



**ĆWICZENIE
30**

POMIAR TEMPERATURY PIROMETREM

Cel ćwiczenia: Zapoznanie studentów z jedną z metod pomiaru temperatury w zakresie od 800°C do 2500°C.

Zagadnienia: Promieniowanie termiczne, wielkości i jednostki radiometryczne, prawa promieniowania ciała doskonale czarnego.

1 Wprowadzenie

Niektóre wielkości radiometryczne

Emitancja energetyczna

Emitancja energetyczna $M(T)$ jest to iloraz mocy (czyli strumienia energii) wypromieniowanej w zakresie całego widma $\Delta\phi$ (nazywana również zdolnością emisyjną) z powierzchni ΔS rozciągniętego źródła tego promieniowania przez wielkość tej powierzchni. W granicy, jest to pochodna mocy wypromieniowanej $d\phi$ względem powierzchni dS . Emitancja energetyczna jest funkcją temperatury T .

$$M(T) = \frac{d\phi}{dS} \quad \text{Wm}^{-2}. \quad (1)$$

Gęstość monochromatyczna (widmowa) emitancji energetycznej

Gęstość widmowa $M(\lambda, T)$ emitancji energetycznej (nazywana również widmową zdolnością emisyjną) jest to iloraz emitancji ΔM przez mały przedział $\Delta\lambda$ długości fal tego emitowanego promieniowania. W granicy, jest to pochodna emitancji dM względem długości fali $d\lambda$.

$$M(\lambda, T) = \frac{dM}{d\lambda} \quad \text{Wm}^{-3}. \quad (2)$$

Natężenie napromieniowania

Natężenie napromieniowania E jest to stosunek mocy (czyli strumienia energii) $\Delta\phi$ promieniowania pochłoniętego przez element powierzchni ΔS do wielkości tej powierzchni. W granicy, jest to pochodna $d\phi$ mocy promieniowania padającego względem powierzchni dS .

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad \text{Wm}^{-2}. \quad (3)$$

Współczynnik absorpcji

Współczynnik absorpcji (nazywany również zdolnością absorpcyjną) $A(\lambda, T)$ jest ilorazem strumienia energii ϕ_a promieniowania zaabsorbowanego przez dane ciało do strumienia energii ϕ_i promieniowania padającego na nie. Jest on funkcją temperatury

$$A(T) = \frac{\phi_a}{\phi_i}, \quad 0 < A(T) < 1. \quad (4)$$

Monochromatyczny (widmowy) współczynnik absorpcji

Monochromatyczny współczynnik absorpcji $A(\lambda, T)$ jest współczynnikiem absorpcji w małym przedziale $d\lambda$ długości fal w otoczeniu fali o długości λ .

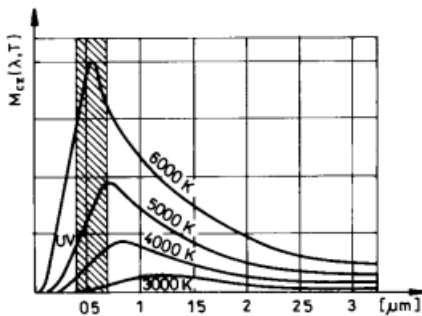
$$A(\lambda, T) = \frac{\phi_a(\lambda, \lambda + d\lambda)}{\phi_i(\lambda, \lambda + d\lambda)}. \quad (5)$$

Promieniowanie termiczne ciała doskonale czarnego

Ciało doskonale czarne to takie, które całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne. Gęstość monochromatyczną emitancji ciała doskonale czarnego opisuje równanie Plancka

$$M_{cz}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right]^{-1}, \quad (6)$$

gdzie: $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$, $C_2 = 0,0144 \text{ mK}$, λ – długość fali, T – temperatura bezwzględna



Rys. 1. Rozkład Plancka monochromatycznej gęstości emitancji energetycznej ciała doskonale czarnego w różnych temperaturach (obszar zakreślony oznacza promieniowanie widzialne).

Emitancja ciała doskonale czarnego

Aby obliczyć emitancję ciała doskonale czarnego w interesującym nas przedziale $\Delta\lambda$ należy całkować w tym przedziale funkcję $M_{cz}(\lambda, T)$ po $\Delta\lambda$. Całkując $M_{cz}(\lambda, T)$ po wszystkich długościach fali otrzymuje się **prawo Stefana - Boltzmanna**

$$M_{cz}(T) = \int_0^{\infty} M_{cz}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (7)$$

gdzie: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Emitancja energetyczna ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury T wyrażonej w stopniach Kelvina.

Promieniowanie termiczne ciała rzeczywistego

Ciało rzeczywiste nie jest doskonale czarne w tym sensie, że nie pochłania całkowicie padającego na nie promieniowania. Iloraz mocy $\Delta\phi$ promieniowania padającego przez elementarną powierzchnię ciała napromieniowanego określa natężenie napromieniowania E (równanie 3). Jedynie część tej mocy, mianowicie $A(T)E$ zostaje przez to ciało pochłonięta. Reszta jest odbita, przepuszczona albo rozproszona. $A(T)$ jest współczynnikiem absorpcji promieniowania padającego na ciało. Jeżeli promieniowanie jest jedynym sposobem wymiany energii ciała z otoczeniem, a temperatura tego ciała i jego otoczenia jest jednakowa, wtedy jego emitancja jest równa mocy pochłoniętej $M(T) = A(T)E$.

Przypomnijmy, że ciało doskonale czarne w pełni pochłania padające na nie promieniowanie, tak więc jego $A(T)$ jest równe 1, a $M_{cz}(T)=E$. Dla ciała rzeczywistego możemy więc napisać tzw. **całkową postać prawa Kirchhoffa**

$$M(T) = A(T)M_{cz}(T), \quad 0 < A < 1, \quad (8)$$

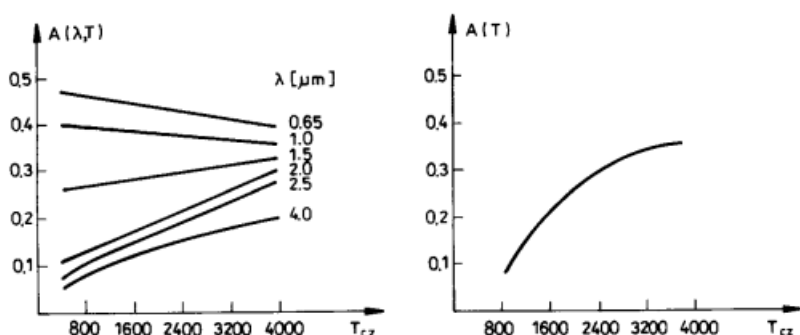
które mówi, że emitancja energetyczna ciała rzeczywistego jest $A(T)$ razy mniejsza od emitancji ciała doskonale czarnego będącego w tej samej temperaturze. Współczynnik absorpcji $A(T)$ bywa też nazywany współczynnikiem emisyjności, co lepiej oddaje jego sens w równaniu (8).

Jeżeli w ciele rzeczywistym pod wpływem zaabsorbowanego promieniowania nie występuje luminescencja, wtedy prawo Kirchhoffa jest spełnione w każdym, dowolnie małym przedziale długości fal. Wyraża to tzw. **różniczkowa postać prawa Kirchhoffa**

$$M(\lambda, T) = A(\lambda, T)M_{cz}(\lambda, T), \quad (9)$$

które mówi, że gęstość widmowa emitancji ciała rzeczywistego jest $A(\lambda, T)$ razy mniejsza od gęstości monochromatycznej emitancji ciała doskonale czarnego.

W ćwiczeniu ciałem rzeczywistym będzie wolframowe włókno żarówki; dlatego jako przykład zależności $A(\lambda, T)$ i $A(T)$ od temperatury czarnej na rys. 2 wybrano właśnie wolfram. Pojęcie temperatury czarnej jest wyjaśnione w dalszej części opisu ćwiczenia.



Rys. 2. Wykres zależności współczynników absorpcji $A(\lambda, T)$ i $A(T)$ wolframu od temperatury czarnej.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Fizyczne podstawy pirometrii optycznej

Pirometrią nazywa się metody pomiaru temperatury ciał rzeczywistych polegające na porównaniu ich emitancji lub barwy z emitancją lub barwą ciała doskonale czarnego. Przyrządy służące do tego celu nazywa się pirometrami. W fizyce obowiązuje termodynamiczna bezwzględna skala temperatur, która jest identyczna ze skalą określoną za pomocą termometru gazowego napełnionego gazem doskonałym.

Temperatury mierzy się różnymi termometrami (cieczowymi, gazowymi, rezystorowymi, termoparami i in.) cechowanymi według temperatur przemian fazowych. Wyniki pomiarów temperatur pośrednich wykonywanych różnymi rodzajami termometrów nie muszą być sobie równe. Istnieje np. kilka rodzajów pirometrów których wyniki pomiarów różnią się nie tylko z powodu niedoskonałej interpolacji między punktami umownej międzynarodowej skali temperatur, ale dlatego, że są oparte na różnych definicjach temperatury. W tym sensie mówi się w pirometrii o różnych temperaturach. Oto niektóre z nich:

Temperatura czarna T_{cz} ciała jest równa temperaturze T_{cz} ciała doskonale czarnego, które w zadanym, małym przedziale $\Delta\lambda$ promieniowania ma taką samą emitancję jak ciało mierzone.

Temperatura barwowa T_b ciała mierzonego jest równa temperaturze ciała T_{cz} doskonale czarnego, którego barwa jest najbardziej zbliżona do barwy promieniowania ciała mierzonego.

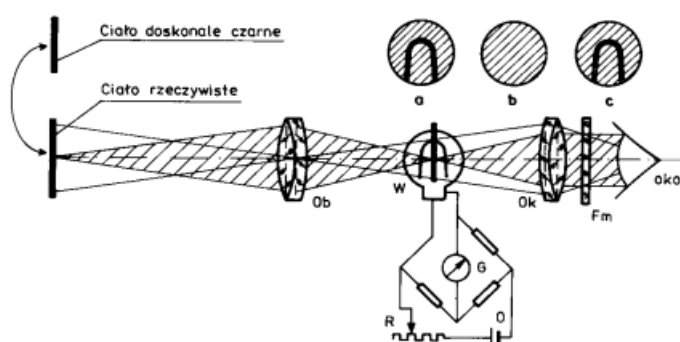
Pirometr optyczny monochromatyczny z zanikającym włóknem

Pirometr optyczny monochromatyczny służy do pomiaru temperatury czarnej. Obiektyw Ob pirometru tworzy obraz badanego ciała w płaszczyźnie W włókna żarówki umieszczonego w płaszczyźnie przedmiotowej okularu Ok . Obserwator patrzący w okular pirometru widzi więc włókno W żarówki na tle obrazu badanego ciała. W okularze mieści się filtr monochromatyczny F_m , przepuszczający tylko niewielki przedział $\Delta\lambda$ długości fal promieniowania. Emitancję włókna W można zmieniać.

Włókno W może być

- ciemniejsze niż obraz mierzonego ciała (a),
- jaśniejsze (c),
- równe (b).

W ostatnim przypadku zanika ono na tle obrazu badanego ciała.



Rys. 3. Schemat pirometru optycznego z zanikającym włóknem.

Ciało o temperaturze rzeczywistej T ma temperaturę czarną T_{cz} , jeżeli w umownym przedziale $\Delta\lambda$ jego emitancja jest równa emitancji ciała doskonale czarnego. Miara emitancji promieniowania włókna W żarówki mogą być różne wielkości fizyczne, zwłaszcza przyłożone do niego napięcie, natężenie prądu lub jego oporność. Ten ostatni przypadek pokazano na rys. 3. Włókno żarówki jest tu włączone w jedno z ramion mostka Wheatstone'a, a miernik G w jego przekątnej. Mostek jest zrównoważony przy rezystancji włókna o temperaturze około 800°C . Jeżeli temperatura badanego ciała jest wyższa, temperaturę włókna też należy podwyższyć (zmniejszając oporność R w obwodzie zasilania), aż stanie się ono niewidoczne na tle obrazu obiektu. W wyższych temperaturach oporność włókna rośnie, co powoduje zachwianie równowagi mostka i wychylenie galwanometru G . Prąd I wskazywany przez galwanometr jest miarą temperatury czarnej mierzonego ciała. Jest tak dlatego, bo pirometr był cechowany za pomocą ciała doskonale czarnego. Pirometr w czasie cechowania był skierowany na ciało doskonale czarne o zmieniających się kolejno temperaturach T_1, T_2, \dots, T_n . Zanikanie włókna miało miejsce przy prądach galwanometru wynoszących odpowiednio I_1, I_2, \dots, I_n . Tak cechowane galwanometry bywają często wyskalowane w jednostkach temperatury.

Odległość pirometru od badanego ciała nie ma znaczenia pod warunkiem, że między nimi nie ma znaczącego pochłaniania światła (np z powodu zapyłonej atmosfery).

Związek między temperaturą czarną a rzeczywistą

Powtórzmy zdanie: "Ciało o temperaturze rzeczywistej T ma temperaturę czarną T_{cz} , jeżeli w umownym przedziale $\Delta\lambda$ jego emitancja jest równa emitancji ciała doskonale czarnego." Stąd równanie: $M_{cz}(T_{cz})=M(T)$. Ponieważ jednak na podstawie wyrażenia (8) $M(T)=A(T_{cz})M_{cz}(T)$, więc $M_{cz}(T_{cz})=A(T_{cz})M_{cz}(T)$.

Wyprowadzając wzór (8) nie precyzowano jaką metodą będzie mierzona temperatura i przyjęto milcząco, że T oznacza temperaturę rzeczywistą. Teraz $A(T)$ zamieniono na $A(T_{cz})$, bo w takich temperaturach podaje się na ogół wartości w tablicach fizycznych. Nie ma to wpływu na wynik,

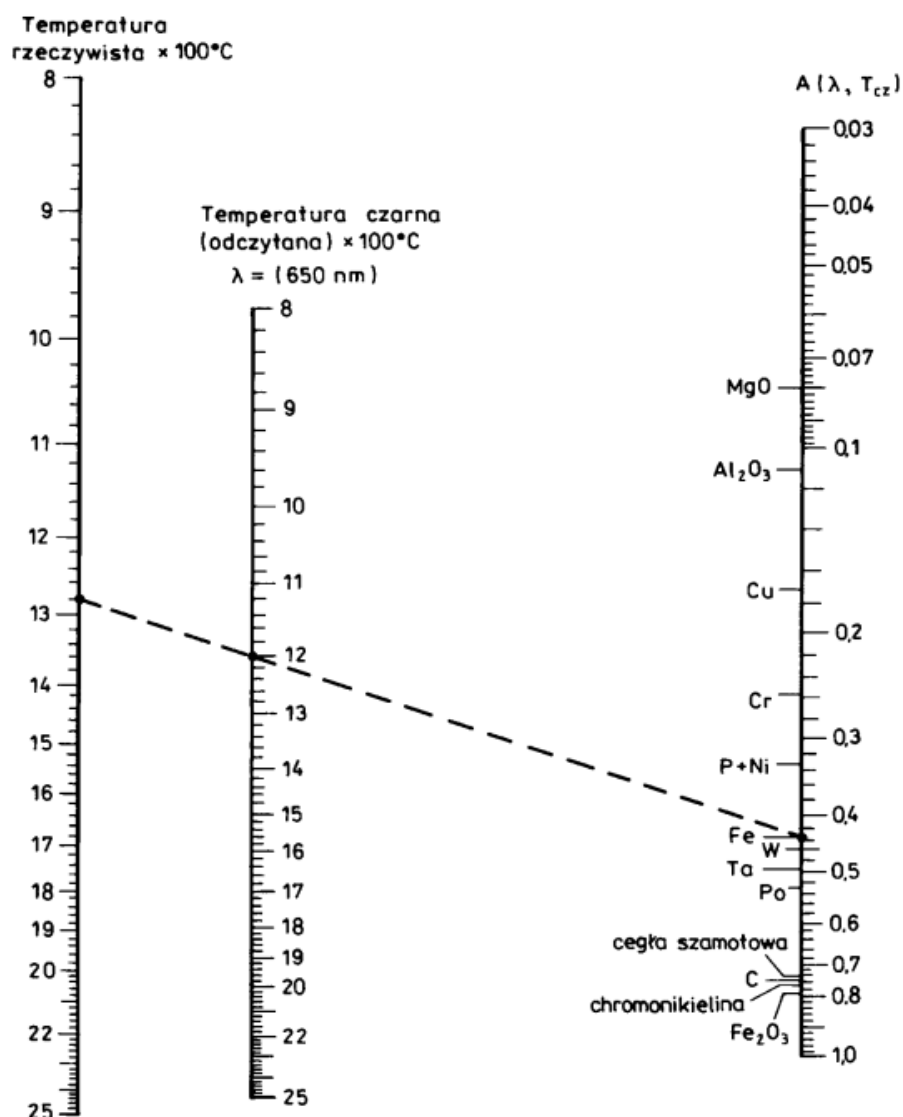
bo $A(T_{cz})$ określa ten sam stan fizyczny co $A(T)$. Wyrażając poszczególne wielkości przez ich gęstości widmowe, ostatnie równanie można przedstawić w nowej postaci $M_{cz}(\lambda, T_{cz})\Delta\lambda = A(\lambda, T_{cz})M_{cz}(\lambda, T)\Delta\lambda$. Wyrażając emitancje, występujące po obu stronach równania, wzorami Plancka (5) otrzymuje się

$$C_1\lambda^{-5} \left[\left(\exp \frac{C_2}{\lambda T_{cz}} \right) - 1 \right]^{-1} = A(\lambda, T_{cz}) C_1\lambda^{-5} \left[\left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]^{-1}. \quad (10)$$

Po uproszczeniu, zlogarytmowaniu i elementarnych przekształceniach otrzymuje się prosty związek między temperaturą czarną i rzeczywistą mierzonego ciała.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{cz}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln A(\lambda, T_{cz}). \quad (11)$$

Ze wzoru (11) można bez trudu obliczyć temperaturę rzeczywistą T ciała, jeżeli znamy z pomiaru jego temperaturę czarną T_{cz} . W mniej dokładnych pomiarach można posłużyć się nomogramem przedstawionym na rys. 4. Przedłużenie linii łączącej rodzaj mierzonego ciała lub jego $A(\lambda, T_{cz})$ znajdujące się na prawej skali z jego temperaturą czarną T_{cz} umieszczoną na skali środkowej, wyznacza na lewej skali temperaturę rzeczywistą T .



Rys. 3. Nomogram

3 Zadania do wykonania

A) Pomiary:

1. Wykonać pomiar zależności temperatury rzeczywistej wolframowego włókna żarówki w zależności od pobieranej mocy.

B) Opracowanie wyników:

1. Obliczyć temperatury rzeczywiste i ich niepewności dla każdej mocy żarówki według wzoru (11).
2. Temperatury rzeczywiste odczytać na podstawie nomogramu i porównać z temperaturami rzeczywistymi obliczonymi ze wzoru.
3. Wykonać wykres zależności temperatury rzeczywistej włókna żarówki od pobranej mocy $T_{rz}=f(P)$.

4 Pytania:

1. Co to jest promieniowanie termiczne? Co jest źródłem tego promieniowania?
2. Definicja ciała doskonale czarnego. Podać przykłady ciał, które można traktować jako ciała doskonale czarne. Wskazać model ciała doskonale czarnego w ćwiczeniu.
3. Zdefiniować pojęcie zdolności emisyjnej (emitancja energetyczna) i widmowej zdolności emisyjnej (gęstość widmowa emisji energetycznej).
4. Zapisać prawo Plancka. Przy jakich założeniach Planck otrzymał tę zależność?
5. Zinterpretować krzywe widmowe zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego w funkcji długości fali dla różnych temperatur.
6. Przytoczyć jedno z praw promieniowania ciała doskonale czarnego.
7. Opisać budowę pirometru i podać metody wyznaczania temperatury rzeczywistej.
8. Zdefiniować temperaturę czarną. Jaki jest związek między temperaturą czarną a temperaturą rzeczywistą ciała?

opracowała G.Statkiewicz