

BADANIE ELEKTRYCZNYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA 71

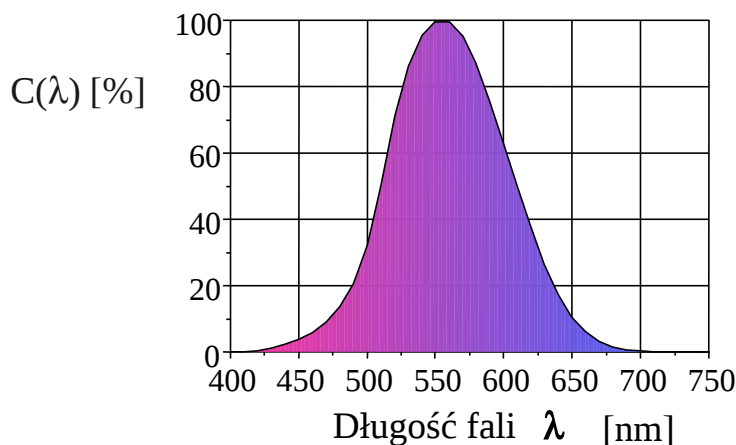
Wzrok jest jednym z najważniejszych zmysłów człowieka. Oko reaguje na promieniowanie elektromagnetyczne (światło), obejmujące jedynie względnie wąski przedział długości fal od fioletu do czerwieni, czyli od ok. 400 nm do ok. 750 nm¹. Pokazano to na Rys. 1.² Względna wrażliwość oka $C(\lambda)$ wykazuje maksimum przy długości fali ok. 555 nm, co odpowiada barwie żółto – zielonej.

Wielkości fotometryczne

Pierwszym parametrem, który charakteryzuje ilościowo źródło dowolnego promieniowania, w tym także światła widzialnego, jest **moc promieniowania źródła** wyrażona w watach, czyli ilość energii wysyłana przez nie w jednostce czasu. Moc promieniowania mierzy się przy pomocy detektorów nieselektywnych tzw. bolometrów lub termostosów, których czułość jest jednakowa w szerokim przedziale widma fal elektromagnetycznych.

Ponieważ jednak wrażliwość oka na fale o różnej długości jest różna (patrz Rys. 1), to, aby określić „moc wrażeń świetlnych” wprowadza się pojęcie **strumienia świetlnego Φ** . Jego jednostką jest 1 **lumen** [1 **lm**], który jest zdefiniowany jako strumień świetlny wysyłany przez źródło emitujące moc 1/683 wata (1,46 miliwata) promieniowania monochromatycznego o długości fali 555 nm. Dla żółtego światła sodowego ($\lambda=589$ nm) moc ta powinna wynosić ok. 1,95 mW, a dla lasera He-Ne ($\lambda =638$ nm), aż 7,93 mW, aby spowodować identyczne wrażenia w oku, jak promieniowanie o długości fali 555 nm i mocy 1.46 mW. Dla źródeł światła białego, emitowanego przez typowe lampy oświetleniowe, sprawa jest nieco bardziej złożona. Oprócz krzywej wrażliwości oka na poszczególne barwy oznaczonej jako funkcja $C(\lambda)$, musimy jeszcze uwzględnić **rozkład widmowy mocy promieniowania $e(\lambda)$** (czyli mocy emitowanej przez źródło przy poszczególnych długościach fali).³

Ponieważ większość źródeł nie wysyła światła równomiernie we wszystkich kierunkach wprowadzono wielkość, zwaną **światłością lub natężeniem światła J** , która jest zdefiniowana jako



Rys. 1. Zależność względnej wrażliwości oka od długości fali promieniowania elektromagnetycznego

pochoдна strumienia świetlnego $d\Phi$ po kącie bryłowym $d\omega$:⁴

¹ 1 nm = 10⁻⁹m

² Krzywa przedstawia wartości uśrednione dla wielu ludzi.

³ Strumień świetlny Φ będzie wtedy opisany wzorem :
$$\Phi = \int_{400\text{nm}}^{800\text{nm}} C(\lambda) \cdot e(\lambda) d\lambda$$

⁴ Kąt bryłowy $d\omega$ o wierzchołku w środku kuli o promieniu r jest zdefiniowany wzorem: $d\omega = \frac{dS}{r^2}$,

$$J = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1)$$

Jednostką światłości jest kandela⁵ [cd], $cd = \frac{lm}{sr}$, gdzie sr oznacza jednostkę kąta bryłowego – steradian.

Pełny kąt bryłowy jest równy 4π steradianów. Jedna kandela jest więc światłością, której odpowiada emisja mocy świetlnej $1/683$ W/sr, o długości fali 555 nm. Ze względów praktycznych (łatwość pomiaru), to właśnie kandela, a nie lumen jest najważniejszą jednostką fotometrii, czyli dziedziny, zajmującej się pomiarami strumienia świetlnego oraz ilościową charakterystyką zjawisk świetlnych. Wartość 1 kandel została ustalona arbitralnie ($1/683$ W/sr dla $\lambda = 555$ nm). Kandela należy do grupy podstawowych jednostek fizycznych systemu SI, do której wchodzi ponadto metr, kilogram, sekunda, amper, kelwin i mol. Wszystkie inne jednostki wielkości fizycznych są jednostkami wtórnymi.

Bardzo istotnym parametrem źródła światła jest jego sprawność świetlna η , zdefiniowana jako stosunek wysłanego strumienia świetlnego Φ , do pobieranej mocy elektrycznej P.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \left[\frac{\text{lumen}}{\text{wat}} \right] \quad (2)$$

Opisane wyżej wielkości fotometryczne: strumień światła światłość, i sprawność świetlna charakteryzują źródło. Miarą oświetlenia powierzchni, na którą pada światło, jest **natężenie oświetlenia** E, zdefiniowane jako stosunek padającego na powierzchnię strumienia świetlnego Φ , do wielkości tej powierzchni S:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (3)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest 1 luks [lx]. Jest on równy lm/m^2 . Natężenie oświetlenia E zależy od odległości r oświetlanej powierzchni od źródła światła i od kąta padania światła α . Dla źródła punktowego promieniującego jednakowo we wszystkich kierunkach, natężenie oświetlenia powierzchni maleje z kwadratem jej odległości od źródła (bo powierzchnia kuli jest proporcjonalna do kwadratu jej promienia). Przyrządy do pomiaru natężenia oświetlenia nazywamy luksomierzami. Są one używane przez fotografów i kamerzystów, dla uzyskania prawidłowych naświetleń. Przepisy BHP (bezpieczeństwa i higieny pracy) określają minimalną ilość luksów niezbędnych np. przy czytaniu, pisaniu lub na określonym stanowisku roboczym.

Źródła światła

Wśród najbardziej rozpowszechnionych źródeł światła możemy wyróżnić trzy zasadnicze grupy:

1. źródła wysokotemperaturowe (rozżarzone ciała stałe, np. żarówki).
2. źródła fluoroscencyjne, w których atomy gazu pobudzone są do świecenia polem elektrycznym w zjonizowanym gazie.
3. źródła luminescencyjne, takie jak np. coraz częściej stosowane diody elektroluminescencyjne i lasery półprzewodnikowe.

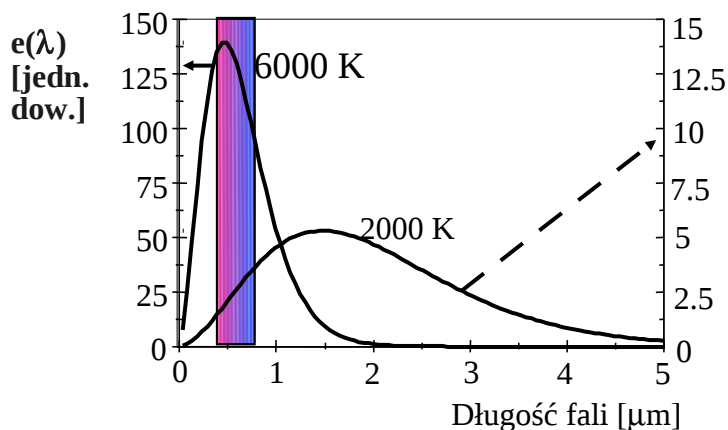
Ad 1. Termiczne źródła promieniowania, takie jak Słońce, lub żarówki, wysyłają fale elektromagnetyczne w postaci widma ciągłego, obejmującego szeroki przedział długości fal, od ultrafioletu do podczerwieni, przedział znacznie szerszy, niż ten, na który oko reaguje. Aby opisać teoretycznie rozkład widmowy mocy promieniowania $e(\lambda)$ źródeł termicznych, wprowadza się wyidealizowane źródło, tzw. ciało doskonale czarne, które promieniuje, będąc w równowadze termodynamicznej z otoczeniem, (taką samą moc emituje jak pochłania). Obliczone rozkłady $e(\lambda)$ dla ciała doskonale czarnego silnie zależą od temperatury, co pokazano na Rys. 2. Rozkłady widmowe promieniowania Słońca (temperatura ok. 6000 K) i żarówki (temperatura ok. 2000 K), są w przybliżeniu zgodne z przewidywaniami tych obliczeń. Maksimum $e(\lambda)$ dla Słońca przypada w pobliżu maksimum czułości oka ludzkiego. Natomiast większość promieniowania żarówek jest wysyłana w obszarze podczerwieni, tylko niewielka część zużywanej energii elektrycznej jest zamieniana na światło widzialne.

gdzie dS jest elementem powierzchni tej kuli, wyciętym przez kąt d ω

⁵ Candela to po łacinie świeca. Początkowo wzorcem 1 cd była świeca włoska o określonej średnicy i długości knota. Nie był to wzorzec precyzyjny.

Jest to widoczne na Rys. 2, na którym zakres czułości oka (oznaczony prostokątem) obejmuje sporą część mocy wysyłanej przez Słońce, i tylko niewielką część mocy wysyłanej przez żarówkę o temperaturze 2000 K. Poniżej temperatury ok 700 K emitowane jest wyłącznie promieniowanie cieplne i takie źródła nie świecą (w zwykłym sensie tego słowa).

Ocenia się, że zwykła żarówka o mocy zasilania równej 20 W, wysyła strumień świetlny ok. 240 *lm*, przy temperaturze włókna wolframowego ok. 2500 K. Natomiast tzw. żarówka halogenowa tej samej mocy (20 W), może emitować nawet do 340 *lm*, gdy temperatura jej włókna osiąga 3000 K.⁶



Rys. 2. Rozkład widmowy mocy promieniowania $e(\lambda)$ ciała doskonale czarnego, przy dwu temperaturach. Zaznaczono też przedział czułości oka. Skala $e(\lambda)$ po prawej stronie dotyczy krzywej dla 2000 K

Ad 2. W lampach fluorescencyjnych, pracujących pod obniżonym ciśnieniem gazu, atomy wysyłają promieniowanie pod wpływem płynącego przez gaz prądu elektrycznego. Elektrony, rozpędzane polem elektrycznym (wytwarzanym przez przyłożone do elektrod napięcie), powodują wzbudzenia atomów (przeniesienie elektronów atomu na wyższe poziomy energetyczne), oraz ich jonizację (elektrony atomu zostają od niego oderwane). Procesom wzbudzenia i jonizacji atomów gazu towarzyszą procesy rekombinacji, czyli powrotu atomów do podstawowego stanu energetycznego. Rekombinacja powoduje emisję linii widmowych, charakterystycznych dla danego rodzaju atomów gazu. Najczęściej gazem roboczym wypełniającym powszechnie stosowane lampy fluorescencyjne są pary rtęci Hg. Wzbudzone atomy Hg emitują głównie linie leżące w obszarze ultrafioletu, nie emitują natomiast podczerwieni. Aby uzyskać promieniowanie widzialne, wewnętrzne ścianki lamp rtęciowych pokryte są substancją fluoryzującą (świecącą na biało), pod wpływem promieniowanie ultrafioletowego. Lampy rtęciowe są sprzedawane w wersji świetlówek (rurki) lub jako świetlówki kompaktowe. Wg danych publikowanych przez producentów lamp, świetlówka zwykła emituje prawie 100 lumenów światła na każdy wat mocy pobieranej, świetlówka kompaktowa tylko ok. 55 lumenów na wat, a najmniej zwykłe żarówki (ok. 12 *lm/W*).

Ad 3. Gdy dioda półprzewodnikowa jest zasilana w kierunku przewodzenia, wówczas w obszar złącza p-n są wstrzykiwane nośniki mniejszościowe, które rekombinują z nośnikami większościowymi. W specjalnie budowanych diodach dominuje rekombinacja promienista i prawie każdy wstrzyknięty polem elektrycznym nośnik powoduje emisję fotonu o energii równej lub bliskiej szerokości przerwy wzbudzonej półprzewodnika. W diodach o dobrej jakości, prawie cała dostarczona energia elektryczna może być zamieniona na światło. Niestety, ze względu na rozkład czułości oka, ich sprawność świetlna η zależy jeszcze od długości fali λ emitowanego promieniowania. Stosując diody z różnych materiałów półprzewodnikowych, można uzyskać światło o różnych barwach, od niebieskiej do podczerwieni. Diody

⁶ Wysoką temperaturę wolframu można utrzymać dzięki tzw. cyklowi halogenowemu. Gdy drut wolframowy ma temperaturę bliską punktowi topnienia (3655 K), atomy wolframu odparowują na ścianki bańki i drut żarnika staje się coraz cieńszy. „Normalna” żarówka ulega szybkiemu przepaleniu.. Do bańki lampy halogenowej wprowadza się pary halogenu (zwykle jod). Cząsteczki jodu wchodzi w reakcję chemiczną z wolframem na ściankach bańki. Powstały związek odparowuje ze ścianek, a gdy jego cząsteczki znajdują się przy powierzchni gorącego drutu wolframowego ulegają dysocjacji. Uwolnione ze związku atomy wolframu osadzają się ponownie na drucie, dzięki czemu jego grubość w czasie eksploatacji zmniejsza się znacznie wolniej.

świecące niebiesko, mogą także dawać światło zbliżone do białego, jeśli pokryte są substancją fluoryzującą, podobnie jak świetlówki opisane wyżej. Diody elektroluminescencyjne mają zastosowanie jako lampki wskaźnikowe w sprzęcie elektronicznym, a także jako miniaturowe lasery do zapisu i odczytu informacji na dyskach optycznych. Ograniczeniem ich powszechnego zastosowania do celów oświetleniowych, jest jak dotychczas wysoka cena.

Metoda pomiarowa

Podstawową trudnością w pomiarach wartości bezwzględnych wielkości fotometrycznych jest konieczność posiadania źródła wzorcowego. Ponieważ aktualnie obowiązujący wzorzec 1 kandel jest trudny w realizacji, zastąpimy go wzorcem wtórnym, którego dokładność będzie wystarczająca dla celów tego ćwiczenia. Do tego celu użyjemy trzy połączone szeregowo diody elektroluminescencyjne (LED), emitujące światło białe. Producent podaje, że przy natężeniu prądu przewodzenia diody $I = 20 \text{ mA}$, wartość emitowanego natężenia światła (światłość) wynosi $J = 2$ kande. Zespół trzech diod emituje więc 6 kandel.

Drugą trudnością w pomiarach fotometrycznych jest konieczność zastosowania takiego detektora światła, którego czułość na poszczególne barwy jest podobna do krzywej wrażliwości oka ludzkiego. Właściwości takie posiada fotodiody półprzewodnikowa (FD) wyposażona w odpowiednie filtry optyczne korygujące jej czułość spektralną. Fotodiody ta, umieszczona w pewnej odległości od źródła wzorcowego będzie reagować na natężenie oświetlenia E , jej powierzchni światłoczułej. Zakładamy, że natężenie prądu fotodiody FD generowanego przez światło ze źródła wzorcowego, jest proporcjonalne do światłości tego źródła, czyli:

$$i_{fwz} \propto J_{wz}$$

Podobnie dla dwu innych badanych źródeł, natężenia fotoprądów i_{f1} oraz i_{f2} , generowanych przez światło, będą proporcjonalne do ich światłości J_1 oraz J_2 , jeśli w każdym przypadku odległości źródeł od detektora będą identyczne. Mierząc wartości odpowiednich natężeń fotoprądu, możemy obliczyć światłości badanych źródeł (w kandelach).

Aby wyznaczyć sprawności świetlne żarówki i świetlówki kompaktowej, musimy wyznaczyć wysyłane przez nie strumienie świetlne Φ . Ze wzoru (1) wynika, że całkowity strumień światła Φ_w wysyłany przez źródło izotropowe o światłości N kandel jest równy $4\pi N = 12,57 \times N$ lumenów. Jeżeli więc ustawimy detektor światła (fotodiody) w ustalonej odległości od źródła i zmierzemy natężenie fotoprądu i_f , to możemy przyjąć, że tej wartości fotoprądu odpowiada taki właśnie strumień świetlny. Co prawda źródło wzorcowe (diody LED) jest źródłem emitującym promieniowanie kierunkowo, w ograniczony kąt bryłowy (ok. 0.12 sr), ale producent podaje wartość jego światłości w kierunku maksymalnej emisji. Przy małej powierzchni detektora, możemy traktować takie źródło jako izotropowe o podanej światłości. Musimy jednak umieścić detektor w centrum emitowanej wiązki. Dwa pozostałe źródła (żarówka i świetlówka kompaktowa) dość dobrze spełniają warunek izotropowości. Przy jednakowych odległościach każdego ze źródeł od fotodiody możemy przyjąć, że emitowane strumienie świetlne są proporcjonalne do światłości poszczególnych źródeł J_{wz} , J_1 , J_2 , a więc także do zmierzonych natężeń fotoprądów i_{wz} , i_1 , i_2 .

Korzystamy ze wzoru:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_{wz}} = \frac{J_n}{J_{wz}} = \frac{i_n}{i_{wz}}, \text{ gdzie } n = 1 \text{ lub } 2$$

Znając strumienie świetlne wysyłane przez żarówkę i świetlówkę kompaktową, oraz moce zasilania możemy wyznaczyć sprawności świetlne η tych źródeł. Dodatkowo dla żarówki możemy wyznaczyć zależność strumienia świetlnego od mocy i napięcia zasilania. Można w ten sposób zbadać, jak zmieniają się warunki oświetleniowe, przy zmianach napięcia w sieci elektrycznej.