

a obrátene nemôže nastávať v ľubovoľných množstvách, ale iba v celistvých násobkoch elementárneho množstva (kvanta) ε , daného súčinom tzv. *Planckovej kvantovej konštanty* h a frekvencie príslušného žiarenia ν ,

$$\varepsilon = \nu h, \quad h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ joule} \cdot \text{s}$$

Podľa Einsteina tieto kvantá žiarivej energie ostávajú v blízkosti určitého bodu aj pri svojom postupe v elm. vlnení, v dôsledku čoho energia na vlnoploche nie je rozložená rovnomerne. Tieto kvantá predstavujú akési atómy svetelnej energie, ktoré sa volajú *folóny*. To všetko však znamená určitý návrat k Newtonovej emanačnej (korpuskulárnej) teórii. *Kvantová teória svetla* s úspechom vysvetlila mnohé svetelné javy súvisiace s atomárnou štruktúrou hmoty, niektoré svetelné javy (napríklad interferencia a polarizácia svetla) z hľadiska kvantovej teórie svetla sú však nepochopiteľné. Pre túto príčinu používa sa dnes v optike niekedy klasická Maxwellova elektromagnetická teória svetla, podľa ktorej svetlo je elektromagnetické vlnenie šíriace sa z bodových svetelných zdrojov spojite na všetky strany, inokedy sa však výklad opiera o predstavu kvantových. Úlohou dnešnej fyziky je odstrániť rozpor medzi obidvoma týmito predstavami.

Mnoho svetelných javov možno vysvetľovať aj bez používania podrobnej predstavy o fyzikálnej povahe svetla. Takýmito javmi sa zaoberá *fotometria* a *geometrická optika*. Ostatné skúma tzv. *fyzikálna optika*. Pri praktickej aplikácii zákonov geometrickej optiky, ktorá sa zapodieva najmä tzv. *optickým zobrazovaním*, treba však niekedy používať aj pojmy fotometrické a často prizerať ku skutočnej fyzikálnej povahe svetla, takže uvedené tri hlavné časti optiky sú od seba do značnej miery závislé.

9.2. Hlavné veličiny a fotometrické zákony. Zdroje svetla sa rozdeľujú na primárne a sekundárne alebo na vlastné a nevlastné. Vlastné zdroje vidíme ich vlastným svetlom, t. j. svetlom, ktoré samé vyžarujú; zdroje nevlastné vidíme, len keď v ich okolí je vlastný zdroj svetla, ktoré nevlastný zdroj odráža, rozptyľuje a nerovnakou absorpciou jednotlivých zložiek zloženého svetla prípadne tiež vo farbe pozmeňuje.

Svetelný zdroj vyžaruje svetelnú energiu obyčajne v rôznych smeroch. Vektor $\mathbf{h}$, v okolí bodového svetelného zdroja, ktorého smer je so smerom postupu svetla súhlasne rovnobežný a ktorého absolútna hodnota sa číselne rovná množstvu svetelnej energie prechádzajúcej za jednotku času cez plošnú jednotku na smer postupu svetla kolmú, nazýva sa *vektorom hustoty prúdenia svetelnej energie*. Jeho absolútna hodnota sa nazýva *intenzita žiarenia*.

Keď pri svetle zloženom na interval $d\lambda$ z celkovej hustoty prúdenia svetelnej energie pripadá časť $dh_{0 \rightarrow \lambda}$, tzv. *monochromatická intenzita žiarenia* je daná podielom $h_\lambda = \frac{dh_{0 \rightarrow \lambda}}{d\lambda}$, takže

$$h = \int_0^\infty h_\lambda d\lambda \quad (1)$$

Nakoľko však ľudské oko nie je pre všetky farby rovnako citlivé, pre potreby praktickej fotometrie treba množstvá svetelnej energie pripadajúce na rôzne farby (vlnové dĺžky) znásobiť príslušnými korekčnými faktormi, ktoré pri svetle infračervenom a ultrafialovom sa, pravda, rovnajú nule.

Pre ľudské oko smerodajná *hustota svetelného toku*, nazývaná tiež *intenzitou svetla*, je potom

$$i = \int_0^\infty f_\lambda h_\lambda d\lambda \quad (2)$$

Cez plošku dS prechádza svetelný tok $d\Phi = i \cdot dS$. Konečnou plochou prechádza svetelný tok

$$\Phi = \int i \cdot dS \quad (3)$$

kde i je vektor hustoty prúdenia svetla.

Pod *celkovou svietivosťou* svetelného zdroja rozumie sa svetelný tok, ktorý vysiela svetelný zdroj do plného priestorového uhla. Určuje ju tiež výraz $\Phi = \oint i \cdot dS$, v ktorom sa však integrácia vzťahuje na plochu svetelný zdroj úplne obklopujúcu.

Keď bodový alebo aspoň prakticky bodový svetelný zdroj vysiela do priestorového uhla $d\omega$ svetelný tok $d\Phi$, podiel

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (4)$$

nazýva sa *smerovou svietivosťou* svetelného zdroja v príslušnom smere. Celková svietivosť zdroja je potom aj

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I d\omega \quad (5)$$

Pri svetelných javoch prejavujú sa obyčajne len veľmi malé množstvá energie, v dôsledku čoho absolútne merania fotometrických veličín nie sú dosť presné. Pre túto príčinu sa v praktickej fotometrii používajú osobitné jednotky, ktoré umožňujú presnejšie merania porovnávacie a berú ohľad aj na vlastnosti priemerného ľudského oka. Ich spoločným základom je jednotka smerovej svietivosti.

Definícia praktickej jednotky smerovej svietivosti sa časom menila. Najskôr sa za jednotku smerovej svietivosti brala svietivosť obyčajnej sviečky vo vodorovnom smere. Podľa toho sa ešte aj dnes jednotka svietivosti nazýva 1 *sviečkou*. Sviečka ako normál svietivosti sa štandardizovala, udával sa jej materiál, priemer a hrúbka a dĺžka knótu. Neskoršie sa plameň sviečky nahradil plameňom *Hefnerovej lampy*, v ktorej horel čistý octan amylnatý $\text{CH}_3 \cdot \text{COO} \cdot \text{C}_5\text{H}_{11}$. Vodorovná smerová svietivosť Hefnerovej lampy určovala tzv. *Hefnerovu sviečku* (skratka HK).

V poslednom čase (až do r. 1948) sa ako praktická jednotka smerovej svietivosti používala tzv. *medzinárodná sviečka* (skratka SI), ktorá bola definovaná ako desatina vodorovnej smerovej svietivosti *Harcourtovej lampy* určitých rozmerov. Horel v nej čistý pentán C_5H_{12} . Harcourtova lampka bola skonštruovaná tak, aby sa jej vodorovná smerová svietivosť rovnala polovici *Viollovej jednotky*, t. j. smerovej svietivosti v kolmom smere 1 cm^2 povrchu roztopenej platiny pri jej teplote topenia.

S platnosťou od r. 1948 za jednotku smerovej svietivosti bola však medzinárodne prijatá nová sviečka, tzv. *kandela* (skratka cd), definovaná ako $\frac{1}{60}$ kolmej svietivosti 1 cm^2 povrchu abs. čierneho telesa pri teplote topenia platiny.

$$1 \text{ cd} = 0,9813 \text{ SI} = 1,09 \text{ HK}$$

Od kandely (predtým od medzinárodnej sviečky) odvodená jednotka svetelného toku sa nazýva 1 *lúmen* (skratka lm). Podľa vzorca $\Phi = \int I \, d\omega$ je to napríklad svetelný tok, ktorý izotropný bodový svetelný zdroj so smerovou svietivosťou 1 cd vysiela do jednotkového priestorového uhla, $10 \text{ lm} = 1 \text{ Dlm}$ (*dekálúmen*).

Pretože celková svietivosť svetelného zdroja je definovaná ako ním vydávaný celkový svetelný tok, jednotka celkovej svietivosti je tiež 1 lúmen. Celková svietivosť izotropného bodového svetelného zdroja so smerovou svietivosťou 1 cd je napríklad

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I \, d\omega = 4\pi I = 4\pi \text{ lm} = 12,56 \text{ lm} \doteq 1,25 \text{ Dlm}$$

Intenzita E osvetlenia nejakej plochy je definovaná ako svetelný tok dopadajúci na plošnú jednotku osvetlenej plochy,

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{i \cdot dS}{dS} = i \cdot n = i \cos \alpha \quad (6)$$

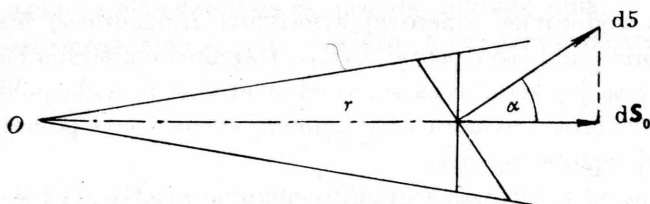
kde n je jednotkový vektor na osvetlenú plochu kolmý, orientovaný na stranu odvrátenú od svetelného zdroja.

Pre intenzitu osvetlenia plochy bodovým svetelným zdrojom môžeme písať tiež (obr. 9.4)

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\omega}{dS} = \frac{I d\omega}{dS_0 : \cos \alpha} = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad (7)$$

kde $dS_0 = dS \cos \alpha$ je tzv. *zdanlivá veľkosť* osvetľovanej plôšky.

Podľa tohto vzorca *intenzita osvetlenia plochy bodovým svetelným zdrojom sa znižuje s druhou mocninou jej vzdialenosti od zdroja svetla a je priamo úmerná kosínusu uhla dopadu svetla.*



Obr. 9.4.

Od kandely (predtým od medzinárodnej sviečky) odvodenou jednotkou intenzity osvetlenia je 1 lux (Lx). Podľa vzorca (7) je to osvetlenie plochy kolmej na smer dopadajúcich svetelných lúčov a od bodového svetelného zdroja so smerovou svietivosťou 1 cd vzdialenej na 1 m.

Pre čítanie je potrebné najmenej 10 Lx. V učebniach a kanceláriách má byť osvetlenie aspoň 30 Lx, v rysovníach asi 50 Lx.

Doteraz sme sa podrobnejšie zaoberali len *bodovými* svetelnými zdrojmi. V skutočnosti sú svetelné zdroje najčastejšie *plošné*. Plošné svetelné zdroje charakterizujeme tzv. *jasom*, t. j. smerovou svietivosťou J_0 plošnej jednotky v kolmom smere. Pre smerovú svietivosť v náhodilom smere väčšiny vlastných plošných svetelných zdrojov a nevlastných svetelných zdrojov s drsným povrchom (tzv. *kosinusové žiariče*) platí *Lambertov zákon*, objavený už r. 1760:

Smerová svietivosť plošného svetelného zdroja J v náhodilom smere sa rovná súčinu jeho smerovej svietivosti v kolmom smere (teda jasu) a kosínusu uhla odklonu smeru vyžarovania svetla od normály k povrchu plošného svetelného zdroja,

$$J = J_0 \cos \alpha \quad (8)$$

Jednotka jasu používaná v praktickej fotometrii sa volá 1 *stilb* (skratka sb). Podľa definície jasu $J_0 = dI_0/dS$ je to jas plošného svetelného zdroja, ktorého

svietivosť v kolmom smere, pripadajúca na 1 cm^2 povrchu, je 1 kandela. Jednotkou jas v sústave SI je 1 nit (skratka nt),

$$1 \text{ nt} = \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ cd}}{10^4 \text{ cm}^2} = 10^{-4} \text{ sb}$$

Svetelná výdatnosť plošných svetelných zdrojov (aj osvetlených povrchov, ktoré dopadajúce svetlo rozptyľujú tak dokonale, ako keby samé boli primárnymi svetelnými zdrojmi) sa vyjadruje aj pomocou svetelného toku vyžarovaného plošnou jednotkou povrchu do celého polopriestoru. Podľa Lambertovho zákona, keď jas zdroja je J_0 , táto výdatnosť je

$$\begin{aligned} H &= \int J_0 \cos \alpha \cdot d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} J_0 \cos \alpha \sin \alpha \cdot d\alpha d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi/2} 2\pi J_0 \cos \alpha \sin \alpha \cdot d\alpha = \pi J_0 \int_0^{\pi/2} \sin 2\alpha \cdot d\alpha = \pi J_0 \end{aligned} \quad (9)$$

Praktická jednotka takto definovanej výdatnosti plošného svetelného zdroja sa nazýva lambert. Podľa vzorca (9), keď jas zdroja je 1 stilb, jeho výdatnosť je 3,14 lambert.

Po zavedení rozličných fotometrických veličín a ich jednotiek môžeme sa už podrobnejšie zaoberať so vzorcom (2), ktorý vyjadruje súvis hustoty svetelného toku i a monochromatických hustôt prúdenia svetelnej energie h_λ . V prípade monochromatického svetla vzťah (2) nadobúda tvar

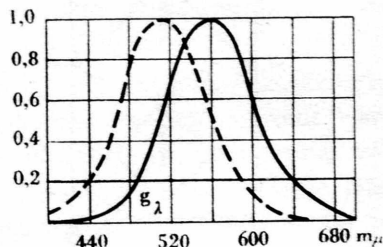
$$i = fh$$

V sústave SI jednotkou veličiny i je lumen/ m^2 a jednotkou veličiny h watt/ m^2 . Z toho vyplýva, že jednotkou prevodových činiteľov f_λ je lumen/watt. Vyjadrujú tzv. *svetelnú účinnosť* žiarení rozličných vlnových dĺžok.

Ludské oko pri osvetlení aspoň 3 lux je najcitlivejšie na žltozelenú farbu, ktorá sa vyznačuje vlnovou dĺžkou $\lambda_m = 0,555 \mu$. Pre túto farbu podľa pečlivých meraní je $f_m = 6,25 \cdot 10^2$ lumen/watt. Bezrozmerné podiely

$$g_\lambda = \frac{f_\lambda}{f_m} \leq 1 \quad (10)$$

sú tzv. relatívne citlivosti ľudského oka na farby. Grafickým obrazom ich závislosti od vlnovej dĺžky je plne vytiahnutá krivka na obr. 9.5. Podobný je význam prerušovane vytiahnutej krivky na obr. 9.5, ktorá sa vzťahuje na pozorovanie farebných plôch s osvetlením menším ako asi 3 lux.

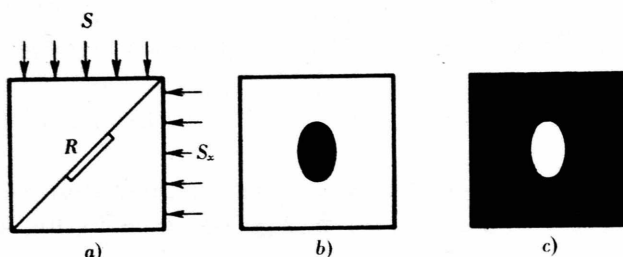


Obr. 9.5.

Prístroje na meranie smerových svietivostí sa menujú *fotometre*, prístroje na meranie intenzít osvetlení *luxmetre*. Fotometre sú založené na skutočnosti, že intenzita svetla aj intenzita osvetlenia plochy sú nepriamo úmerné druhej mocnine vzdialenosti od bodového alebo aspoň prakticky bodového svetelného zdroja,

$$i = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\omega}{r^2 d\omega} = \frac{I}{r^2}, \quad E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

Keď teda dva svetelné zdroje so smerovými svietivosťami I_1 a I_2 vyvolávajú na tom istom mieste rovnaké svetelné intenzity alebo — pri rovnakom uhle



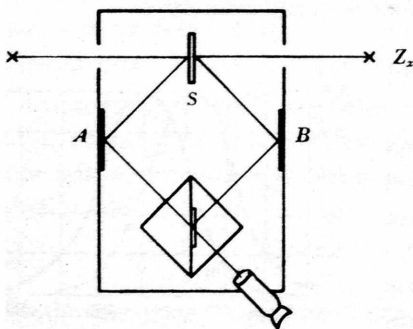
Obr. 9.6.

dopadu — rovnaké intenzity osvetlenia, sú splnené rovnice $\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$,

alebo — pri inom značení tých istých veličín — rovnicu $\frac{I_x}{r_x^2} = \frac{I}{r^2}$, podľa ktorej

$$I_x = I \frac{r_x^2}{r^2} \quad (11)$$

Presnosť fotometrov závisí najmä od presnosti realizácie rovnakých intenzít svetla alebo osvetlenia.



Obr. 9.7.

V Lummerovom a Brodhunovom fotometri (1889) indikátorom rovnosti dvoch svetelných intenzít je sklená kocka zložená z dvoch pravouhlých a rovnostranných hranolov, z ktorých jeden v strede svojej prieponovej steny má vybrúsenú plytkú jamku valcovitého tvaru (obr. 9.6a). Ak kocka spôsobom naznačeným na obrázku je osvetlená svetlom S , v dôsledku úplného odrazu svetla na rozhraní R zorné pole pri pozorovaní kocky

z opačnej strany má vzhľad naznačený na obr. 9.6b. Ak je však kocka osvetlená svetlom S_x z boku, vzhľad zorného poľa podľa obr. 9.6c je práve obrátený. Pri rovnosti intenzít obidvoch svetiel zorné pole je všade rovnako svetlé. Skutočné usporiadanie fotometra znázorňuje obr. 9.7, na ktorom Z a Z_x sú dva svetelné zdroje, S je sadrová doštička a A a B sú dve rovnaké zrkadlá.

Ako luxmetro sa najčastejšie používa prístrojov, ktorých údaj je priamo závislý od energie svetelného žiarenia dopadajúcej na plošnú jednotku za jednotku času. Keďže táto závislosť je rozličná pri svetlách s nerovnakým spektrálnym zložením a tú istú vlastnosť má aj intenzita osvetlenia, takéto luxetre sú upotrebitelné len pre svetlo, ktoré má vždy to isté spektrálne zloženie, napríklad pre svetlo slnečné.

9.3. Absorpcia svetla. Pri dopade svetla napríklad kolmom na planoparalelnú doštičku, ktorá je zhotovená z priehľadného alebo priesvitného materiálu, časť dopadajúceho svetelného toku sa odráža, časť prechádza a časť sa v materiáli doštičky *absorbuje*. Podľa *Lambertovho zákona*, objaveného už r. 1780, relatívne zmenšenie intenzity svetla (aj hustoty prúdenia svetelnej energie) pri jeho prechode cez veľmi tenkú vrstvu hrúbky dx je úmerné tejto hrúbke,

$$-\frac{di}{i} = a dx$$

Integrovaním tohoto vzťahu dostávame pre intenzitu svetla, ktoré prešlo materiálom hrúbky h , vyjadrenie

$$i = i_0 e^{-ah} = i_0 (10^{\log e})^{-ah} = i_0 10^{-\alpha h} \quad (12)$$

kde i_0 je intenzita svetla vstupujúceho do doštičky, teda odrazom už zoslabeného.

Látková konštanta a nazýva sa *absorpčným koeficientom*, konštanta $\alpha = a \log e$ je tzv. *extinkčný koeficient*. Recipročná hodnota extinkčného koeficientu sa rovná hrúbke materiálu, v ktorej sa intenzita svetla zoslabí na $1/10$, lebo podľa vzorca (12) pre $h = 1/\alpha$ je $i = i_0 10^{-1} = i/10$.

Pretože absorpčné koeficienty látok a tým aj ich extinkčné koeficienty závisia od vlnovej dĺžky svetla, zloženie svetla, ktoré nie je monochromatické, po prechode absorbujúcim prostredím je vo všeobecnosti pozmenené. Na priehlade červené sklo je preto červené, lebo z bieleho svetla pohlcuje jeho ostatné farebné zložky a pod. Spektrum absorpciou pozmeneného svetla sa nazýva *absorpčným spektrom* príslušného materiálu.