

1. FENOMENE CARE DOVEDESC CARACTERUL CORPUSCULAR AL CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC

Caracterul ondulatoriu al câmpului electromagnetic se manifestă în fenomenele de difracție, interferență, dispersie, polarizare, unda electromagnetică fiind complet descrisă de ecuațiile lui Maxwell.

La începutul secolului XX au fost evidențiate o serie de fenomene ce nu se explică pe baza proprietăților ondulatorii ale luminii: radiația termică, efectul fotoelectric, efectul Compton, etc. Pentru explicarea lor s-a introdus noțiunea de foton ce reprezintă cuanta de energie electromagnetică. Astfel s-au pus bazele experimentale ale fizicii cuantice.

1.1. Radiația termică. Principiul senzorilor de radiație

Orice corp aflat la o temperatură superioară la zero Kelvin emite radiații electromagnetice ale cărei proprietăți depind de natura și de temperatura sa. Radiația emisă de gaze are un spectru de frecvențe discret, iar cea emisă de lichide și solide are un spectru de frecvențe continuu. Corpurile emit radiație electromagnetică datorită fluctuațiilor termice ale sarcinilor electrice care le alcătuiesc (orice sarcină electrică aflată în mișcare accelerată emite radiație, paragraful 5.9.). Această emisie se numește radiație termică.

Să considerăm trei bucăți de metal (de ex: tungsten,

tantal și molibden), în interiorul cărora se practică o cavitate ce comunică cu exteriorul printr-un mic orificiu. Încalzite la 2000°C ele emit lumină. Se constată că radiația emisă de suprafață diferă de la un metal la altul în timp ce radiația emisă de cavitate este identică. Radiația termică din cavitate se află la echilibru în sensul că procesele de emisie sunt compensate de cele de absorbție. Ea are un spectru continuu, este omogenă și izotropă și nu este polarizată.

În studiul radiației termice se utilizează următoarele mărimi fizice:

- puterea spectrală de emisie $E(\nu, T)$ reprezintă cantitatea de radiație emisă în unitatea de timp, de unitatea de suprafață, într-un domeniu spectral de o unitate, într-un unghi solid unitar, în direcție normală.

- puterea spectrală de absorbție $A(\nu, T)$ a suprafeței unui corp este fracția din energia radiantă incidentă care este absorbită de unitatea de suprafață a corpului considerat, în domeniul de frecvențe de o unitate.

- densitatea de energie electromagnetică w este energia radiației termice din unitatea de volum:

$$w = \frac{dW}{dV} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (1.1)$$

- densitatea spectrală de energie $\rho(\nu, T)$ este energia din unitatea de volum, cu frecvența cuprinsă în intervalul $(\nu, \nu + d\nu)$:

$$\rho(\nu, T) = \frac{dw}{d\nu} = \frac{dW}{dV d\nu}$$

În urma unor experimente Kirchhoff a ajuns la concluzia că raportul dintre puterea spectrală de emisie și puterea spectrală de absorbție nu depinde de natura și dimensiunile corpului studiat, ci doar de frecvență și temperatură. Cu alte cuvinte, un corp puternic absorbant este și puternic emisiv pentru o frecvență dată. Legea lui

Kirchhoff se scrie :

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = K(\nu, T) \quad (1.2)$$

Valoarea acestui raport depinde de densitatea spectrală de energie prin relația :

$$K(\nu, T) = \frac{c}{4\pi} \rho(\nu, T) \quad (1.3)$$

În concluzie, densitatea spectrală de energie este o funcție universală dependentă doar de frecvență și de temperatura absolută. Dacă alegem un corp perfect absorbant, pentru care $A(\nu, T) = 1$:

$$E(\nu, T) = \frac{c}{4\pi} \rho(\nu, T) \quad (1.4)$$

Un astfel de corp, care constituie o idealizare fizică (asemenea gazului ideal), se numește corp negru. Studiind puterea spectrală de emisie a unui corp negru, se deduce funcția universală $\rho(\nu, T)$; cu ajutorul ei, se poate afla pentru orice corp $A(\nu, T)$, dacă se determină experimental $E(\nu, T)$. Se justifică astfel interesul pentru determinarea practică și teoretică a acestei funcții.

Un corp negru se realizează efectuând o cavitate într-un bloc metalic, cu un orificiu spre exterior, Fig.1.1. Pereții interiori ai cavității se innegresc. Orice radiație care pătrunde prin orificiu este absorbită în urma unor reflexii succesive și orificiul apare negru. Dacă blocul se încălzește, în interior se stabilește o radiație termică la echilibru, iar radiația emisă prin orificiu poartă informații asupra radiației din cavitate.

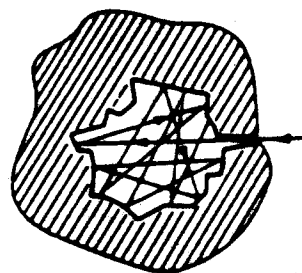


Fig.1.1.

Măsurarea densității spectrale de energie în funcție de frecvență și temperatură pentru un corp negru conduce la curbele din Fig.1.2., ce nu se pot explica pe baza caracterului ondulatoriu al câmpului electromagnetic

Explicarea distribuției energiei în spectrul radiației termice a fost dată de către Planck în anul 1900, pornind de la următoarele presupuneri:

- corpurile sunt alcătuite din oscilatori microscopici (sarcinile electrice) a căror energie nu poate lua orice valoare, ci numai valori multipli întregi ai unei energii minime $h\nu$:

$$E = nh\nu \quad (1.5)$$

unde $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s este constanta lui Planck.

- oscilatorii microscopicii nu emit radiație în mod continuu, ci în salturi la trecerea de la o stare staționară la alta prin variația cu o unitate a lui Δn :

$$\Delta E = \Delta nh\nu \quad (1.6)$$

Energia este emisă și absorbită de materie în mod cuantificat, o cantă de energie având valoarea $h\nu$. În viziunea lui Planck câmpul electromagnetic continuă să aibă caracter ondulatoriu, cuantificarea datorându-se materiei.

Expresia lui Planck pentru $\rho(\nu, T)$ care verifică în totalitate proprietățile radiației termice a corpului negru este:

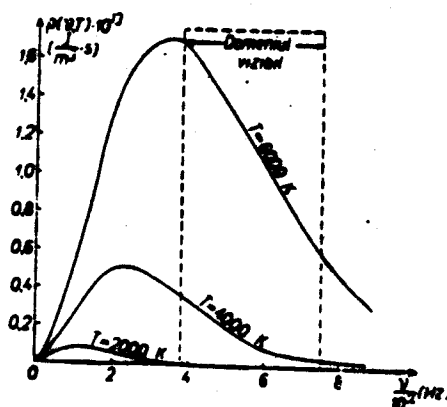


Fig.1.2.

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1.7)$$

Maximul funcției se află prin anularea derivatei:

$$\frac{\delta\rho}{\delta\nu} = 0, \text{ sau } \frac{\delta\rho}{\delta x} = 0, \text{ unde } x = \frac{h\nu}{kT} \quad (1.8)$$

din care rezultă următoarea ecuație transcendentă:

$$5e^{-x} = 5 - x \quad (1.9)$$

care rezolvată printr-o metodă grafică sau numerică, conduce la valoarea:

$$x_{\max} = \frac{h\nu_{\max}}{kT} = \frac{hc}{\lambda_{\max} kT} = 4,965 \quad (1.10)$$

Se obține astfel:

$$\lambda_{\max} T = \frac{hc}{4,965 \cdot k} = 2,896 \cdot 10^{-3} \text{ [mK]} \quad (1.11)$$

$$\lambda_{\max} T = b$$

Relația (1.9) reprezintă legea de deplasare a lui Wien. Ea arată că la creșterea temperaturii corpului negru maximul densității spectrale de energie se deplasează spre lungimi de undă mici, respectiv, spre frecvențe mari.

Aplicație.

Pe baza legii lui Wien funcționează pirometrele optice care măsoară temperatura prin compararea luminozității unui filament încălzit la o temperatură cunoscută cu cea a corpului incandescent studiat. Dacă se consideră corpul omenesc ca un corp negru cu temperatura $t=37^\circ\text{C}$, ($T=310\text{ K}$), maximul radiației sale se află, conform legii lui Wien, la $9.3\mu\text{m}$, în domeniul IR. Iată de ce detectarea prezenței umane în întuneric, sau a variațiilor de temperatură generate de zonele bolnave din organismul uman se face cu senzori de IR.

Cele mai utilizate camere de luat vederi în IR funcționează cu ajutorul senzorilor piroelectrici.

Densitatea de energie electromagnetică din cavitate este:

$$w = \int_0^{\infty} \rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi k^4 T^4}{c^3 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \quad (1.12)$$

Valoarea integralei este $\pi^4/15$, deci densitatea de energie w se poate scrie:

$$w = \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} T^4 = aT^4, \text{ cu } a = \text{const.} \quad (1.13)$$

În practică se folosește mărimea fizică numită radianța spectrală $R(T)$ care reprezintă energia totală emisă în unitatea de timp de unitatea de suprafață într-un unghi solid de 2π (de o singură parte a suprafeței) și depinde de w prin relația :

$$R(T) = \frac{c}{4} w = \frac{ca}{4} T^4 = \sigma T^4, \quad R(T) = \sigma T^4 \quad (1.14)$$

unde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ se numește constanta lui Stefan-Boltzmann. Același nume poartă și legea radianței spectrale. Dacă corpul emițător nu este absolut negru, mai apare un coeficient de emisivitate ϵ ce depinde de material și de temperatură :

$$R(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.15)$$

În experimentul inițial radiația emisă de cavități era identică pentru că reprezenta radiație termică la echilibru (emisă de corpul negru), iar radiația emisă de suprafețe depinde de natura materialului care este asimilat cu un corp gri, cu coeficient de emisivitate $\epsilon < 1$.

Legea Stefan-Boltzmann poate fi considerată ca o lege de conversie a energiei de agitație termică a cărei măsură este temperatura absolută în energie electromagnetică

măsurată prin radianța spectrală.

1.2. Efectul fotoelectric

Efectul fotoelectric constă în emisia de electroni de la suprafața corpurilor solide când aceasta este supusă radiațiilor electromagnetice. Deși efectul se produce și la izolatori și semiconductori, cel mai des se studiază în cazul suprafețelor metalice.

În acest scop se folosește o celulă fotoelectrică spre al cărei catod alcătuit din materialul de studiat se trimite o radiație în domeniul vizibil, Fig.1.3.

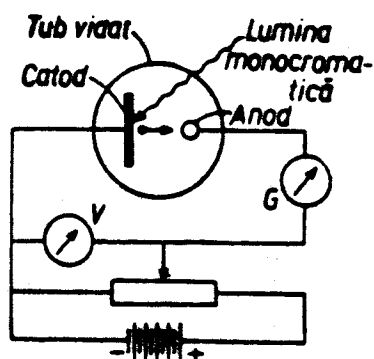


Fig.1.3.

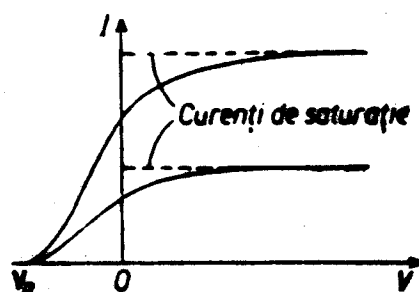


Fig.1.4.

Fotoelectronii emiși sub acțiunea luminii străbat spațiul dintre anod și catod. Tensiunea pe celulă se modifică de la valori negative, prin zero, la valori pozitive. Prin circuit apare un curent fotoelectric care variază în funcție de tensiune și de fluxul de radiație luminoasă de aceeași frecvență conform

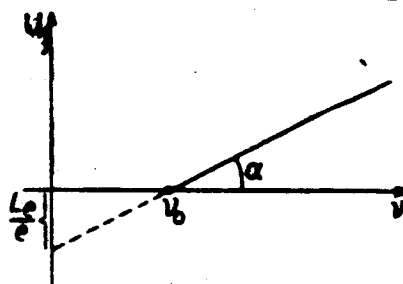


Fig.1.5.

Fig.1.4. Păstrând constant fluxul luminos și modificând

frecvența, tensiunea de frânare (la care $I=0$) - U_f variază cu frecvența conform Fig.1.5.

Experimental s-au stabilit următoarele legi ale efectului fotoelectric:

- 1.- intensitatea fotocurentului de saturație este proporțională cu fluxul radiației incidente;
2. - energia cinetica a fotoelectronilor, deci tensiunea de frânare, este proporțională cu frecvența radiației și nu depinde de fluxul ei;
3. - efectul fotoelectric se produce doar pentru radiații cu frecvența mai mare decât o anumită frecvență prag ν_0 specifică fiecărui metal din care este confecționat catodul;
4. - efectul fotoelectric se produce practic, instantaneu.

Tabelul 1.1.

Element	L_{ext}	λ_0
	eV	Å
litium	2,46	5040
natriu	2,28	5430
fier	4,63	2680
argint	4,70	2640
germaniu	4,62	2680
siliciu	3,59	3450

Caracterul ondulatoriu al câmpului electromagnetic nu permite explicarea acestor legi. În anul 1905 Einstein a completat ipoteza emisiei și absorbției de energie sub forma de cuante a lui Planck arătând că însuși câmpul electromagnetic are un caracter discret, cuantificat. Cuantele

de energie a câmpului electromagnetic se numesc fotoni.

Energia unui foton este:

$$E = h\nu = \frac{h}{2\pi} 2\pi\nu = \hbar\omega \quad (1.16)$$

iar impulsul:

$$p = mc \quad (1.17)$$

unde m este masa de mișcare a fotonului ce se determină din relația lui Eistein dintre masă și energie, paragraful 3.6.:

$$E = mc^2 = h\nu \Rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (1.18)$$

Impulsul fotonului devine:

$$p = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \quad (1.19)$$

Masa de repaus a fotonilor este nulă.

În metale, electronii se afla într-o groapa de potențial pe care o pot părăsi dacă primesc o energie cel puțin egală cu lucrul de extracție L_e ; în Tabelul 1.1. sunt prezentate valorile lucrului de extracție pentru câteva elemente și lungimile de undă prag corespunzătoare. Considerând că lumina este alcătuită din fotoni de energie $h\nu$, bilanțul energetic la interacția între foton și electronul din metal devine:

$$h\nu = L_e + \frac{mV^2}{2} \quad (1.20)$$

Relația de mai sus reprezintă legea lui Einstein pentru efectul fotoelectric. Energia cinetică a fotoelectronilor se consumă prin lucrul mecanic al forțelor electrice în cazul polarizării inverse a celulei. Deci:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_f \quad (1.21)$$

Efectul fotoelectric se produce dacă energia fotonilor $h\nu_0$ este cel puțin egală cu lucrul de extracție:

$$L_e = h\nu_0 \quad (1.22)$$

Introducând expresiile (1.21) și (1.22) în (1.20) se obține:

$$U_f = \frac{h\nu}{e} - \frac{h\nu_0}{e} \quad (1.23)$$

În concordanță cu rezultatul experimental prezentat în Fig.1.5. Panta dreptei este $tg\alpha = h/c$.

Emisia instantanee de fotoelectroni se explică prin cedarea întregii energii a fotonului la impactul cu electronul, fenomen ce se produce foarte rapid.

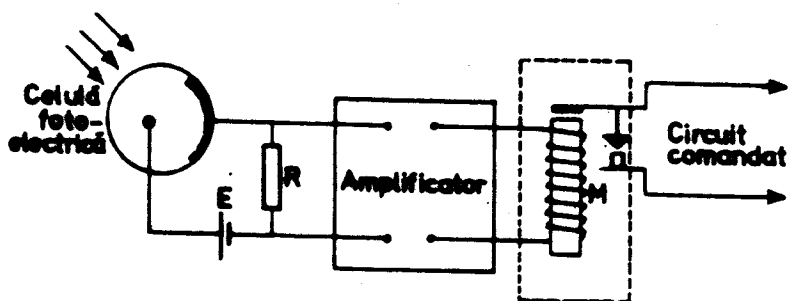


Fig.1.6.

În concluzie, efectul fotoelectric se produce la interacțiunea dintre un foton și un electron legat și se explică pe baza caracterului corpuscular al radiației electromagnetice. Celula fotoelectrică transformă un semnal luminos (sau alt domeniu, IR, UV) într-un semnal electric, găsindu-și numeroase aplicații în practică. În Fig.1.6 se prezintă o schemă simplă de releu cu fotocelulă.

1.3. Efectul Compton