FOTOMETRIA

I. Wstęp

Postrzeganie bodźców wzrokowych uwarunkowana jest wieloma czynnikami pośród których dominującą rolę odgrywa ich charakterystyka fizyczna:

- natężenie bodźca określane poprzez ilość energii niesionej przez wiązkę światła i w określonym czasie padającej na siatkówkę,
- długość fali światła stanowiącego bodziec z uwagi na specyficzną wrażliwość oka uzależnioną właśnie od długości fali światła a zatem i od jego barwy.

Receptory siatkówki, czopki i pręciki reagują jedynie na promieniowanie elektromagnetyczne z wąskiego zakresu długości fal nazwanego promieniowaniem widzialnym, światłem. Dzieje się tak dlatego, że zawarte w receptorach substancje (białka z grupy opsyn) wykazują zdolność do absorpcji promieniowania elektromagnetycznego jedynie z zakresu długości fal od 380 nm (barwa fioletowa) do 780 nm (barwa ciemno czerwona). W konsekwencji nasze oczy nie są wrażliwe między innymi na promieniowanie ultrafioletowe (fale krótsze niż 380 nm oraz podczerwone (fale dłuższe niż 780 nm). Ponadto aktywność fotoreceptorów zmienia się wraz z warunkami oświetlenia. Widzenie w warunkach dobrego oświetlenia, w którym udział biorąc czopki, nazywane jest widzeniem *fotopowym*. Gdy warunki oświetlenia pogarszają się i ilość światła padającego na siatkówkę jest niewystarczająca aby wzbudzić aktywność czopków rolę detektorów światła przejmują pręciki. Pręciki posiadają znacznie większą czułość na promieniowanie jednakże nie pośredniczą w percepcji barw. Obrazy tworzone w mózgu w wyniku aktywności pręcików posiadają jedynie różne odcienie szarości („nocą wszystkie koty są czarne"). Tego typu widzenie, w którym rolę detektorów spełniają pręciki nazywane jest widzeniem *skotopowym* lub nocnym. Wyróżnia się również tzw. widzenie *mezopow*e – jest to widzenie w warunkach pośrednich pomiędzy widzeniem fotopowym i skotopowym – w tych warunkach widzenie barwne pojawia się lecz jest upośledzone. Opisane powyżej właściwości receptorów siatkówki znajdują swe odbicie w przebiegu tzw. krzywych *względnej wrażliwości widmowej* oka $V(\lambda)$ przedstawionych na ryc.1. Krzywe te ilustrują jak w określonych warunkach oświetlenia (skotopowych lub fotopowych) kształtuje się wrażliwość oka ludzkiego na światło o różnych barwach.

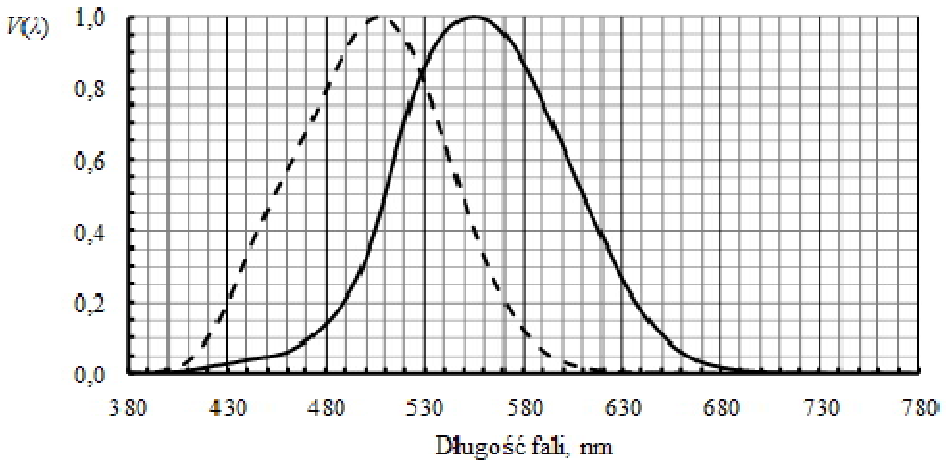


Fig. 1. Krzywa (funkcja) względnej wrażliwości widmowej oka $V(\lambda)$ ilustruje w jaki sposób wrażliwość oka na promieniowanie zależy od długości fali światła padającego na siatkówkę. Linia ciągła – widzenie fotopowe; linia przerywana – widzenie skotopowe.

Na przykład, jak to wynika z ryc. 1, w warunkach fotopowych maksymalna wrażliwość oka przypada na promieniowanie o długości fali 555 nm (V(555 nm) = 1) co odpowiada barwie żółto-zielonej. Dla światła o długościach fali 510 nm i 610 nm wartość $V(\lambda)$ wynosi 0,5 (wartości funkcji $V(\lambda)$ podane są w dodatku na końcu tekstu w tabeli 3). Oznacza to, że wrażliwość oka przy tych długościach fal jest dwukrotnie mniejsza niż przy długości fal 555 nm. Innymi słowy przy tej samej ilości energii docierającej do oka postrzegana

jasność źródeł emitujących światło o długościach fali 510 nm i 610 nm jest dwukrotnie mniejsza niż jasność źródła emitującego światło o długości fali 555 nm. W warunkach skotopowych maksimum wrażliwości widmowej przesuwa się w kierunku fal krótszych osiągając maksimum dla fali o długości 507 nm, której w warunkach fotopowych odpowiadałaby barwa niebiesko-zielona.

2. Wielkości fotometryczne i ich jednostki

Opisując promieniowanie elektromagnetyczne wyróżnia się dwa rodzaje wielkości: wielkości *radiometryczne* i wielkości *fotometryczne*. Wielkości radiometryczne służą do obiektywnej charakterystyki promieniowania np. poprzez liczbę fotonów w wiązce promieniowania czy przez ilość energii przenoszonej przez promieniowanie w jednostce czasu przez jednostkowa powierzchnię, czyli natężenie promieniowania. Przy opisie wrażeń wzrokowych wielkości te nie spełniają swojej roli ponieważ nie uwzględniają specyfiki narządu wzroku tj. różnej wrażliwości oka w zależności od długości fali światła (ryc. 1). Np. wiązka promieniowania ultrafioletowego, która nieść może bardzo dużą ilość energii nie wywoła wrażenia wzrokowego – nie jesteśmy na to promieniowanie wrażliwi. To samo dotyczy również promieniowania podczerwonego i każdego innego, wyjąwszy widzialne, rodzaju promieniowania elektromagnetycznego. Zatem, aby scharakteryzować wrażenia wzrokowe potrzebne są inne wielkości. Noszą one nazwę wielkości *fotometrycznych* i uwzględniają one specyfikę naszego narządu wzroku.

W następnej części niniejszego opracowania przedstawione zostaną podstawowe wielkości fotometryczne takie jak strumień świetlny, światłość źródła, natężenie oświetlenia i luminancja wraz z ich jednostkami.

2.1. Strumień świetlny

Strumień świetlny jest wielkością określająca moc promieniowania emitowanego przez źródło światła, ocenianą poprzez wrażenie wzrokowe wywoływane przez to światło. Jednostką strumienia świetlnego w układzie SI jest lumen (lm).

Definicja lumena jest następująca:

> *1 lumen to strumień świetlny wysyłany przez monochromatyczne źródło światła o częstotliwości 540×10^{12} Hz (długość fali w próżni wynosząca 555 nm) i mocy 1/683 wata.*

W ogólności (czyli dla źródeł emitujących światło będące mieszaniną różnych długości fal) wartość strumienia świetlnego wyraża wzór:

$$\Phi = 683\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}}\int_{380\,\mathrm{nm}}^{780\,\mathrm{nm}} \Phi_{\mathrm{E}}(\lambda)\cdot V(\lambda)\,d\lambda \tag{1}$$

gdzie:

$\Phi_{\mathrm{E}}(\lambda)=\frac{dP(\lambda)}{d\lambda}$ – oznacza gęstość spektralną (widmo) - moc emitowanego przez źródło promieniowania przy długości fali λ *w jednostkowym przedziale długości fal* $d\lambda$,

$V(\lambda)$ – wrażliwość widmowa oka przy długości fali λ.

Dla światła monochromatycznego powyższy wzór upraszcza się do postaci:

$$\Phi = 683\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}}\times P(\lambda)\times V(\lambda)$$

Przykład:

Obliczyć wartość strumienia świetlnego odpowiadającego promieniowaniu o mocy 1 W jeśli długość fali wynosi:

a) 555 nm (barwa zielono-żółta),

b) 490 nm (barwa niebieska).

Rozwiązanie:

a) wrażliwość widmowa $V(\lambda)$ oka przy długości fali wynoszącej 555 nm posiada wartość równą 1 (jest maksymalna – porównaj ryc.1 oraz dodatek A – tab.3), zatem strumień świetlny wynosi:

$$\Phi = 683\frac{\text{lm}}{\text{W}} \times 1\text{W} \times 1 = 683\,\text{lm}$$

b) wartość $V(\lambda)$ dla fali o długości 490 nm wynosi 0,208 zatem wartość strumienia świetlnego wynosi w tym przypadku:

$$\Phi = 683\frac{\text{lm}}{\text{W}} \times 1\text{W} \times 0{,}208 = 142\,\text{lm}$$

Zauważmy, że pomimo iż moc promieniowania docierającego do oka jest ta sama (1 W) to wrażenie wzrokowe (przy identycznych warunkach obserwacji) w przypadku światła o barwie niebieskiej jest około 5 krotnie mniej intensywne niż w przypadku światła o barwie zielono-żółtej.

Posługując się pojęciem strumienia świetlnego wprowadza się dwa istotne parametry charakteryzujące źródła światła i służące ich porównaniu. Są to *skuteczność świetlna* i *sprawność źródła*.

2.1.1. Skuteczność świetlna

Skuteczność świetlna to stosunek uzyskanego strumienia świetlnego Φ do mocy P zużytej na jego wytworzenie:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

Skuteczności świetlne kilku przykładowych źródeł światła przedstawiono w tabeli 1.

2.1.2. Sprawność źródła światła

Drugą wielkością służącą do charakterystyki porównawczej źródeł światła jest sprawność źródła światła. Wielkość ta opisuje zdolność źródła światła (wynikającą z mechanizmów fizycznych jego działania) do przetwarzana energii (przeważnie elektrycznej) na światło. Wyraża się ją jako stosunek skuteczności świetlnej źródła η do teoretycznej (maksymalnej) skuteczności świetlnej czyli 683 lm/W (odpowiada to sytuacji gdy cała energia zamieniana jest na światło):

$$sprawność\ źródła = \frac{skuteczność\ świetlna}{683\ lm/W} \times 100\%$$

Sprawności świetlne kilku wybranych źródeł światła przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skuteczności świetlne i sprawności wybranych źródeł światła.

Źródło światła	Skuteczność świetlna	Sprawność źródła
tradycyjna żarówka	8 - 20 lm/W	1,2% - 2,9%
żarówka halogenowa	20 - 30 lm/W	2,9% - 4,4%
lampa rtęciowa zwykła	30 - 65 lm/W	4,4% - 9,5%
kompaktowa lampa fluorescencyjna (żarówka energooszczędna)	40 - 90 lm/W	5,9% - 13%
dioda elektro-luminescencyjna (LED)	40 - 90 lm/W	5,9% - 13%

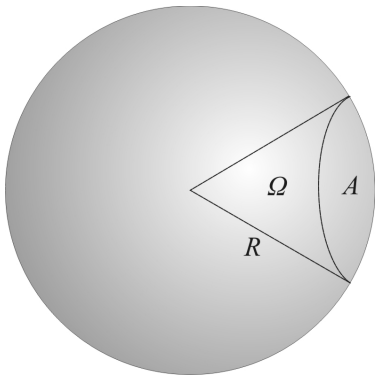
2.2. Światłość źródła

Światłość źródła światła (lub w skrócie światłość) jest cechą źródła światła, podczas gdy strumień świetlny charakteryzuje emitowane przezeń światło. Światłość opisuje wartość strumienia wysyłanego przez źródło w określony fragment przestrzeni zwany kątem bryłowym. W celu lepszego zrozumienia pojęcia światłości wyjaśnione zostanie najpierw pojęcie kąta bryłowego po czym powrócimy do zdefiniowania światłości.

Kąt bryłowy. Kąt bryłowy Ω to część przestrzeni ograniczona powierzchnią stożkową, odcinającą obszar o powierzchni A na powierzchni kuli o promieniu R i środku pokrywającym się z wierzchołkiem powierzchni stożkowej (ryc. 2). Jego bezwymiarową jednostką jest steradian. Liczbę steradianów w obrębie danego kąta brylowego obliczamy za pomocą wzoru:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \tag{2}$$

1 steradian to kąt bryłowy wycinający ze sfery powierzchnię A równą kwadratowi promienia R tej sfery.



Ryc. 2. Część A pełnej sfery o promieniu R wycina z przestrzeni kąt bryłowy o wartości Ω.

Pełna sfera to kąt bryłowy o wartości 4π steradianów:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ sr}$$

Powracając do definicji światłości mówimy, że:

światłość to stosunek strumienia świetlnego Φ emitowanego w jednostkowy kąt bryłowy Ω w kierunku obejmowanym przez ten kąt:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \tag{3}$$

Jednostką światłości jest kandela (cd) która jest jednostką podstawową układu SI:

$$1\text{cd} = \frac{1\,\text{lm}}{1\,\text{sr}}$$

Definiujemy ją w następujący sposób:

Źródło światła posiada światłość 1 kandeli jeśli emituje w danym kierunku w obręb kąta bryłowego o wartości 1 steradiana promieniowanie o częstotliwości 540×10^{12} Hz (długość fali w próżni wynosząca 555 nm), o mocy 1/683 wata.

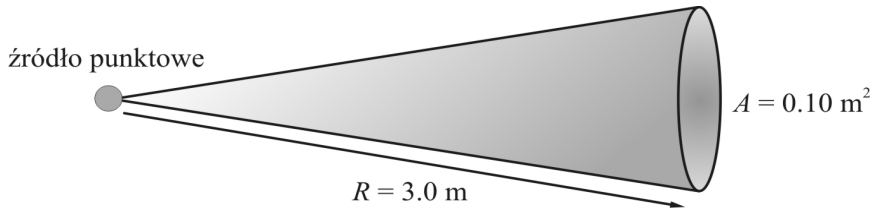
Można teraz powrócić do definicji lumena, jednostki strumienia świetlnego i podać ją w nieco innej formie niż w paragrafie 1, mianowicie:

1 lumen to strumień świetlny emitowany przez źródło światła o światłości 1 kandeli w jednostkowy kąt brylowy:

$$\Phi = I \cdot \Omega \qquad 1\,\text{lm} = 1\,\text{cd} \times 1\,\text{sr} \tag{4}$$

Przykład

Ile wynosi wartość strumienia świetlnego w obrębie kąta bryłowego pokazanego na rysunku poniżej jeśli światłość punktowego źródła światła wynosi 5000 cd.



Rozwiązanie

Zgodnie ze wzorem (4) $\Phi = I \cdot \Omega = 5000\,\text{cd} \cdot \Omega$

Obliczamy wartość kąta bryłowego: $\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{0.10\,\mathrm{m}^2}{9\,\mathrm{m}^2} = 0.011\,\mathrm{sr}$,

i ostatecznie otrzymujemy: $\Phi = I \cdot \Omega = 5000\ \mathrm{cd} \cdot 0.011\ \mathrm{sr} = 55\,\mathrm{lm}$.

Przykład

Moc promieniowania emitowana przez wskaźnik laserowy wynosi 0,5 W. Ile wynosi światłość wskaźnika, który emituje falę o długości 650 nm a plamka świetlna utworzona na ekranie w odległości 10,00 m ma pole powierzchni 1,0 cm^2?

Rozwiązanie:

$$\Phi = 683\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}} \times P(\lambda) \times V(\lambda) = 683\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}} \times 0.50\ \mathrm{W} \times 0.107 = 36\ \mathrm{lm}$$

$$\Omega = \frac{0.00010\,\mathrm{m}^2}{100\,\mathrm{m}^2} = 1 \times 10^{-6}\ \mathrm{sr}\ ,$$

$$I = \frac{36\ \mathrm{lm}}{10^{-6}\ \mathrm{sr}} = 36 \times 10^6\ \mathrm{cd}\ .$$

2.3. Natężenie oświetlenia. Prawo odwrotności kwadratu

Warunki oświetlenia powierzchni opisuje wielkość zwana natężeniem oświetlenia. W myśl definicji:

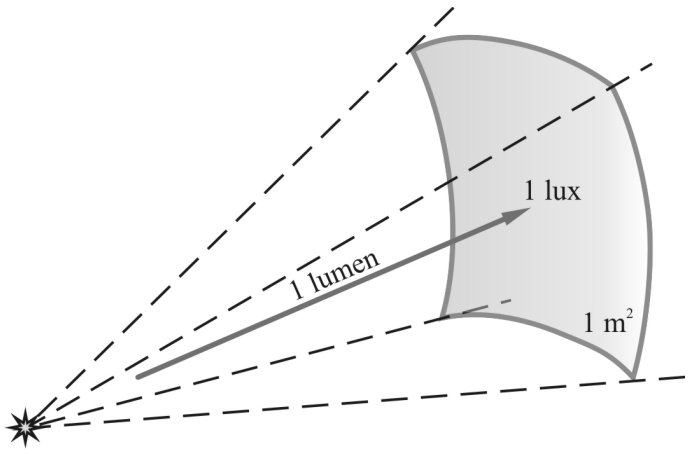
> *natężenie oświetlenia E to stosunek strumienia świetlnego Φ do pola powierzchni A, którą oświetla:*

$$E = \frac{\Phi}{A} \tag{5}$$

Jednostką strumienia jest lux (lx):

> *natężenia oświetlenia powierzchni wynosi 1 lux jeśli na powierzchnię 1 m^2 pada strumień świetlny o wartości 1 lumena (ryc. 3)*

$$1\,\mathrm{lux} = \frac{1\,\mathrm{lumen}}{1\,\mathrm{m}^2}$$



Ryc. 3. Jeśli strumień świetlny o wartości 1 lumena oświetla powierzchnię 1 m^2 to natężenie oświetlenia tej powierzchni wynosi 1 lux.

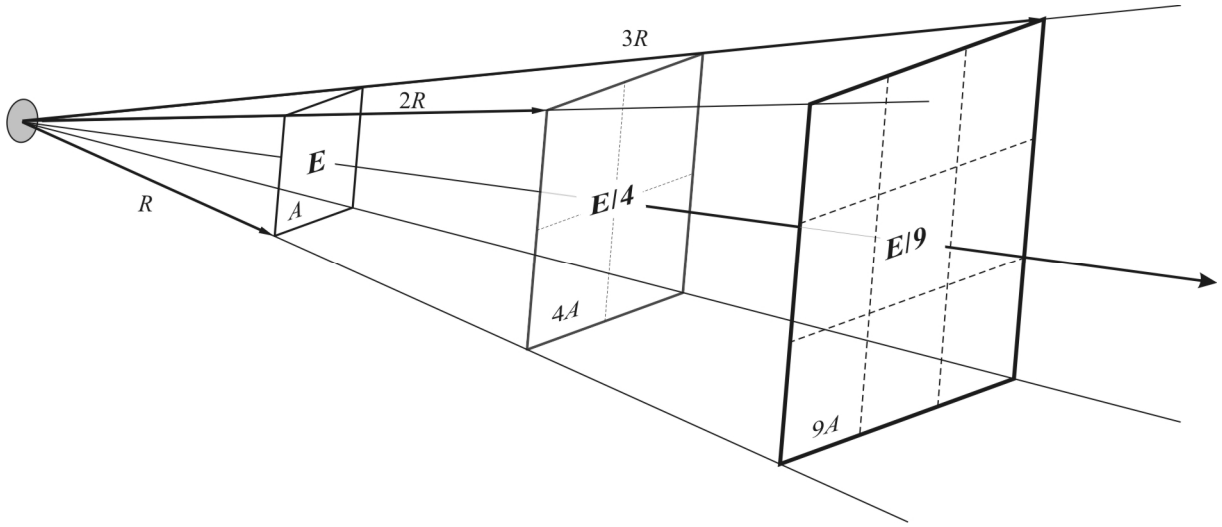
Rozważmy teraz światło wychodzące z *punktowego źródła* jednorodnie w całą przestrzeń (sferę). Ponieważ powierzchnia sfery wynosi $4\pi R^2$, źródło o światłości I wytwarza na jej powierzchni natężenie oświetlenia wyrażające się wzorem:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I \cdot \Omega}{A} = \frac{I \cdot 4\pi}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}$$

$$E = \frac{I}{R^2} \tag{6}$$

Wzór ten nosi nazwę prawa odwrotności kwadratu, które mówi że:

> *natężenie oświetlenia powierzchni jest wprost proporcjonalne do wartości strumienia padającego na powierzchnię i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości oświetlanej powierzchni od źródła światła (ryc. 4).*



Ryc. 4. Strumień świetlny emitowany przez punktowe źródło światła w obrębie określonego kąta bryłowego oświetla coraz większą powierzchnię. W wyniku tego natężenie oświetlenia rosnącej powierzchni zmniejsza się zgodnie z prawem odwrotności kwadratu czyli odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła (równanie 6).

Jeśli źródła światła nie można traktować jako punktowego (przykładem mogą być np. płaskie, duże oprawy oświetleniowe) wykładnik „2" w prawie odwrotności kwadratu przestaje być właściwy. Przechodząc od punktowego źródła światła do rozciągłego, płaskiego źródła o teoretycznie nieskończonych rozmiarach, zależność natężenia oświetlenia powierzchni od odległości od źródła przyjmuje postać:

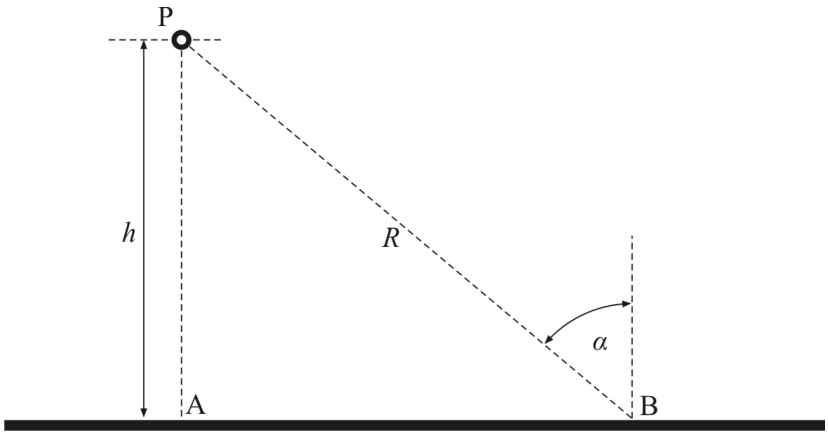
$$E = \frac{I}{R} \tag{7}$$

Podsumowując, dla realnych źródeł, których rozmiary nie są zaniedbywalnie małe w porównaniu z odległością od nich wykładnik we wzorach (6) lub (7) przyjmuje wartości pomiędzy 1 i 2.
Do tej pory przyjmowaliśmy, że światło pada prostopadle na oświetlaną powierzchnię. Jeśli tak nie jest to aby obliczyć wartość natężenia oświetlenia należy uwzględnić kąt α padania światła (ryc. 5). Natężenie oświetlenia wyrazi się wówczas wzorem:

$$E = \frac{I}{R^2} \cdot \cos\alpha \tag{8}$$

Można wykazać, że wzór (8) w sytuacji pokazanej na ryc. 5 równoważny jest wyrażeniu:

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



Ryc. 5. Punktowe źródło światła P o światłości *I* zawieszone na wysokości *h* nad oświetlaną powierzchnią wywołuje w punkcie B natężenie oświetlenia, którego wartość wyznacza się biorąc pod uwagę odległość *R* od źródła oraz wartość kosinusa kąta padania światła α.

Przykład

Lampa o światłości 500 cd, (wystarczająco mała by można ją było potraktować jako źródło punktowe) jest zawieszona na wysokości h = 1,00 m ponad centrum stołu. Ile wynosi natężenie oświetlenia:
a) w centrum stołu (punkt A na ryc. 5)
b) 1,20 m na prawo od centrum stołu (punkt B na ryc. 5)

Rozwiązanie:

a) na podstawie równania (6) lub (8) otrzymujemy:

$$E_{\mathrm{B}} = \frac{500\,\mathrm{cd}}{(1{,}00\,\mathrm{m})^2}\cos 0^\circ = 500\,\mathrm{lx}$$

b) z twierdzenia pitagorasa wyznaczamy odległość R punktu B od źródła P:

$$R = \sqrt{h^2 + (AB)^2} = 1{,}56\,\mathrm{m}$$

następnie wyznaczamy wartość cosα (cosα = h/R = 0,641) i otrzymane wartości podstawiamy do wzoru (8) otrzymując:

$$E_{\mathrm{B}} = \frac{500\,\mathrm{cd}}{(1{,}56\,\mathrm{m})^2}\cdot 0{,}641 = 132\,\mathrm{lx}$$

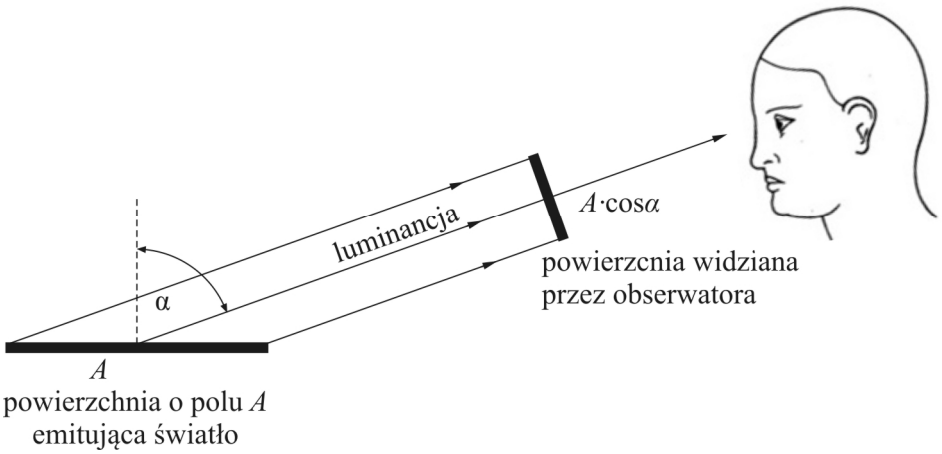
Natężenie oświetlenia jest podstawowym czynnikiem określającym komfort pracy. Jego wartości podlegają normom. Tabela 2 przedstawia wartości natężenia oświetlenia w zależności od rodzaju wnętrza i wykonywanej czynności w myśl polskiej normy PN-EN 12 464-1: 2004 oraz (*) zaleceń Europejskiej Komisji ds. Standardów (EN 12464-1 standard) – zalecenia dotyczące natężenia oświetlenia w pomieszczeniach związanych z opieka zdrowotną.

Tabela 2. Wartości natężenia oświetlenia według normy PN-EN 12 464-1: 2004

Rodzaj wnętrza, zadania	Natężenie oświetlenia, lx
Segregowanie, kopiowanie	300
Pisanie ręczne, pisanie na maszynie, czytanie obsługiwanie klawiatury, przetwarzanie danych	500
Prace kreślarskie	750
Sale posiedzeń i konferencyjne	500
*(Stomatologia) Długotrwała praca w obrębie jamy ustnej – wykonywanie długotrwałych, wymagających dużej dokładności i uwagi czynności	5000 - 10000
*(Stomatologia) Dobór odcieni przy dopasowywaniu sztucznych zębów i koronek dentystycznych	5000

2.4. Luminancja

Luminancja (luminancja źródła światła) jest wielkością, która dotyczy promieniowania pochodzącego z rozciągłego źródła światła (lub powierzchni świecącej światłem odbitym) i jest miarą postrzegania jasności powierzchni świecącej (ryc. 6).



Ryc. 6. Luminancja *L* opisuje „intensywność" wrażenia świetlnego odbieranego przez ludzkie oko, do którego, w określonym kierunku, dociera światło wytwarzane bezpośrednio przez powierzchnię będącą samoistnym źródłem światła bądź oświetloną z innego źródła.

Tak jak natężenie oświetlenia jest miarą „ilości" światła padającego na pewną powierzchnię tak luminancja jest miarą ilości światła emitowanego przez daną powierzchnię w określonym kierunku. Jest używana by scharakteryzować emisję światła z rozpraszającej, rozciągłej, świecącej powierzchni. Wskazuje ona jaka jest światłość postrzegana podczas obserwacji powierzchni pod określonym kątem. Luminancji używa się np. do scharakteryzowania jasności wyświetlaczy cyfrowych, telewizorów, monitorów, ekranów smartfonów. Np. typowa luminancja ekranów monitorów, telewizorów typu LCD oraz wyświetlaczy smartfonów mieści się, w zależności od ustawień ich parametrów, pomiędzy 150 i 350 cd/m^2 i zmienia się w zależności od kąta obserwacji[1].
Luminancję definiuje się w następujący sposób:

> *Luminancja L jest to stosunek światłości I powierzchni A promieniującej w kierunku obserwatora do pola rzutu tej powierzchni na płaszczyznę prostopadłą do kierunku obserwacji (ryc. 6):*

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos\alpha} \tag{9}$$

Jednostką luminancji jest cd/m^2. Używana jest również nazwa nit:

$$\text{nit} = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Podstawiając we wzorze (9) w miejsce światłości *I* wzór (3) otrzymujemy:

$$L = \frac{\Phi}{A \cdot \cos\alpha \cdot \Omega} \tag{10}$$

Na podstawie powyższego wzoru możemy interpretować luminancję jako stosunek wartości strumienia świetlnego Φ emitowanego w określonym kierunku (kąt α) z określonej powierzchni A w obrębie kąta bryłowego Ω. Luminancja jest miarą jasności powierzchni świecącej. Jej wartość, jak wynika ze wzorów (9) i (10), nie zależy od odległości, z której powierzchnia jest obserwowana.

3. Prawo Lamberta – rozsył światła

Zazwyczaj światłość i luminacja źródeł światła zależą od kierunku obserwacji. Łatwo to zauważyć obserwując np. monitor LCD pod różnymi kątami – im większy kąt obserwacji tym luminancja ekranu, a zatem i

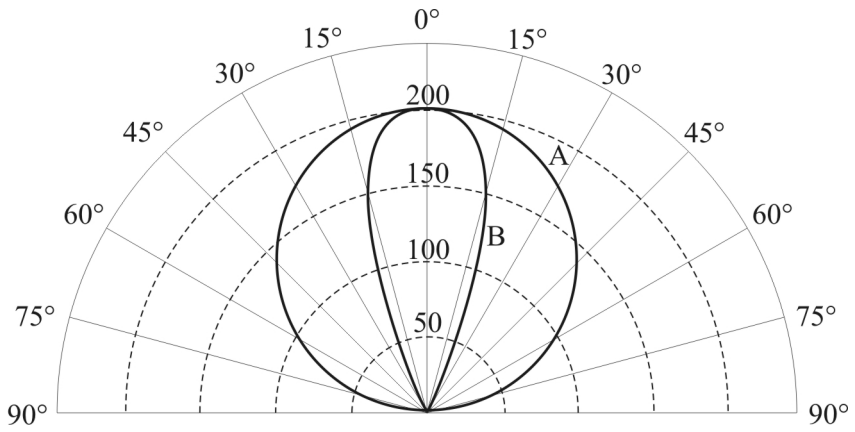
[1] wynika to z zależności rozsyłu światła przez świecącą powierzchnię od kąta obserwacji (patrz paragraf 3).

jego jasność są coraz mniejsze. Opis rozsyłu światła w zależności od kierunku nosi nazwę charakterystyki kierunkowej promieniowania i jest przedstawiany w tzw. współrzędnych biegunowych tzn. przedstawia wartość światłości w funkcji kąta obserwacji α (ryc. 7). W celu ilustracji problemu rozsyłu światła posłużymy się przykładem powierzchni idealnie rozpraszającej światło (przykładem takiej powierzchni jest idealna płytka matowa, tzw. matówka). Powierzchnię taką określa się mianem *powierzchni lambertowskiej*. Światłość $I(\alpha)$ takiej powierzchni zmienia się w zależności od kąta pomiędzy kierunkiem obserwacji a normalną do powierzchni według wzoru:

$$I(\alpha) = I_{\perp} \cos\alpha \tag{11}$$

gdzie $I_{\perp}$ oznacza światłość źródła w kierunku prostopadłym do obserwowanej powierzchni (dla kąta $\alpha = 0$).

Wzór ten nosi nazwę *prawa kosinusów Lamberta*. Charakterystyka kierunkowa powierzchni lambertowskiej we współrzędnych biegunowych jest okręgiem (okrąg A na ryc. 7). Na rysunku tym, dla porównania, przedstawiono również charakterystykę kierunkową reflektora (krzywa B na ryc. 7).



Ryc. 7. Charakterystyka kierunkowa powierzchni lambertowskiej (A) o światłości $I_{\perp} = 200$ cd przy obserwacji na wprost (0°) i światłości 100 cd przy obserwacji pod kątem 60° oraz reflektora (B) o tej samej światłości $I_{\perp} = 200$ cd przy obserwacji na wprost (0°) oraz światłości 150 cd przy obserwacji pod kątem 15° i praktycznie zerowej przy obserwacji pod kątem 60 stopni.

Istotną cechą powierzchni lambertowskiej jest to, że jej luminancja nie zależy od kąta obserwacji, czyli powierzchnia ta jest tak samo jasna niezależnie od kierunku pod jakim na nią patrzymy. Uzasadniamy to obliczając luminację powierzchni lambertowskiej podstawiając do wzoru (9) definiującego luminację wzór Lamberta (11):

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos\alpha} = \frac{I_{\perp} \cos\alpha}{A \cdot \cos\alpha} = \frac{I_{\perp}}{A},$$

w którym kosinus kąta α upraszcza się dając wielkość niezależną od kąta obserwacji.

4. Fotometr wizualny

W celu wyznaczania światłości źródeł światła drogą porównawczą stosuje się przyrządy optyczne zwane fotometrami wizualnymi a porównania światłości wykonuje się poprzez obserwację za pomocą oka. Oko ludzkie nie jest w stanie określić stosunku światłości źródeł lecz jest w stanie bardzo precyzyjnie porównać luminancję oświetlanych przez nie powierzchni. Jeśli oświetlane powierzchnie mają ten sam rozmiar, ich zdolności do rozsyłu światła są takie same i obserwacji obu powierzchni dokonujemy pod tym samym kątem, to jeśli wrażenie jasności obu powierzchni jest takie samo to możemy wnioskować, że natężenia oświetlenia obu powierzchni są również takie same:

$$E_x = E_0$$

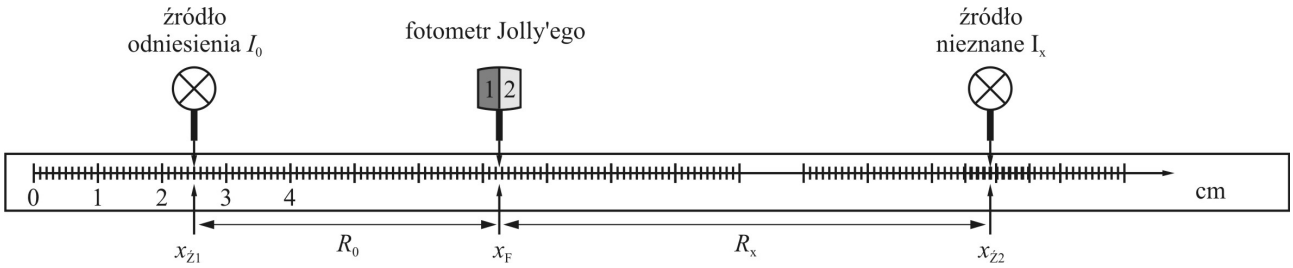
gdzie E_x – natężenie oświetlenia powierzchni przez źródło o nieznanej światłości
E_0 – natężenie oświetlenia powierzchni przez źródło odniesienia o znanej światłości.

W przypadku źródeł punktowych, znając odległości oświetlanych powierzchni od źródeł, których światłość jest porównywana, korzystając ze wzoru (6) można obliczyć światłość nieznanego źródła I_x w stosunku do światłości źródła odniesienia I_0:

$$\frac{I_x}{R_x^2} = \frac{I_0}{R_0^2},$$

$$I_x = I_0 \frac{R_x^2}{R_0^2} = I_0 \left(\frac{R_x}{R_0}\right)^2. \tag{12}$$

Schemat układu pomiarowego stanowiącego fotometr wizualny przedstawiono na ryc. 7. Podstawową jego częścią jest element pozwalający na jednoczesną obserwację powierzchni oświetlanych przez dwa źródła. W omawianym przypadku (fotometr Jolly'ego) są to dwie parafinowe kostki przedzielone nieprzepuszczającą światła przegrodą. Fotometr Jolly'ego umieszcza się na ławie optycznej pomiędzy źródłami światła i przesuwa się ją tak aby obie kostki fotometru, 1 i 2, stały się równo jasne. Odczytując wtedy odległości R_x oraz R_0 kostek fotometru od obu źródeł wyznaczamy na podstawie wzoru (12) światłość nieznanego źródła I_x.



Ryc. 7. Schemat układu fotometru wizualnego.

Przykład
Elementy 1 i 2 kostki fotometru są tak samo jasne gdy odległości kostki od źródła odniesienia wynosi 30 cm a od źródła badanego, którego światłość wyznaczamy, 60 cm. Ile wynosi wartość światłości badanego źródła jeśli światłość źródła odniesienia wynosi 60 cd?

Rozwiązanie:
Podstawiając odpowiednie dane do równania (12) otrzymamy:

$$I_x = 60\,\text{cd}\left(\frac{60\,\text{cm}}{30\,\text{cm}}\right)^2 = 240\,\text{cd}$$

Światłość badanego źródła wynosi 240 cd.

5. Przebieg ćwiczenia

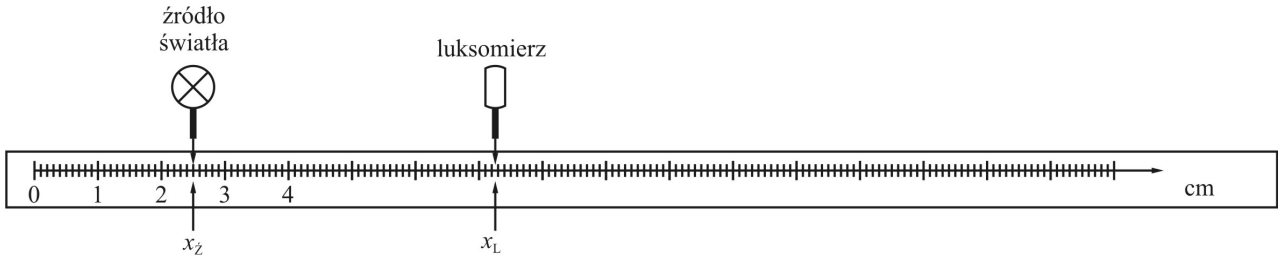
A. WYZNACZANIE WZGLĘDNEJ ŚWIATŁOŚCI DWÓCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

1. Zestawić układ pomiarowy tak, jak pokazano na ryc. 7: ustawić Źródło 1 o mocy P_1 w położeniu $x_{ź1}$, źródło 2 o mocy P_2 w położeniu $x_{ź2}$ a fotometr Jolly'ego w położeniu x_F, takim aby uzyskać jednakowe oświetlenie kostek fotometru. Zanotować położenia $x_{ź1}$, $x_{ź2}$ i x_F.
2. Kilkukrotnie powtórzyć wyznaczanie ustawienia fotometru, przy którym oświetlenie obu jego kostek jest subiektywnie takie samo. Za każdym razem zapisywać położenie fotometru x_F.
3. Obliczyć średnią wartość położenia x_F. Oszacować błąd pomiaru położenia Δx_F
4. Oszacować błędy położenia źródeł światła $\Delta x_{ź1}$ i $\Delta x_{ź2}$.
5. Obliczyć odległości źródeł światła od fotometru, $R_0 = \bar{x}_F - x_{ź1}$ oraz $R_x = x_{ź2} - \bar{x}_F$. Oszacować błędy ΔR_1 i ΔR_2 tych wielkości.

6. Z wzoru $\frac{I_1}{R_0^2}=\frac{I_2}{R_x^2}$ wyliczyć wartość względnej światłości dwóch źródeł, $\frac{I_2}{I_1}=\frac{R_x^2}{R_0^2}$. Oszacować błąd pomiaru $\Delta\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$.
7. Porównać otrzymaną wartość $\frac{I_2}{I_1}$ z wartością $\frac{P_2}{P_1}$ gdzie P_1 i P_2 oznaczają nominalne moce źródeł 1 i 2.
8. Zmienić odległość pomiędzy porównywanymi źródłami światła. Powtórzyć czynności opisane w punktach od 2 do 7.

B. PRAWO ODWROTNOŚCI KWADRATU

1. Zestawić układ pomiarowy tak, jak pokazano na ryc. 8.



Ryc. 8. Schemat układu pomiarowego do sprawdzania prawa odwrotności kwadratu.

2. Oszacować błędy położenia $\Delta x_ż$ i wskazania luksomierza ΔE.
3. Zanotować położenie punktowego źródła światła, $x_ż$, luksomierza, x_L oraz natężenie oświetlenia, E wskazane przez fotoogniwo dla wybranego położenia luksomierza (np. w połowie ławy optycznej). Kilkukrotnie powtórzyć to samo ustawienie układu: za każdym razem zmieniać położenie luksomierza wracać do pierwotnego ustawienia i zapisywać jego wskazanie. Oszacować błędy Δx_L pomiaru położenia oraz ΔE natężenia oświetlenia.
4. Ustawić źródło światła możliwie blisko początku ławy, zanotować jego położenie $x_ż$. Ustawić luksomierz możliwie blisko źródła światła, zanotować jego położenie, x_L oraz natężenie oświetlenia E wskazane przez luksomierz.
5. Oddalić luksomierz od źródła światła, zanotować jego położenie, x_L oraz natężenie oświetlenia E.
6. Powtórzyć czynność opisaną w punkcie 5. założoną w protokole liczbę razy dla różnych odległości pomiędzy źródłem światła i luksomierzem.
7. Dla wszystkich wyników pomiarów obliczyć odległość pomiędzy źródłem światła i luksomierzem, $x = x_L - x_ż$.
8. Narysować wykres zależności natężenia oświetlenia E w funkcji odległości x od źródła, $E = f(x)$. Nanieść prostokąty błędów.
9. Zaproponować i nanieść na wykresie teoretyczny przebieg funkcji opisującej badaną zależność. Dopasować tę zależność przy pomocy programu Graph lub Excel.
10. Dla wszystkich odległości pomiędzy źródłem światła i luksomierzem obliczyć odwrotność kwadratu tych odległości, $\frac{1}{x^2}$. Oszacować błędy pomiaru tych wielkości.
11. Narysować wykres zależności natężenia oświetlenia E w funkcji odwrotności kwadratu odległości od źródła $\frac{1}{x^2}$, $E = f\left(\frac{1}{x^2}\right)$. Nanieść prostokąty błędów.
12. Zaproponować i nanieść na wykresie teoretyczny przebieg funkcji opisującej badaną zależność. Dopasować tę zależność przy pomocy programu Graph lub Excel.

DODATEK

Tabela 3. Wartości względnej wrażliwości widmowej oka $V(\lambda)$ w zależności od długości fali światła w warunkach fotopowych.

długość fali, nm	$V(\lambda)$	długość fali, nm	$V(\lambda)$
400	0,000	555	1,000
410	0,001	560	0,995
420	0,004	570	0,952
430	0,012	580	0,870
440	0,023	590	0,757
450	0,038	600	0,631
460	0,060	610	0,503
470	0,091	620	0,381
480	0,139	630	0,265
490	0,208	640	0,175
500	0,323	650	0,107
510	0,503	660	0,061
520	0,710	670	0,032
530	0,862	680	0,017
540	0,954	690	0,008
550	0,995	700	0,004

Tabela 4. Podstawowych wielkości fotometryczne i ich jednostki

Wielkość		Jednostka		Uwagi
Nazwa	Symbol	Nazwa	Symbol	
Światłość	I	kandela	cd	Kandela jest wielkością podstawową układu SI, charakteryzuje źródło światła
Strumień świetlny	Φ	lumen (= cd·sr)	lm	$\Phi = 683\frac{\text{lm}}{\text{W}}\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{\text{E}}(\lambda)\cdot V(\lambda)\,d\lambda$ Stosuje się również określenie *moc świetlna*
Natężenie oświetlenia	E	lux (= lm/m^2)	lx	$E = \frac{\Phi}{A}$ Wielkość ta dotyczy światła padającego na oświetlaną powierzchnię
Luminancja	L	nit = cd/m^2	nit	$L = \frac{\Phi}{A\cdot\cos\alpha\cdot\Omega}$ Wielkość ta nie zależy od odległości od powierzchni emitującej światło