

4. MĂRIMI FOTOMETRICE

Fotometria studiază caracteristicile luminii și a fenomenelor luminoase pe baza senzațiilor vizuale produse. Mărimile fotometrice sunt deci „fizico-fiziologice” și pentru definirea lor se utilizează „ochiul mijlociu” sau „observatorul fotometric de referință”.

Fluxul luminos si eficacitatea luminoasă spectrală.

Fluxul luminos Φ , primit sau emis de un corp, este fluxul energetic emis sau primit de acel corp, evaluat după senzația luminoasă pe care o produce. Fluxul luminos care corespunde unei anumite lungimi de undă, numit și flux luminos spectral, este:

$$\Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

În anul 1924 Comisia Internațională de Iluminat (CIE) a cuantificat sensibilitatea spectrală a ochiului uman, pe baza experimentelor statistice făcute asupra unor eșantioane suficient de mari de persoane cu vederea normală. S-a constatat că sensibilitatea ochiului omenesc se modifică odată cu lungimea de undă λ a radiației, fiind maximă pentru valoarea de $\lambda=555\text{nm}$.

Eficacitatea luminoasă spectrală relativă este definită ca raportul dintre fluxul luminos și fluxul energetic radiat pe o anumită lungime de undă:

$$V_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{\Phi_{e\lambda}}$$

Valorile stabilite de CIE pentru eficacitatea luminoasă spectrală relativă sunt reprezentate în figura 1.3. Valoarea maximă 1 este atinsă pentru lungimea de undă $\lambda=555\text{nm}$.

Deoarece fluxul energetic al radiației monocromatice este exprimat în wați, iar v_{λ} este o mărime adimensională, rezultă că unitatea de măsură a fluxului trebuie să fie tot wattul, dar la care se adaugă calificativul luminos pentru a arăta că acest flux este evaluat după senzația luminoasă produsă. Wattul luminos se notează W_l .

În tehnica iluminatului se preferă însă o altă unitate de măsură pentru fluxul luminos, numită lumen (lm), definită în funcție de unitatea de intensitate luminoasă (candela), deoarece pentru această mărime s-a realizat etalonul fundamental de măsură.

Lumenul este fluxul luminos emis într-un unghi solid de un steradian, de către o sursă punctiformă, care are intensitatea de o candelă după axa unghiului solid. Echivalentul fotometric stabilește legătura dintre wattul luminos și lumen și anume:

$$1 W_l = 683 \text{ lm}$$

Obs. Această valoare a echivalentului fotometric este valabilă pentru vederea fotopică (vederea de zi), atunci când ochiul este adaptat la luminanțe de peste $3,4 \text{ cd/m}^2$ și când excitațiile luminoase sunt recepționate de conurile aflate pe retina ochiului. Pentru vederea scotopică (nocturnă) echivalentul este de 1699 lm/W și presupune adaptarea ochiului la luminanțe sub $0,034 \text{ cd/m}^2$, când lumina este sesizată de bastonașele aflate pe retină. În acest caz maximul sensibilității relative spectrale se află la lungimea de undă $=507\text{nm}$. În situațiile intermediare dintre zi și noapte, când intervin în procesul vederii atât conurile cât și bastonașele, se vorbește de vederea mezopică.

Eficacitatea luminoasă

Fluxul luminos este parametrul ce caracterizează din punct de vedere luminotehnic sursele de lumină în ansamblu. Fabricanții surselor de lumină indică fluxul luminos pentru fiecare variantă de lampă electrică, această mărime fiind o caracteristică de bază a produsului.

Eficacitatea luminoasă (randamentul luminos) a unei surse este definită ca raportul între fluxul luminos emis de acea sursă și puterea electrică consumată:

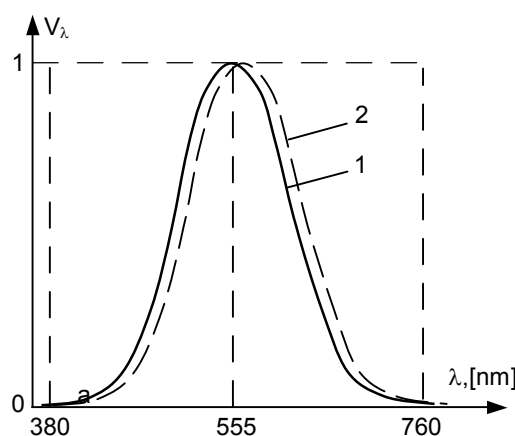


Fig.1.3 Eficacitatea luminoasă spectrală relativă.
1-vedere de zi (fotopică); 2-vedere nocturnă (scotopică)

$$\eta_l = \frac{\Phi}{P}, [\text{lm/W}]$$

Exemple de eficacități luminoase:

- Lampa cu incandescentă: $P=100 \text{ W}$ și $\Phi=1350 \text{ lm}$ $\Rightarrow \eta_l=13,5 \text{ lm/W}$
- Tub fluorescent: $P=40 \text{ W}$, $\Phi=2700 \text{ lm}$ $\Rightarrow \eta_l=67,5 \text{ lm/W}$
- Corpul negru la temperatura 3000K : $\Rightarrow \eta_l=20,6 \text{ lm/W}$
- Lampa cu descărcare în vapori de sodiu la joasă presiune: $\eta_l = 150...200 \text{ lm/W}$
- Maximul teoretic: întreaga putere emisă are loc pentru $\lambda=555\text{nm}$ $\Rightarrow \eta_l=\text{echivalentul fotometric}$
 $\eta_l = 683 \text{ lm/W}$.

Intensitatea luminoasă

Sursele de lumină nu repartizează fluxul luminos uniform în toate direcțiile. Noțiunea de intensitate luminoasă se folosește tocmai pentru a caracteriza acțiunea luminoasă într-o anumită direcție.

Intensitatea luminoasă a unei surse luminoase punctiforme într-o direcție este raportul dintre fluxul luminos și mărimea unghiului solid care cuprinde acest flux.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}, [\text{cd}]$$

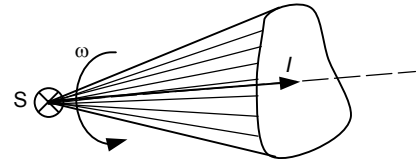


Fig.1.4 Vectorul intensitate luminoasă

Candela [cd] este o unitate fundamentală a SI, definită astfel: intensitatea luminoasă a unei suprafețe de $1/60\text{cm}^2$ (\approx orificiu cu diametrul de $1,5\text{mm}$) a radiatorului integral (corpul negru) aflat la temperatura de solidificare a platinei $T=2046,5\text{K}$.

Etalonul de intensitate luminoasă este format dintr-un tub de thoriă (1) în care se găsește oxid de thoriu (2). Tubul este scufundat într-un creuzet tronconic (4), umplut cu platină (3). Creuzetul este înconjurat de thoriă topită (5) sub formă de praf, care are rol de izolator termic. Toată această construcție se găsește într-un vas din cuarț topit (6), în jurul căruia este înfășurat un inductor (7).

Din punct de vedere electric acest etalon reprezintă un cuptor de inducție cu creuzet în interiorul căruia platina este încălzită și topită folosind tensiuni de alimentare de frecvență ridicată.

La deconectarea inductorului de la sursă, platina începe să se răcească și la trecerea din faza lichidă în faza solidă temperatura rămâne constantă la valoarea de $2046,5\text{K}$, timp de aproximativ 20 minute. În acest timp luminanța (strălucirea) orificiului ($\varnothing=1,5\text{mm}$; $1/60\text{cm}^2$) se păstrează la valoarea $6 \cdot 10^5$ (nt).

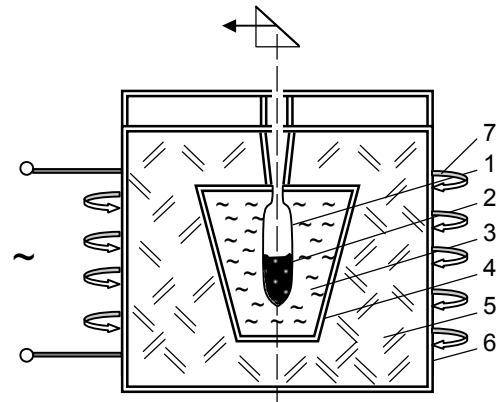


Fig.1.5 Etalonul primar de intensitate luminoasă

$$I = L \cdot S = L \frac{\pi D^2}{4} = 6 \cdot 10^5 \frac{\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1\text{cd}$$

Radiatorul integral propriu-zis este partea interioară a tubului de thoriă văzută prin orificiu de $1,5 \text{ mm}$. În laboratoare se folosesc în mod curent etaloane de măsură secundare constituite din lămpi cu incandescentă a căror intensitate luminoasă a fost comparată și etalonată în raport cu etalonul primar.

În general, intensitatea luminoasă a unei surse variază cu direcția în spațiu, sursele fiind încadrate în două categorii:

- surse *uniforme*, dacă intensitatea luminoasă este aceeași în toate direcțiile și atunci:

$$\Phi = \int_{\Omega} I \cdot d\omega = I \cdot \int_{\Omega} d\omega = 4\pi \cdot I$$

- surse *neuniforme*, pentru care obișnuit se definește o intensitate luminoasă medie pentru

$$\text{unghiul solid dat: } I_{med} = \frac{\Phi}{\omega}$$

Dintre intensitățile luminoase medii, în luminotehnică se întâlnesc mai frecvent:

- intensitatea luminoasă medie sferică: $I_{ms} = \frac{\Phi_t}{4\pi}$, [cd]
- intensitatea luminoasă medie a semisferei superioare: $I_{m\cap} = \frac{\Phi_t}{2\pi}$, [cd]
- intensitatea luminoasă medie a semisferei inferioare: $I_{m\cup} = \frac{\Phi_t}{2\pi}$, [cd]

Suprafața fotometrică se obține unind printr-o suprafață închisă extremitățile vectorilor intensitate luminoasă (=hodograful vectorilor intensitate luminoasă). Corpul fotometric al unei surse este spațiul închis de suprafața fotometrică și folosește pentru a reprezenta repartiția în spațiu a intensității luminoase a acesteia.

Sursele luminoase sunt *simetrice* dacă corpul lor fotometric are o axă de simetrie, numită axă optică. Curba fotometrică este urma lăsată de corpul fotometric pe un plan secant ce conține axa optică a sursei. Pentru surse luminoase simetrice, curbele fotometrice sunt identice indiferent de valoarea unghiului de azimut. Ele se construiesc în coordonate polare și se folosesc în proiectarea sistemelor de iluminat.

În cazul surselor luminoase *nesimetrice*, corpul fotometric nu mai are axă de simetrie, iar curbele fotometrice nu mai sunt identice pentru diferite unghiuri de azimut. Pentru a caracteriza repartiția în spațiu a intensităților luminoase se utilizează fie o familie de curbe fotometrice fie curbe izocandele, care reprezintă locul geometric al punctelor de pe o sferă concentrică cu sursa luminoasă, ce corespund direcțiilor caracterizate de aceeași intensitate luminoasă.

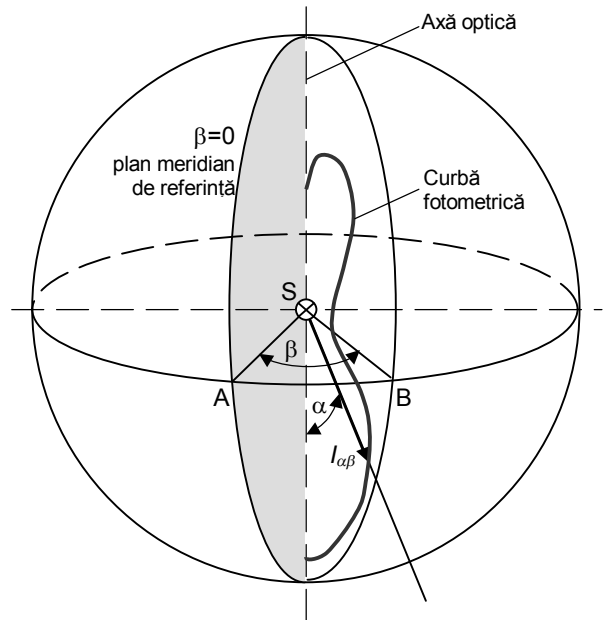


Fig.1.6 Curba fotometrică $I_{\alpha\beta} = f(\alpha, \beta)$
 α - unghi de înălțime; β - unghi de azimut
 S – sursă punctiformă.

Iluminarea

Iluminarea măsoară densitatea de flux luminos primit de o suprafață. Se notează cu E și se definește ca raportul dintre fluxul luminos elementar $d\Phi$ și suprafața elementară dS :

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, [lx]$$

Unitatea de măsură a iluminării este *luxul* [lx], definit ca iluminarea unei suprafețe de 1 metru pătrat pe care cade uniform repartizat un flux luminos de un lumen.

Deoarece se poate măsura cu ușurință și precizie, iluminarea este o mărime de bază în proiectarea instalațiilor de iluminat. Pentru calculul iluminării într-un anumit punct P al unei suprafețe date, se utilizează de cele mai multe ori o relație derivată din cea de definiție.

Astfel, fluxul luminos $d\Phi$ emis în unghiul solid elementar $d\omega$ sub care se vede suprafața elementară dS din centrul sursei punctiforme aflate în punctul O și la distanța $l = OP$ (v.fig.1.1) este:

$$d\Phi = I_{\alpha} \cdot d\omega$$

unde I_{α} este intensitatea luminoasă a sursei, în direcția punctului P aparținând unui plan oarecare Q . Dacă normala la suprafața dS face cu direcția OP unghiul de incidență δ , atunci aria elementară dA normală la direcția OP este:

$$dA = dS \cdot \cos \delta$$

iar unghiul solid elementar va avea valoarea:

$$d\omega = \frac{dA}{OP^2} = \frac{dS \cdot \cos \delta}{l^2}$$

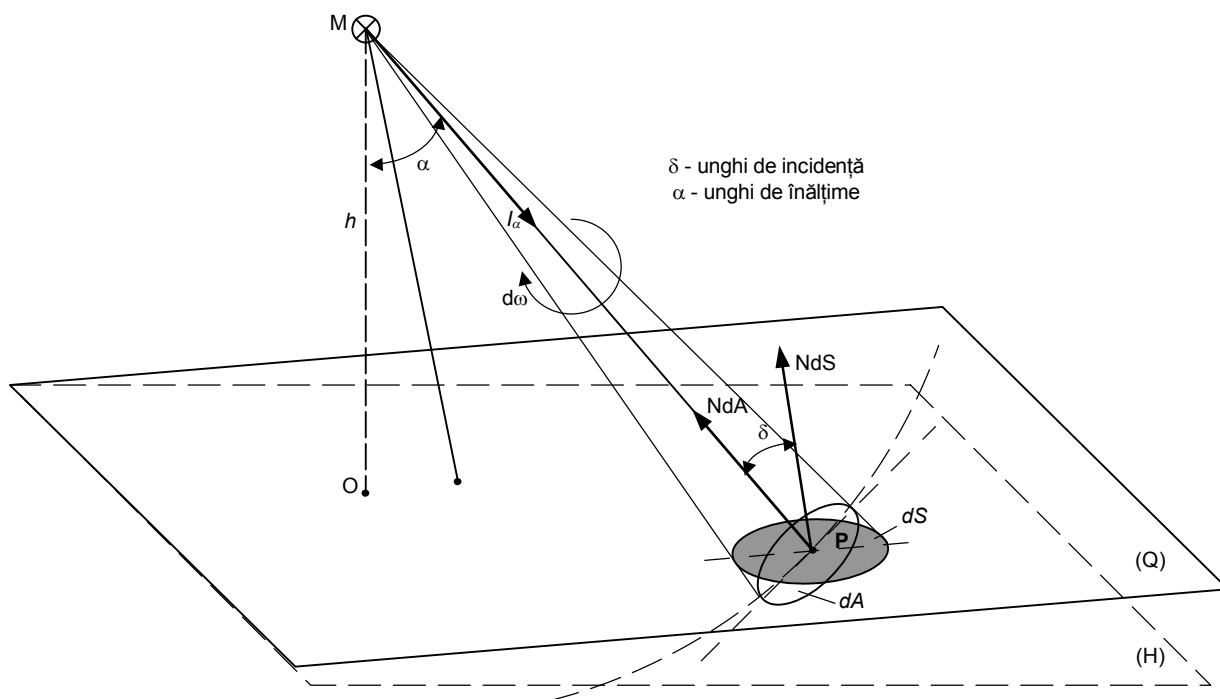


Fig.1.7 Iluminarea unei suprafețe dintr-un plan oarecare Q

Înlocuind în relația de definiție a iluminării se obține: $E = \frac{I_\alpha \cdot d\omega}{dS} = \frac{I_\alpha \cdot dS \cdot \cos \delta}{dS \cdot l^2}$, sau

$$E = \frac{I_\alpha \cdot \cos \delta}{l^2}$$

Această relație exprimă cele două, așa zise, legi fundamentale ale iluminării:

- Legea pătratelor distanțelor: iluminarea unei suprafețe este invers proporțională cu pătratul distanței la un același unghi de incidență δ . ($\delta = \text{ct}$).
- Legea cosinusului: la o aceeași distanță față de sursă, iluminarea variază direct proporțional cu cosinusul unghiului de incidență.

Dacă planul Q ar fi chiar unul orizontal, atunci unghiurile de înălțime și incidență ar deveni identice, iar iluminarea se mai poate scrie:

$$E = \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}$$

în care $h = l \cdot \cos \alpha = MO$ este înălțimea de amplasare a sursei.

Emitanța luminoasă (excitanța, radianța)

Emitanța luminoasă reprezintă de asemenea o densitate de suprafață a fluxului luminos, dar spre deosebire de iluminare, este vorba de fluxul luminos emis.

$$M = \frac{d\Phi}{dA}, \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right]$$

Când fluxul luminos radiat Φ de suprafața A a sursei luminoase nu este uniform, se poate defini a valoare medie a excitanței luminoase:

$$M_{med} = \frac{\Phi}{A}, \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right]$$

Această mărime se aplică nu numai suprafețelor care produc fluxul luminos, ci și suprafețelor care reflectă sau transmit fluxul luminos primit de la o sursă primară de lumină.

Luminanța (strălucirea)

Este singura mărime din tehnica iluminatului care poate fi apreciată în mod direct de ochi, în sensul că acesta deosebește diferențele de strălucire (luminanță) ale suprafețelor aflate în câmpul vizual. Luminanța se referă la suprafețele de la care pleacă lumina, indiferent dacă acestea sunt surse primare de lumină sau suprafețe iluminate care reflectă sau transmit lumina primită.

Luminanța (L) într-o direcție oarecare, definită prin unghiul α , într-un punct de pe suprafața unei surse primare sau secundare de lumină este dată de relația:

$$L = \frac{dI_{\alpha}}{dA \cdot \cos \alpha} = \frac{dI_{\alpha}}{dA_n}, \text{ [cd/m}^2\text{]}$$

în care:

dA – aria elementară a suprafeței emițătoare din jurul punctului considerat;

dI_{α} – intensitatea luminoasă a suprafeței elementare pe direcția de observație.

Luminanța (strălucirea) este considerată o mărime activă față de ochi deoarece excită direct ochiul. Se demonstrează că iluminarea retinei este direct proporțională cu luminanța câmpului vizual.

Dacă suprafața elementară dA a sursei generează fluxul $d\Phi_p$ care ajunge pe pupilă (v.fig.1.9) și apoi este transmis retinei afectat de factorul de transmisie τ al ochiului, iluminarea

Fig.1.8 Luminanța într-un punct al unei suprafețe

acesteia:

$$dE_{re} = \tau \frac{d\Phi_p}{dS_{re}}$$

Pupila este văzută din punctul P sub unghiul solid Ω_p și deci $d\Phi_p = dI_{\alpha} \cdot \Omega_p$. Dacă raportul de asemănare se notează cu $k_a = dA_n / dS_{re}$, atunci:

$$dE_{re} = \tau \frac{dI_{\alpha} \cdot \Omega_p}{dS_{re}} = \tau \cdot k_a \cdot \Omega_p \frac{dI_{\alpha}}{dA_n} = \tau \cdot k_a \cdot \Omega_p \cdot L = const. \cdot L$$

Pentru luminanță se mai poate da formula echivalentă:

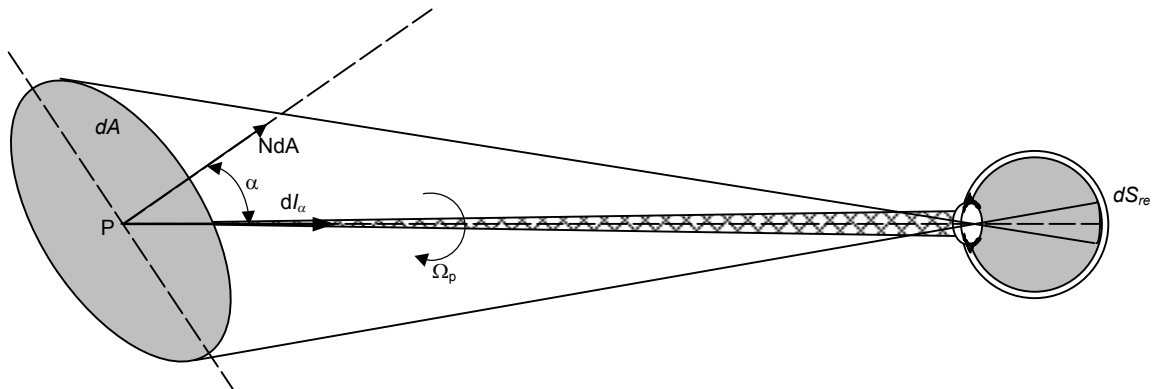


Fig.1.9 Luminanța într-un punct al unei suprafețe

$$L = \frac{dE}{d\omega}; \quad L = \frac{dI_n}{dA_n}, \quad \text{unde } dA_n - \text{element de arie normal la distanța de observație.}$$

Exemple de valori ale luminanțelor:

Suprafața soarelui: $2,5 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$

Corp negru la 6500k: $3 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$

Corp negru la 4000k: $2,5 \cdot 10^8 \text{ cd/m}^2$

Lampa cu incandescență: $(7 \div 100) \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$

Lampa fluorescentă: 10^4 cd/m^2

Cerul senin: $0,4 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$

Luna: $0,25 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$

O șosea iluminată artificial: $(0,5 \div 2) \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$

Cantitatea de lumină

Cantitatea de lumină (energia luminoasă), Q , este produsul dintre fluxul luminos și durata sa de utilizare. Fiindcă, în general, fluxul luminos nu este constant în timp, cantitatea de lumină se calculează cu relația:

$$Q = \int_0^t \Phi dt$$

Unitatea de măsură este *lumen-secunda* (lm.s).

Expunerea luminoasă

Expunerea luminoasă (cantitatea de iluminare), H , este produsul dintre iluminare și timp sau densitatea de suprafață a cantității de lumină primite de o suprafață.

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int_0^t E dt$$

Unitatea de măsură este *lux-secunda* (lx.s). Expunerea luminoasă intervine în fotografie, film, studiul facultăților vizuale.