

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCURESTI
DEPARTAMENTUL DE FIZICĂ**

**LABORATORUL DE FIZICA ATOMICA SI FIZICA CORPULUI SOLID
BN - 031 B**

**STUDIUL UNOR LEGI ALE
RADIĂȚIEI TERMICE**

STUDIUL UNOR LEGI ALE RADIAȚIEI TERMICE

1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator are ca obiectiv verificarea formulei lui Planck, care exprimă cantitativ o lege fundamentală a radiației termice, și aplicarea altor legi importante ale radiației termice precum legea Stefan-Boltzmann și legea de deplasare Wien, în vederea caracterizării unei surse de radiație termică.

2. Teoria lucrării

Radiația termică este radiația electromagnetică aflată în echilibru termodinamic cu substanța care emite această radiație, emisia fiind datorată mișcării termice a sarcinilor electrice microscopice din compoziția acestei substanțe. Datorită distribuției aleatorii a direcțiilor de oscilație termică a dipolilor electricii microscopici, radiația termică astfel emisă este nepolarizată.

Propagarea radiației termice, ca și în cazul altor tipuri de unde electromagnetice, reprezintă transport de *energie radiantă*. Energia radiantă a radiației termice are o distribuție spectrală continuă.

Echilibrul termodinamic perfect între substanța emisivă și radiația termică emisă este un caz ideal în care substanța emite și absoarbe cantități egale de energie radiantă corespunzătoare unui anumit domeniu spectral, la o anumită temperatură a substanței. O astfel de substanță ideală în care generarea de radiație termică are loc în condiții de echilibru termodinamic perfect este denumită *corp negru*. Corpul negru are proprietatea de a absorbi integral radiația incidentă, pentru întregul spectru al acesteia. Experimental au fost obținute diferite substanțe a căror comportare se apropie de particularitățile ideale ale corpului negru.

Densitatea spectrală a energiei radiante, $w(\lambda, T)$, reprezintă cantitatea de energie radiantă corespunzătoare unității de interval spectral de lungime de undă λ a radiației emise în unitatea de volum. Această mărime este exprimată, în cazul corpului negru, prin formula Planck [1]:

$$w^0(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad (1)$$

unde λ este lungimea de undă a radiației, la care se evaluează densitatea spectrală de energie radiantă, T este temperatura termodinamică a corpului negru, h – constanta Planck ($h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Js), c – viteza de propagare a radiației electromagnetice în vid ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), iar k_B - constanta Boltzmann ($k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Funcția $w^0(\lambda, T)$ prezintă, la o temperatură T , o valoare maximă la o lungime de undă λ_m dată de legea de deplasare Wien:

$$\lambda_m \cdot T \cong 2.9 \left(\times 10^{-3} \right) m \cdot K \quad (2)$$

Conform relației (2), odată cu creșterea temperaturii sursei de radiație termică are loc modificarea distribuției spectrale a energiei radiante emise astfel încât lungimea de undă λ_m corespunzătoare maximului funcției $w(\lambda, T)$ se “deplasează” către valorile mici.

O anumită substanță diferită de corpul negru, aflată la temperatura T , emite radiație termică a cărei densitate spectrală a energiei radiante are expresia [2]:

$$w(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot w^0(\lambda, T); \quad [w(\lambda, T)]_{SI} = \text{J/m}^4 \quad (3)$$

unde $w^0(\lambda, T)$ este densitatea spectrală de energie radiantă a corpului negru (exprimată prin relația (1)) aflat la aceeași temperatură ca și substanța emisivă considerată, iar factorul $\varepsilon(\lambda, T)$ este emisivitatea spectrală a acestei substanțe (mărimă fără dimensiune).

Densitatea volumică de energie radiantă se obține prin integrarea densității spectrale de energie radiantă pe întregul domeniu spectral de emisie a radiației termice și se exprimă prin legea Stefan-Boltzmann:

$$w(T) = \int_0^{\infty} w(\lambda, T) d\lambda = \frac{4}{c} \sigma T^4; \quad [w(T)]_{SI} = \text{J/m}^3 \quad (4)$$

unde $\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2}$ este constanta Stefan-Boltzmann și are valoarea $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

O mărime importantă pentru caracterizarea unei surse de radiație termică având aria A a suprafeței emise, este densitatea spectrală $\Phi(\lambda, T)$ a fluxului radiant (sau a puterii radiante), definită prin relația:

$$\Phi(\lambda, T) = A \frac{c}{4} w(\lambda, T); \quad [\Phi(\lambda, T)]_{SI} = \text{W/m} \quad (5)$$

Răspunsul electric al unui fotodetector la incidența unui fascicul de radiație electromagnetică este reprezentat cantitativ prin mărimea Y proporțională cu fluxul radiant; pentru o anumită lungime de undă a radiației termice incidente pe suprafața activă a fotodetectorului considerat, această relație se exprimă prin:

$$Y(\lambda, T) = C(\lambda) \cdot \Phi(\lambda, T) \quad (6)$$

unde $C(\lambda)$ este o constantă de proporționalitate care depinde de factorul de transmisie $\tau(\lambda)$ al sistemului optic din ansamblul de măsurare la lungimea de undă λ și de geometria parcursului radiației termice, prin sistemul optic, până la suprafața activă a fotodetectorului.

Din relațiile (5) și (6) rezultă:

$$Y(\lambda, T) = A \frac{c}{4} C(\lambda) w(\lambda, T) \quad (7)$$

3. Montajul experimental și mediul de studiu

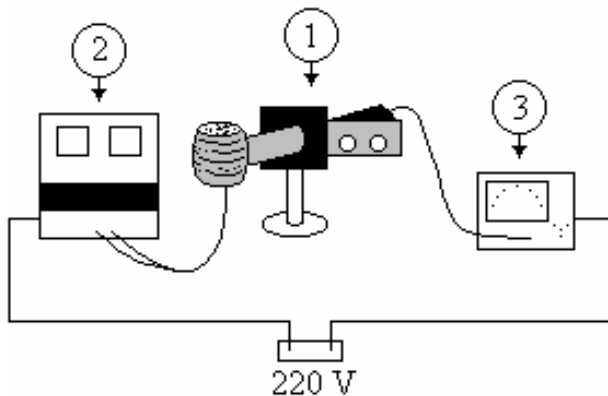


Fig. 1 Dispozitivul experimental

Ansamblul experimental (Fig. 1) cuprinde: montajul optic (1) compus dintr-o lampă cu filament de wolfram, două plăci cu filtre interferențiale, un sistem de lentile pentru colimarea și focalizarea fasciculului și un fotodetector cu siliciu; sursa stabilizată de curent continuu (2); convertorul tensiune-curent (3), prevăzut cu un cadran gradat în diviziuni arbitrare, diviziunea (div) reprezentând astfel unitatea de măsură în care se exprimă cantitativ răspunsul detectorului.

Sursa stabilizată de curent, necesară pentru asigurarea funcționării lămpii cu incandescență la temperatura de interes a filamentului, se pune în funcțiune prin comutarea butonului din partea stânga-sus a panoului frontal. Se efectuează apoi reglarea tensiunii electrice la o valoare nu mai mare de 12V. La valori ale tensiunii de alimentare peste 12V filamentul lămpii se poate „arde”. Valoarea tensiunii de alimentare de 12V corespunde funcționării lămpii în regim de etalon de lucru la temperatura T_{et} de 3150K, conform studiului preliminar efectuat la Institutul Național de Metrologie. La utilizarea instrumentului pentru măsurarea răspunsului Y al detectorului sunt necesare diferite trepte de amplificare, în funcție de filtrul interferențial aflat în incidența fasciculului de radiație termică. Astfel, la alimentarea cu tensiune electrică de 12V treptele sunt:

Filtru (nr.)	$k_{amp.et}$
1;2	*10
3;4;5;6;7	*100
8;9;10	*1000

Observatii asupra procedeelor de utilizare a ansamblului experimental:

- Treptele de amplificare necesare pentru ca aparatul să dea indicații exacte se pot modifica în timp datorită scăderii puterii radiante a lămpii;
- Poziția de zero a acului indicator se potrivește după fiecare schimbare a treptei de amplificare, obturînd, în prealabil, calea de acces a radiației către detector, cu partea opacă a plăcii cu filtre;
- Se aduce lampa în stare de funcționare, în condițiile de etalon (et), la $U_{et}=12V$, cînd $T_{et}= 3150K$, și se lasă să funcționeze 10 min, pentru stabilizarea caracteristicilor sale, înainte de începerea măsurătorilor.

3.1. Determinarea temperaturii filamentului de wolfram la aplicarea tensiunilor electrice de 8V și de 10V la bornele lămpii.

Puterea electrică disipată prin efect Joule în filamentul de wolfram, pentru emisia de radiație termică, este exprimată prin:

$$P_{el} = U \cdot I, \tag{8}$$

unde U este tensiunea electrică aplicată, iar I – intensitatea curentului.

Conversia puterii electrice disipate în putere radiantă a radiației termice emise se poate descrie prin ecuația:

$$U \cdot I = \frac{1}{\Delta t} \eta \cdot V \cdot w(T) \tag{9}$$

unde η este eficiența de conversie energetică; V – volumul incintei lămpii, considerată ca o cavitate în echilibru termodinamic al radiației termice, iar Δt este intervalul de timp în care se măsoară puterea radiantă.

Din relațiile (4) și (9) rezultă proporționalitatea dintre puterea electrică disipată $U \cdot I$ și T^4 . Astfel, putem scrie egalitatea de rapoarte:

$$\frac{U' \cdot I}{U_{et} \cdot I} = \frac{T'^4}{T_{et}^4} \tag{10}$$

unde I este menținută constantă la valoarea de 5,2A; U' are valorile de 8V și de 10V; T' reprezintă temperatura termodinamică a filamentului corespunzătoare fiecăreia dintre tensiunile electrice aplicate.

Obiectivul acestei etape a lucrării este calculul lui T' , cunoscându-se parametrii U_{et} și T_{et} pentru funcționarea etalon a lămpii.

3.2. Verificarea formulei lui Planck pentru radiația termică emisă de lampa cu filament de wolfram, la temperatura etalon cât și la temperaturile calculate cu relația (10).

Din formula Planck (1) și relațiile (3) și (7) rezultă egalitatea:

$$\lambda^5 \cdot \frac{Y(\lambda, T)}{\varepsilon(\lambda, T)} \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right] = 4\pi hc^2 A \cdot C(\lambda) \quad (11)$$

Tabelul 1.

Valorile emisivității spectrale a wolframului în intervalul de temperatură (2800...3150) K, corespunzătoare lungimilor de undă ale radiației transmise de fiecare dintre cele 10 filtre interferențiale [3]

Filtrul I	Lungimea de undă λ (mm)	$\varepsilon(\lambda)$
1	383	0,46
2	463	0,46
3	510	0,45
4	534	0,44
5	553	0,44
6	591	0,44
7	620	0,43
8	674	0,43
9	771	0,42
10	791	0,41

Pentru fiecare dintre cele trei tensiuni electrice aplicate lămpii (8V, 10V, 12V) se măsoară răspunsul Y al fotodetectorului la cele 10 valori (specificate în tabelul 1) ale lungimii de undă λ a radiației termice transmise prin fiecare filtru interferențial. Utilizând valorile emisivității spectrale a wolframului menționate în tabelul 1 se calculează membrul stâng al relației (11).

Membrul drept al ecuației (11) reprezintă o constantă pentru o valoare dată a lungimii de undă λ . Rezultă că la o anumită lărgime de undă λ a radiației termice, membrul stâng al ecuației (11) trebuie să fie constant, în limita erorilor experimentale, pentru toate cele trei temperaturi de lucru. **Verificarea acestui caracter constant al membrului stâng al ecuației (11) reprezintă un mod practic de verificare a formulei lui Planck.**

În acest scop, în cadrul tabelului 2 care se întocmește pe baza rezultatelor măsurătorilor, se utilizează notația $f(\lambda, T) = \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1$.

Verificarea formulei lui Planck este confirmată prin egalitatea celor trei valori numerice din ultima linie a tabelului 2., în limitele erorilor admisibile ce trebuie evaluate.

Tabelul 2.

Verificarea formulei lui Planck a radiației termice

λ (nm)	U [V]	8	10	12
383	T [K]			3150
463	$\frac{hc}{\lambda_B T}$ [1]			
510	$f(\lambda, T)$ [1]			
534	$\varepsilon(\lambda)$			
553	(din tabelul 1)			
591	$Y(\lambda, T)$ [div]			
620	$\lambda^5 \cdot \frac{f(\lambda, T)}{\varepsilon(\lambda, T)} \cdot Y(\lambda, T)$ [m ⁵ ·div]			
674				
771				
791				

$$\lambda_n = \frac{b}{T} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{3150} \cong 9,2 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 920 \text{ nm}$$