni. Ze wzrostem temperatury rośnie udział fal o coraz krótszych długościach, co powoduje, że ciała zaczynają świecić (światło widzialne ma zakres 390 – 750 nm). Dlatego np. metale można rozgrzać „do białości", czyli do tak wysokiej temperatury, że pojawia się duża ilość fal świetlnych o różnych barwach, które zmieszane razem dają wrażenie białego światła.

Całkowita moc promieniowania cieplnego, którą definiujemy jako ilość energii wyemitowanej w postaci fal elektromagnetycznych przez ciało w ciągu 1 sekundy, również zależy od temperatury ciała. Zależność mocy od temperatury została wyprowadzona dla tzw. ciała doskonale czarnego i nazywa się **prawem Stefana-Boltzmanna:**

$$P = \sigma \cdot T^4 \tag{1}$$

$$\left[\frac{W}{m^2} = \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot K^4\right]$$

Zgodnie z tym prawem całkowita moc promieniowania *P* (przypadająca na metr kwadratowy powierzchni ciała) w całym zakresie długości fali jest wprost proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury *T* ciała, które to promieniowanie emituje. Temperatura jest tutaj wyrażona w kelwinach (T[K]=t[°C]+273). Symbol σ oznacza stałą Stefana-Boltzmanna, która dla ciała doskonale czarnego wynosi $\sigma = 5{,}6704 \cdot 10^{-8} \, \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

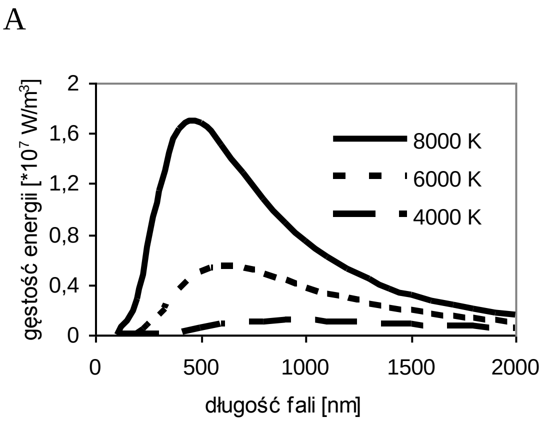
Ciało doskonale czarne w rzeczywistości nie istnieje. Jest to modelowe ciało, które całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne w całym zakresie długości fal, czyli nie odbija żadnego promieniowania. Ciało doskonale czarne również emituje promieniowanie w całym zakresie fal elektromagnetycznych, i jest to promieniowanie zależne tylko od temperatury ciała zgodnie z prawem Stefana-Bolzmanna (Rys. 1). Ciała rzeczywiste, czyli ciała które nie są doskonale czarne, niektóre długości fal pochłaniają, a niektóre odbijają. Kolor przedmiotów świadczy o tym, że odbijane jest światło o pewnej długości fali lub mieszanina fal, która daje w efekcie dany kolor. Dla ciał niedoskonale czarnych σ (stała Stefana-Bolzmanna) nie jest stała, ponieważ zależy od długości emitowanych fal.

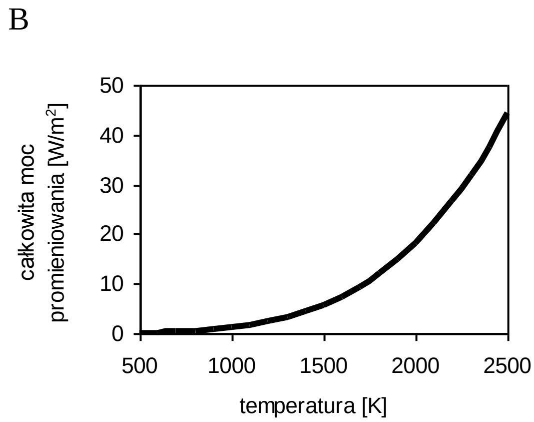
Dla wysokich temperatur większość ciał promieniuje tak, że można je traktować jak ciała doskonale czarne.

Wykres zależności mocy promieniowania od temperatury (Rys.1B) można przedstawić w postaci funkcji liniowej y=ax+b, jeśli zlogarytmujemy naturalnie równanie (1). Wówczas:

$$\ln(P) = 4\ln(T) + \ln(\sigma) \tag{2}$$

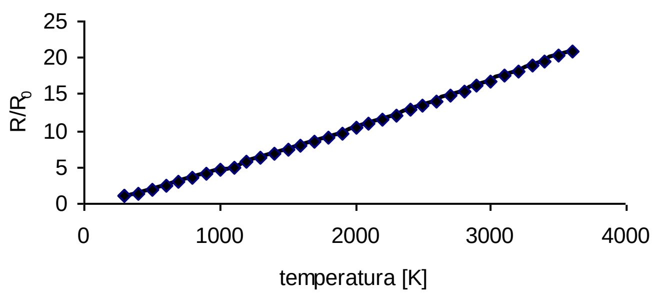
gdzie y = ln(P), x = ln(T). Wykładnik potęgi 4 staje się po zlogarytmowaniu współczynnikiem nachylenia funkcji liniowej *a*.





Rys.1 **A.** Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego dla trzech różnych temperatur wyrażonych w kelwinach. Gęstość energii opisuje tu ilość promieniowania o danej długości fali emitowanego przez ciało. **B.** Prawo Stefana-Bolzmanna. Wykres B można uzyskać z wykresu A, gdyż moc promieniowania dla poszczególnych wartości temperatury (B) jest równa polu pod wykresem gęstości energii w funkcji długości fali dla danej temperatury (A).

W ćwiczeniu ciałem, dla którego będziemy badać zależność mocy promieniowania od temperatury jest żarówka, a dokładniej wolframowy drut wewnątrz żarówki. Przepływ prądu przez wolfram powoduje znaczny wzrost jego temperatury. Świecenie, które wykorzystujemy w żarówkach, jest właśnie efektem rozgrzania się drutu wolframowego. Aby zmieniać temperaturę żarówki wykorzystamy zależność pomiędzy natężeniem prądu a ilością wydzielanego przez przewodnik ciepła, gdyż zgodnie z prawem Joule'a $P = R \cdot I^2$ - moc cieplna P proporcjonalna jest do kwadratu natężenia prądu I. Natężenie prądu można regulować ustawiając różne napięcia w zasilaczu. Natomiast aby mierzyć temperaturę żarówki, wykorzystamy to, że wolfram, jak każdy metal, ma opór elektryczny zależny od temperatury: im wyższa temperatura, tym większy opór. Zależność oporu od temperatury dla większości metali przy niedużych temperaturach (w zakresie 0 – 100°C) jest z dużą dokładnością liniowa, ale dla wysokich temperatur staje się krzywoliniowa i można ją w przybliżeniu opisać wielomianem drugiego stopnia: $R = R_0(1 + \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (T - T_0)^2)$, gdzie R to opór w temperaturze T, R_0 to opór w temperaturze T_0 (jako T_0 przyjmujemy temperaturę pokojową), α i β to temperaturowe współczynniki oporu. Dla wolframu zależność oporu od temperatury została wyznaczona doświadczalnie (Rys.2) i na tej podstawie określono równanie na temperaturę T w funkcji R/R_0 :



$$T = 121K + 198K\frac{R}{R_0} - 1{,}6K\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \qquad (3)$$

Rys.2 Zależność R/R_0 od temperatury T dla wolframu. R – opór w temperaturze T, R_0 – opór w temperaturze T_0=293 K.

Opór R obliczamy na podstawie prawa Ohma, które mówi że natężenie prądu I jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia U:

$$U = I \cdot R \qquad (4)$$
$$[V = A \cdot \Omega]$$

Czyli:
$$R = \frac{U}{I}$$
$$[\Omega = V / A]$$

Zgodnie z prawem Ohma opór jest stały i nie zależy od natężenia prądu.

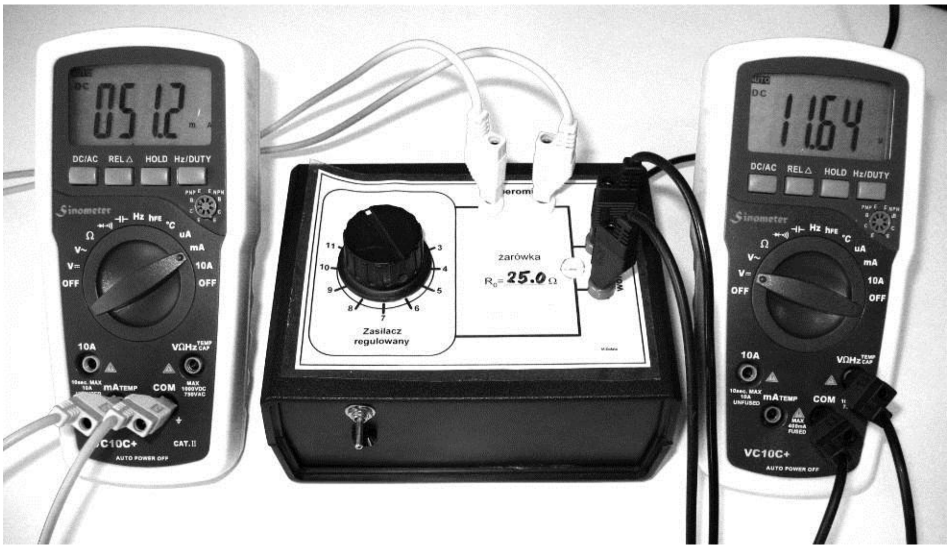
Moc promieniowania cieplnego można wyznaczyć zakładając, że cała energia przepływającego przez żarówkę prądu zamieniana jest na ciepło i jest wypromieniowywana do otoczenia w postaci fal elektromagnetycznych. Wówczas moc promieniowania będzie równa mocy prądu, którą możemy obliczyć ze wzoru:

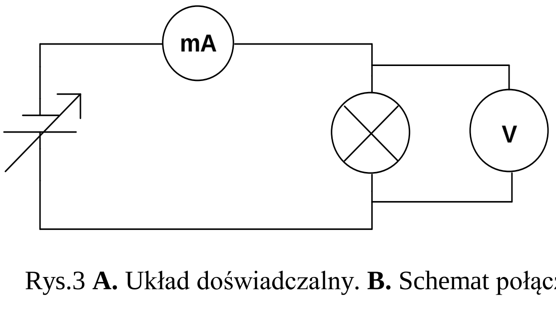
$$P = U \cdot I \qquad (5)$$
$$[W = V \cdot A]$$

gdzie P to moc prądu, U napięcie przyłożone do żarówki i I natężenie prądu płynącego przez żarówkę.

Wykonanie ćwiczenia

1. Obwód elektryczny znajdujący się wewnątrz pudełka składa się z regulowanego zasilacza oraz żarówki. Do obwodu podłączamy mierniki elektryczne: szeregowo z żarówką amperomierz (mA), równolegle z żarówką woltomierz (V) (Rys.3). W amperomierzu jeden kabel podłączamy do gniazda COM, drugi do gniazda mATEMP. Obrotowy przełącznik ustawiamy na mA. Przyciskiem DC/AC wybieramy DC, czyli prąd stały. W woltomierzu jeden kabel podłączamy do gniazda COM, drugi do gniazda VΩHz. Obrotowy przełącznik ustawiamy na V prąd stały.

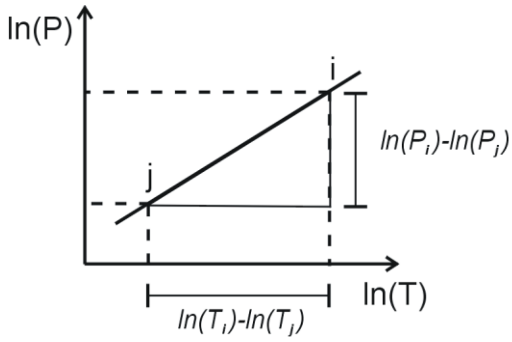
A.


B.


Rys.3 **A.** Układ doświadczalny. **B.** Schemat połączeń.

2. W tabeli pomiarowej zapisujemy opór żarówki w temperaturze pokojowej R_0 (wartość jest podana na pudełku).
3. Włączamy zasilacz i zapisujemy wskazania woltomierza i amperomierza dla dwunastu ustawień pokrętła zasilacza. Po każdej zmianie zasilania odczekujemy około 20 sekund na ustabilizowanie się temperatury żarówki.
4. Dla każdego z dwunastu pomiarów obliczamy:
   - ze wzoru (4) opór R, następnie stosunek $\frac{R}{R_0}$,
   - ze wzoru (3) temperaturę T włókna żarówki,
   - ze wzoru (5) moc P pobraną przez żarówkę,
   - ln (logarytm naturalny) z wartości T i P (potrzebny kalkulator naukowy).
5. Na kartce formatu A4 rysujemy wykres zależności ln(P) od ln(T). Wykres powinien przedstawiać funkcję liniową, którą opisuje równanie $y=ax+b$ (wzór (2)).
6. Zaznaczamy dwa dowolne punkty „i” i „j” położone na prostej (Rys.4) (punkty wybieramy możliwie blisko początku i końca prostej). Odczytujemy współrzędne ln(P) i ln(T) tych punktów. Ze wzoru:

$$a = \frac{\ln(P_i) - \ln(P_j)}{\ln(T_i) - \ln(T_j)}$$



Rys.4 Wyznaczenie współczynnika nachylenia funkcji liniowej.

   obliczamy współczynnik nachylenia prostej a z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

9. Obliczamy różnicę procentową pomiędzy teoretyczną (równą dokładnie 4) a doświadczalną wartością nachylenia prostej.
10. Obliczamy błąd względny wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej a ze wzoru:

$$\frac{\Delta a}{a} = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta T}{T} \right)$$

gdzie $\frac{\Delta U}{U}$ to błąd względny pomiaru napięcia (dokładność woltomierza 1%), $\frac{\Delta I}{I}$ to błąd względny pomiaru natężenia prądu (dokładność amperomierza 1 %), $\frac{\Delta T}{T}$ to błąd względny wyznaczenia temperatury żarówki (4%)(na dokładność tej wielkości składają się: dokładność pomiaru oporu żarówki i dokładność wzoru (3) z którego obliczamy temperaturę włókna żarówki.

Pytania do dyskusji

1. Czy dla żarówki spełnione jest prawo Stefana-Bolzmanna? Uzasadnij odpowiedź (porównaj różnicę procentową współczynnika nachylenia między wartością teoretyczną a doświadczalną – wartość obliczona w punkcie 9 – z błędem względnym wyznaczenia współczynnika nachylenia – wartość obliczona w punkcie 10).

2. Czy dla żarówki spełnione jest prawo Ohma? Uzasadnij odpowiedź.
3. Jakie, inne niż promieniowanie, mechanizmy odprowadzania energii z żarówki pominięto w ćwiczeniu? Jak mogą one wpłynąć na wynik ćwiczenia?