

SPRAWDZANIE PRAWA STEFANA–BOLTZMANNA

Cel ćwiczenia: poznanie podstawowych pojęć związanych z promieniowaniem termicznym ciał, eksperymentalna weryfikacja teorii promieniowania ciała doskonale czarnego, poznanie budowy i zasady działania piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego oraz pomiar energii promieniowania.

Zagadnienia: promieniowanie ciała czarnego, emitancja energetyczna, prawo Plancka, prawa Stefana–Boltzmann, Wiena, zjawisko piroelektryczne, piroelektryczny detektor promieniowania podczerwonego.

31.1. Wprowadzenie

Ciało doskonale czarne jest to ciało, które całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie. Modelem ciała czarnego jest wnęka z małym otworem. Promieniowanie wpadające do takiej wnęki zanim ją opuści ulega wielokrotnemu odbiciu. Przy każdym z odbić część energii promieniowania zostaje przekazana ściankom wnęki, tak, że energia promieniowania padającego jest znacznie większa od energii promieniowania wychodzącego.

Uzasadnienie nazwy stanie się oczywiste jeżeli w słoneczny dzień spojrzemy na otwarte okno w oddalonym od nas budynku. Wnętrze budynku wydaje się nam czarne, mimo, że w budynku jest jasno. Tylko nieznaczna część promieniowania wchodzącego przez otwarte okno wraca na zewnątrz.

Podstawowe pojęcia oraz prawa dotyczące promieniowania ciała doskonale czarnego oraz ciał rzeczywistych zostały opisane we wstępie do ćwiczenia 30.

Każde ciało o temperaturze T wyższej od zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Moc promieniowania rozkłada się między fotony o różnej energii. Rozkład energii fotonów emitowanych przez ciało doskonale czarne opisuje prawo Plancka. Całkowita moc emitowana w postaci promieniowania przez ciało doskonale czarne o powierzchni S (całkowita ener-

gia emitowana w jednostce czasu – strumień energii Φ_c), zgodnie z prawem Stefana–Boltzmanna jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej T^4 ,

$$\Phi_c = S\sigma T^4, \quad (31.1)$$

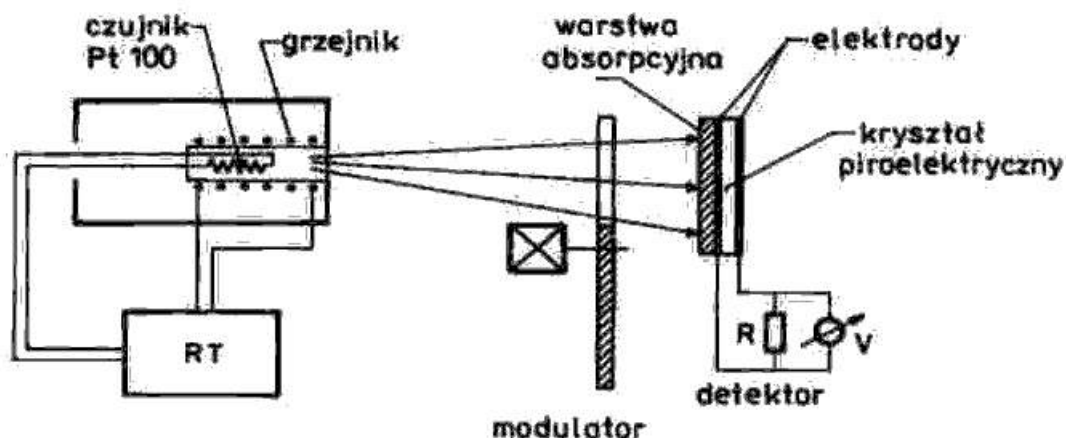
gdzie $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ jest stałą Stefana–Boltzmanna.

Celem ćwiczenia jest sprawdzenie prawa Stefana–Boltzmanna (zależności (31.1)). W tym celu należy wyznaczyć związek między mocą emitowaną przez model ciała doskonale czarnego a jego temperaturą.

31.2. Zasada pomiaru – układ pomiarowy

Układ pomiarowy składa się z modelu ciała doskonale czarnego, którym jest grzejnik umieszczony w obudowie z małym otworem, regulatora temperatury, modulatora oraz piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego (rys. 31.1). Źródłem promieniowania, jest model ciała doskonale czarnego, którego temperatura jest stabilizowana za pomocą regulatora temperatury RT współpracującego z platynowym czujnikiem temperatury (Pt–100).

Strumień energii padający na element powierzchni detektora jest proporcjonalny do strumienia energii emitowanej przez model ciała czarnego. Jeżeli temperatura ciała czarnego nie jest zbyt wysoka, to zgodnie ze wzorem Plancka większość energii emitowana jest w postaci promieniowania podczerwonego.



Rys. 31.1. Schemat układu do sprawdzania prawa Stefana–Boltzmanna

Aby wyznaczyć zależność mocy emitowanej przez model ciała czarnego od jego temperatury powinniśmy dysponować detektorem promieniowania, który reaguje na całkowitą moc padającego na ten detektor promieniowania, niezależnie od jego składu spektralnego. W ćwiczeniu korzystamy z piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego, który spełnia wymieniony poprzednio warunek. Energia E gromadzona przez detektor o temperaturze T_0 podczas ogrzewania strumieniem promieniowania emitowanego przez model ciała czarnego o temperaturze T jest równa różnicy między energią pochłoniętą energią wypromieniowaną przez detektor

$$E \sim (T^4 - T_0^4). \quad (31.2)$$

31.3. Zasada działania piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego

Zjawisko piroelektryczne polega na generowaniu na powierzchni niektórych kryształów, spolaryzowanych ceramiek lub folii ładunków elektrycznych pod wpływem zmian temperatury. Ładunek elektryczny Δq generowany na powierzchni S_k kryształu, na skutek zmiany jego temperatury o ΔT określony jest równaniem

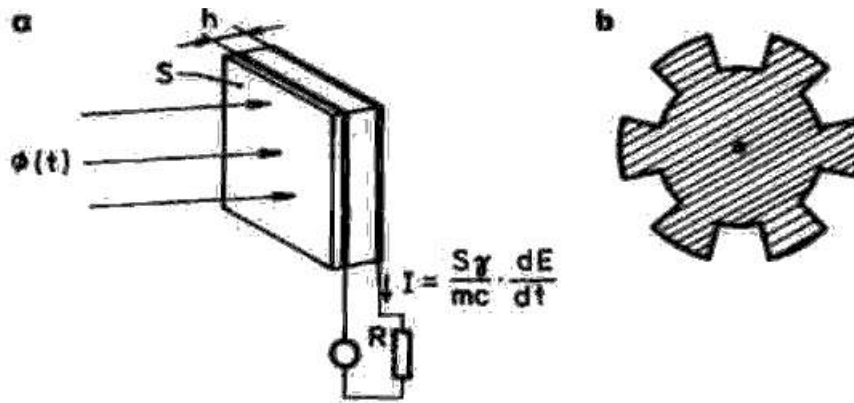
$$\Delta q = S_k \gamma \Delta T, \quad (31.3)$$

współczynnik γ nosi nazwę współczynnika piroelektrycznego.

Rozpatrzmy cienką płytkę o grubości h i polu powierzchni S_k wyciętą z piroelektryka (płytkę musi być odpowiednio zorientowana – zjawisko piroelektryczne obserwowane jest tylko w ściśle określonych kierunkach krystalograficznych, zależnych od symetrii kryształu). Na płytkę napyłone są elektrody zwarte opornikiem R . Na jedną z elektrod naniesiona jest dodatkowo warstwa absorbująca promieniowanie (rys. 31.2).

Jeżeli temperatura płytki zmieni się o ΔT , to na jej powierzchni S_k pojawi się ładunek Δq , określony równaniem (31.3). Zmiana temperatury o ΔT w czasie Δt , powoduje przepływ prądu o natężeniu

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = S_k \gamma \frac{dT}{dt}. \quad (31.4)$$



Rys. 31.2. Schemat piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego (a), tarcza modulatora (b)

Jeżeli kryształ jest ogrzewany przez zmieniający się w czasie strumień energii promieniowania $\Phi(t)$, to z bilansu energii wynika, że

$$\Phi(t) = \frac{dE}{dt} = mc \frac{dT}{dt}, \quad (31.5)$$

gdzie: E oznacza energię gromadzoną w kryształ, m jest masą, c – ciepłem właściwym, natomiast dT średnią zmianą temperatury kryształu. Podstawiając do równania (31.3) w miejsce $\Delta T/\Delta t$, wartość dT/dt obliczoną z równania (31.4) otrzymamy

$$I = \frac{S_k \gamma}{mc} \frac{dE}{dt}. \quad (31.6)$$

Z równania (31.6) wynika, że *natężenie prądu płynącego przez opór obciążenia* detektora jest proporcjonalne do powierzchni detektora, wartości współczynnika piroelektrycznego oraz strumienia energii absorbowanego przez kryształ, a odwrotnie proporcjonalne do pojemności cieplnej kryształu (iloczynu mc), natomiast *nie zależy od składu spektralnego promieniowania, które pada na detektor*. Jeżeli kryształ byłby ogrzewany przez stały (niezależny od czasu) strumień energii promieniowania, to po pewnym czasie temperatura kryształu uległaby ustaleniu (energia absorbowana byłaby równa energii traconej). Z równania (31.4) wynika, że natężenie prądu generowanego przez detektor jest proporcjonalne do szybkości zmian temperatury, dlatego strumień promieniowania padający na detektor powinien być modulowany.

Modulatorem jest obracająca się tarcza z odpowiednio wyciętymi otworami, umieszczona na drodze wiązki promieniowania docierającej do detektora.

Jeżeli pomiędzy źródłem promieniowania i detektorem znajduje się wycięcie w tarczy modulatora, kryształ jest ogrzewany (temperatura kryształu rośnie), natomiast w czasie gdy wiązka jest przesłaniana przez modulator kryształ stygnie.

Przedstawiony tutaj opis działania piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego jest bardzo uproszczony. Zainteresowanych odsyłamy do monografii – w podręcznikach fizyki brak jest opracowań dotyczących zjawiska piroelektrycznego oraz piroelektrycznych detektorów promieniowania.

Zjawisko piroelektryczne oraz piroelektryczne detektory promieniowania podczerwonego stanowią tematy ćwiczeń w Laboratorium Fizyki Ciała Stałego oraz w Pracowni Przetworników Fotoelektrycznych.

Piroelektryczne detektory promieniowania podczerwonego są stosowane w wielu dziedzinach techniki, np. w systemach alarmowych. Kamery termowizyjne stanowiące matryce detektorów piroelektrycznych umożliwiają obserwacje i rejestrowanie rozkładu temperatury na powierzchni różnych ciał. Kamery te stosowane są w medycynie do wykrywania stanów chorobowych w organizmie człowieka, w budownictwie do wykrywania nieszczelności budynków, w elektronice (do sprawdzania układów elektronicznych). Kamery termowizyjne wykorzystywane są również do celów militarnych oraz w badaniach kosmicznych.

31.4. Zadania do wykonania

A. Pomiary

Wyznaczyć zależność spadku napięcia lub natężenia prądu płynącego przez opór obciążenia piroelektrycznego detektora promieniowania podczerwonego od temperatury modelu ciała czarnego. Pomiary wykonać dla kilkunastu temperatur. Po każdej zmianie temperatury odczekać kilka min (aż temperatura modelu ciała czarnego ustali się)

B. Opracowanie wyników

Prawo Stefana–Boltzmannia możemy zapisać w postaci równania $M = CT^\alpha$, w którym: $C = 5\sigma$ jest stałą, natomiast wykładnik α potraktujemy jako wielkość nieznaną, której wartość chcemy wyznaczyć. W tym celu należy:

- Sporządzić wykres zależności logarytmu natężenia prądu lub spadku napięcia na oporze obciążenia detektora od logarytmu z temperatury modelu ciała doskonale czarnego.
- Wykorzystując regresję liniową [5] wyznaczyć nachylenie liniowej części wykresu to jest wartość wykładnika potęgowego α .
- Oszacować niepewność z jaką wyznaczono wartość wykładnika.
Porównać uzyskaną eksperymentalnie wartość wykładnika z występującym w prawie Stefana–Boltzmannna.
Opracowując wyniki pomiarów warto skorzystać z programu **regresja.pas** [5] lub któregoś z dostępnych arkuszy kalkulacyjnych.

Literatura uzupełniająca: [12], [13]